

ミャンマー・マンダレーにおける微動を用いた 地盤構造モデルの推定と想定地震による強震動予測

本資料は、広島大学大学院工学研究科(当時)の藤田秀隆氏による修士論文の発表資料をまとめたものです。引用の際には、以下をご参照ください。

藤田秀隆, 三浦弘之: ミャンマー・マンダレーにおける微動を用いたS波速度構造モデルとそれに基づく地盤増幅特性の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.523-524, 2019.9.

藤田秀隆, 三浦弘之: ミャンマー・マンダレーにおける微動を用いた地盤構造モデルの推定と想定地震による強震動予測, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第43巻, pp.285-288, 2020.03.

広島大学 三浦弘之

ミャンマー・マンダレーにおける 微動を用いた地盤構造モデルの推定と 想定地震による強震動予測

建築防災学研究室
M183417 藤田 秀隆

ミャンマー連邦共和国について



シュエダゴン・パゴダ
(ヤンゴンを代表する寺院)

面積	68万km ² (日本の1.8倍)
人口	約5100万人(2014年発表)
首都	ネピドー
最大の都市	ヤンゴン
主な宗教	上座部仏教

■ サガイン断層と既往の研究

国土の中央にサガイン断層が通っており、地震多発地域である。

(2012年M6.8、2016年M6.8など)

サガイン断層近傍に主要都市が位置しており、地震被害が懸念されている。

既往の研究

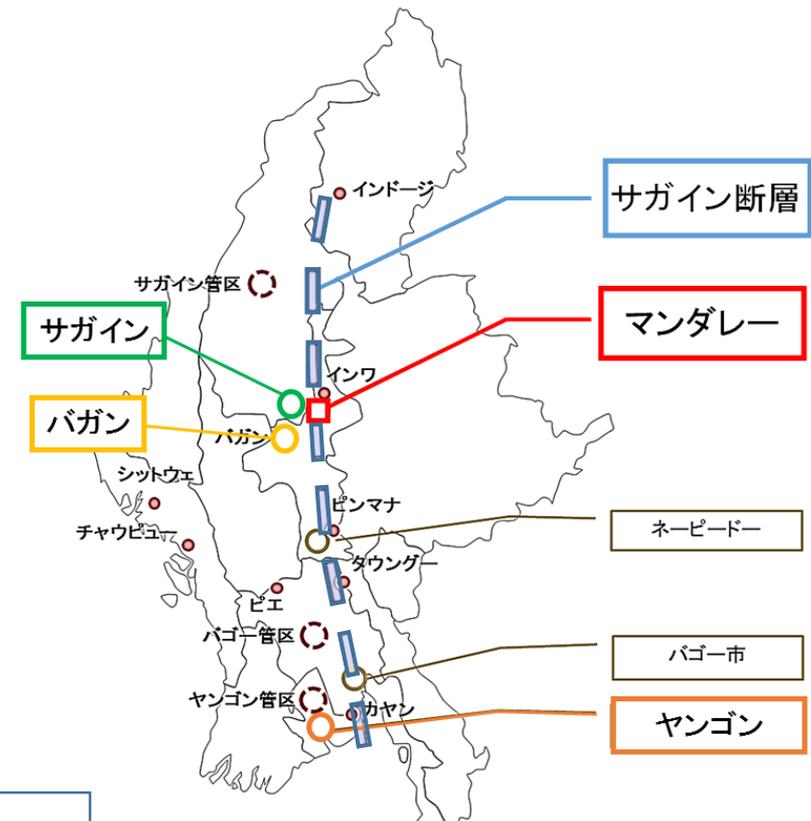
ヤンゴン: 廣川ほか(2016)

バガン : Miura et al.(2019)

→微動を用いたS波速度構造の推定

サガイン : Aung et al.(2018)

→サガイン断層を想定地震とした強震動予測

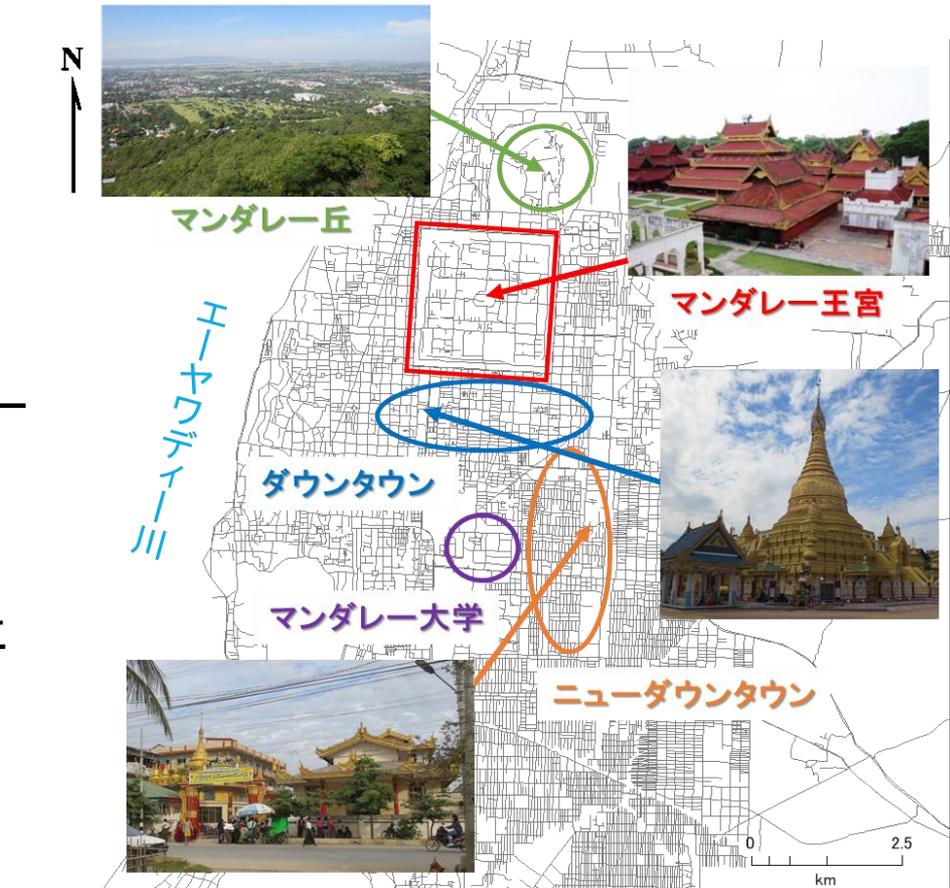


サガイン断層と主要都市

マンダレーでは未だ地盤特性が明らかになっていない

マンダレーについて

- 旧首都ヤンゴンに次ぐ第2の都市
(人口約120万人)
- 古くからエーヤワディー川を往来する
交通の要衝として栄えた
- イギリスにより併合されるまで、ミャンマー
で最後となる王朝の首都であった
(1860年～1885年)
- サガイン断層近傍に位置し、近い将来に
大地震の発生が予測されている
(古川(2011))



マンダレーでの地震動予測や被害予測を行うための
基礎情報として、地盤特性を把握する必要がある

■ ■ 研究の流れ

1. マンダレー市内全域で単点微動観測を実施する
2. 微動H/V（水平動/上下動）スペクトル比を算出する
3. 逆解析により各地点のS波速度構造モデルを推定する
4. サガイン断層を想定地震として地震動予測を行う
5. 想定地震によるマンダレーでの建物被害予測を行う

微動観測概要

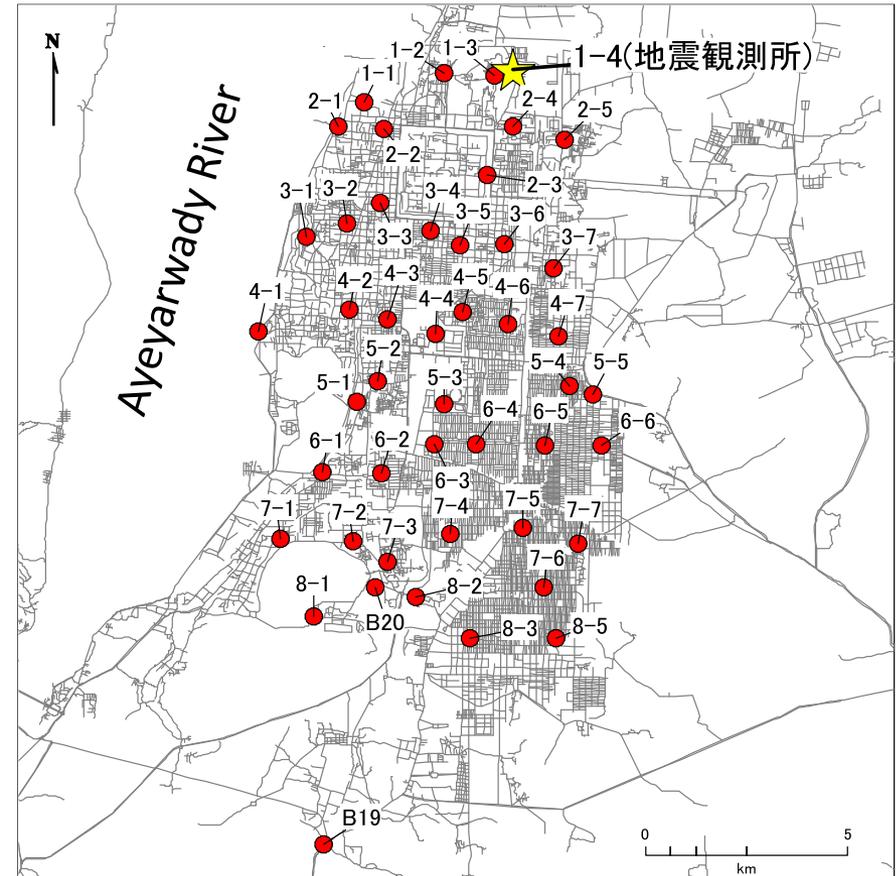
観測日 2018/11/11~14
マンダレー市内全域の計47地点で計測

仏教寺院や公共施設の敷地などの
自由地盤上で計測

1地点あたり300秒の計測

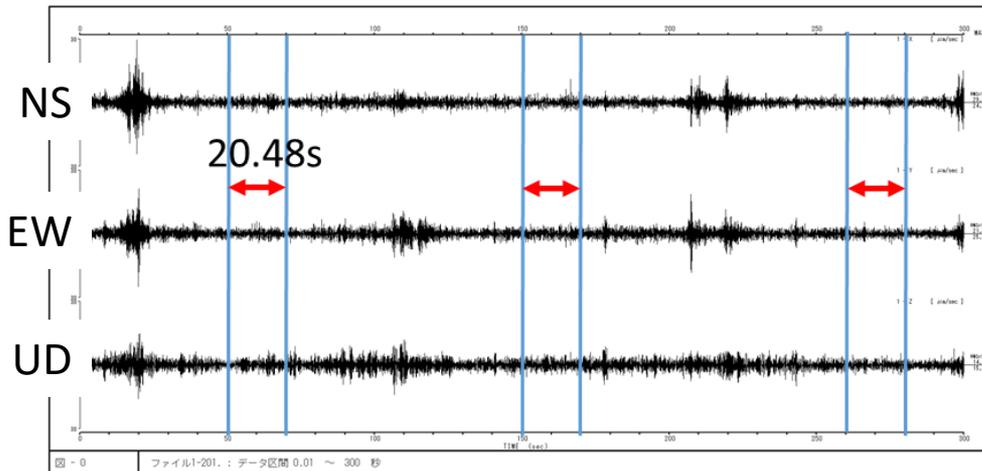


速度計
周期2秒まで



H/Vスペクトル比の算出方法

1. 計測した微動からノイズの少ない3箇所(20.48秒間)を切り出し、フーリエ解析により各成分のスペクトルを算出した
2. 水平動の合成には二乗和の平方根を利用した
3. 3つのH/Vスペクトル比の平均値を最終的な出力値とした



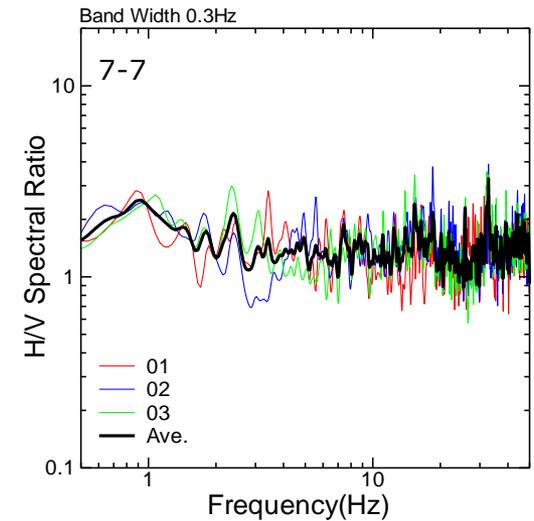
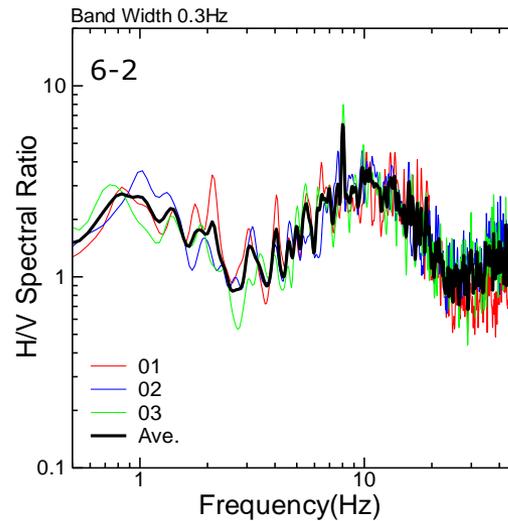
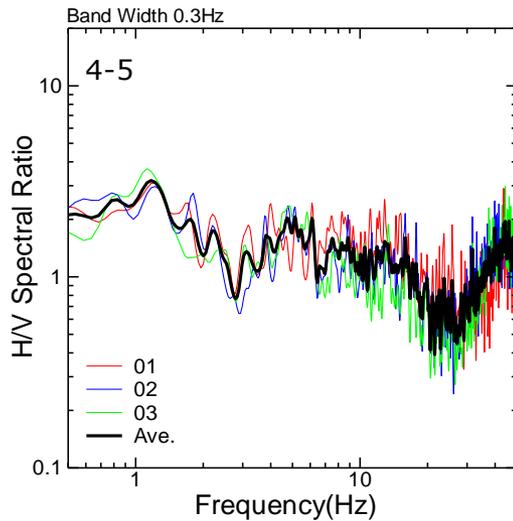
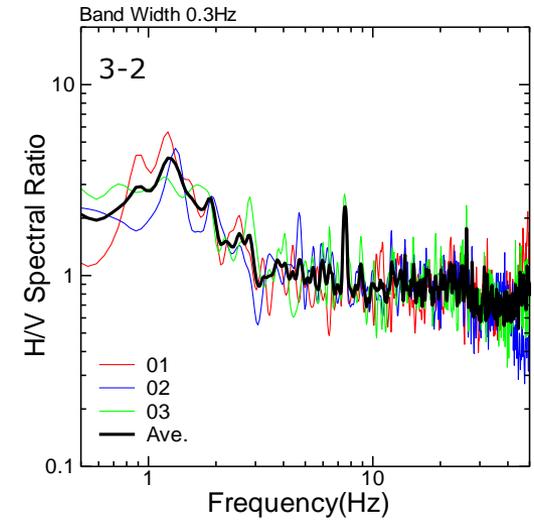
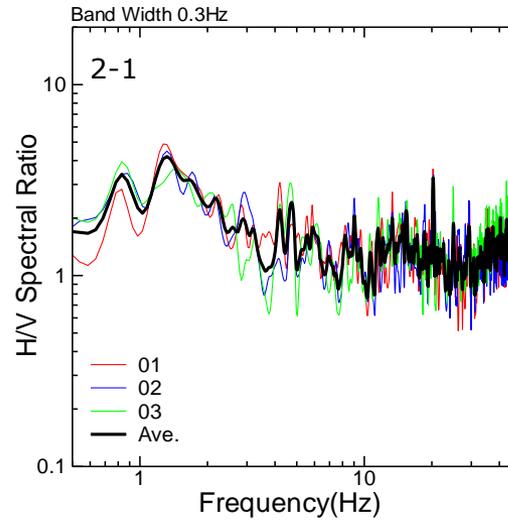
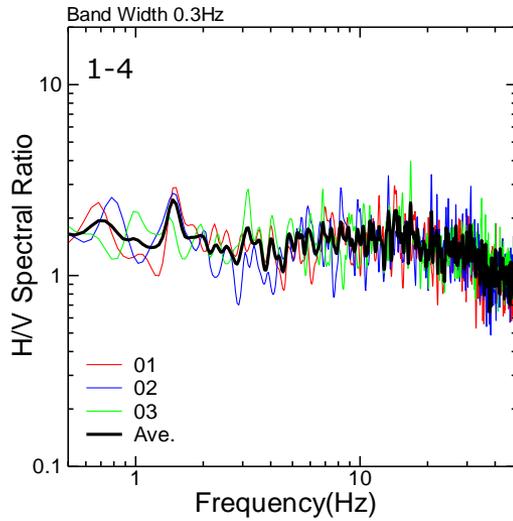
微動波形図

$$\text{HVR}(f) = \frac{\sqrt{FS_{NS}(f)^2 + FS_{EW}(f)^2}}{FS_{UD}(f)}$$

f: 周波数 FS: フーリエスペクトル振幅

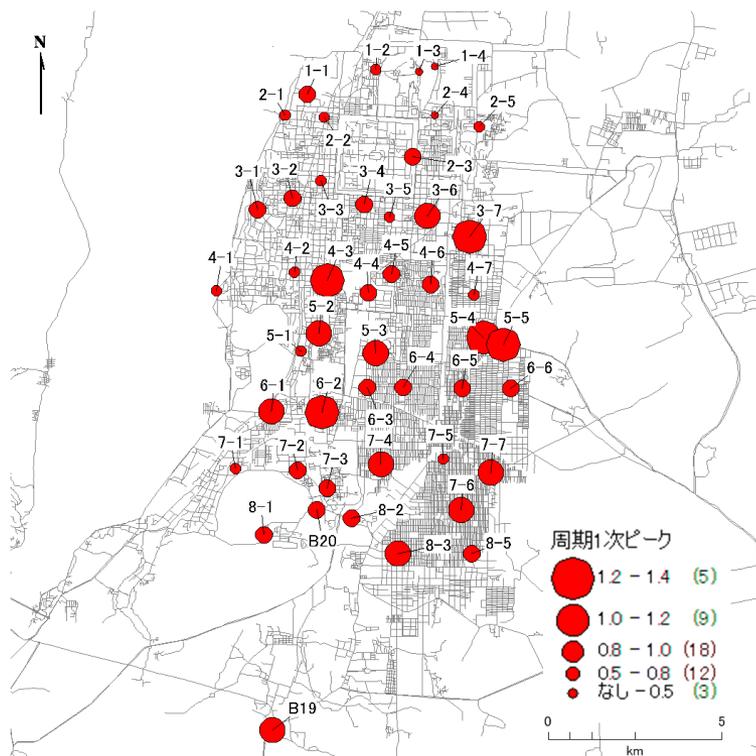
H/Vスペクトル比の算出式

■ ■ 算出した微動H/Vスペクトル比



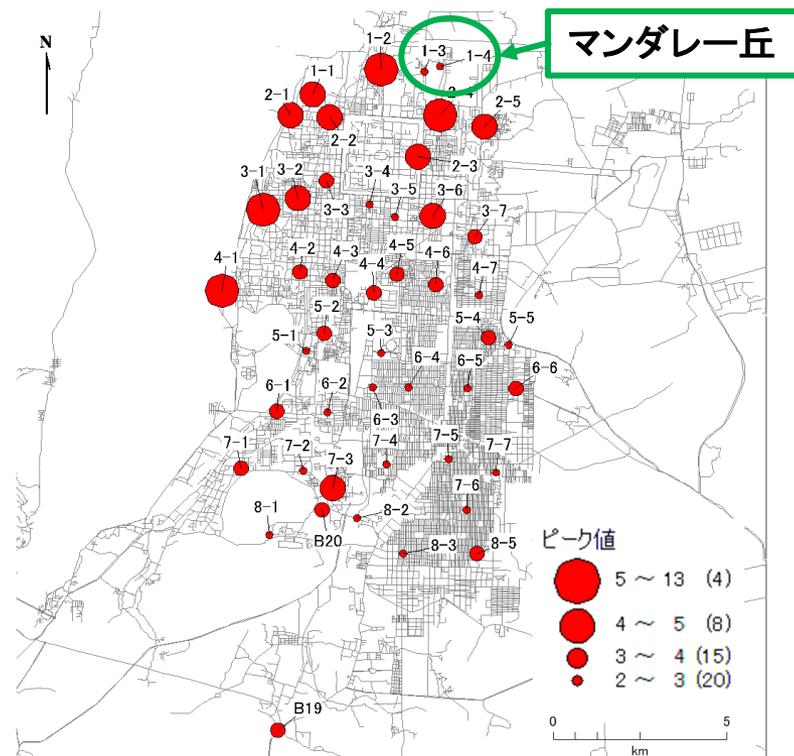
卓越周期とそのピーク値の分布

卓越周期の分布図



- ・周期0.8秒～1.0秒の間で卓越するものが多い。
- ・北部で卓越周期が短くなる傾向がある。

ピーク値の分布図



- ・北部でピーク値が大きくなる傾向がある。
- ・マンダレー丘周辺では明確なピークが見られず、硬質な地盤であることが予想される。

■ S波速度構造モデルの推定方法

拡散波動場理論に基づいて微動H/Vスペクトル比の逆解析により、S波速度構造モデルを推定

拡散波動場理論とは

- 近年微動H/Vスペクトル比の新しい解釈としてSanchez-Sesmaら(2011)により提案された理論
- エネルギーが等分配される拡散波動場を仮定
- 従来の表面波理論では影響を無視していた実体波の影響も考慮できる

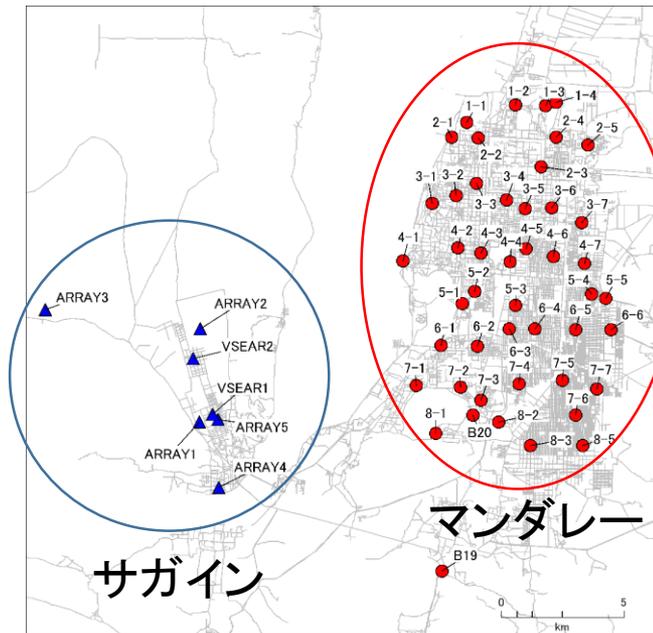
藤嶋ら(2018)によれば、拡散波動場理論による逆解析の精度を上げるためには事前の地盤情報が必要であるとしている



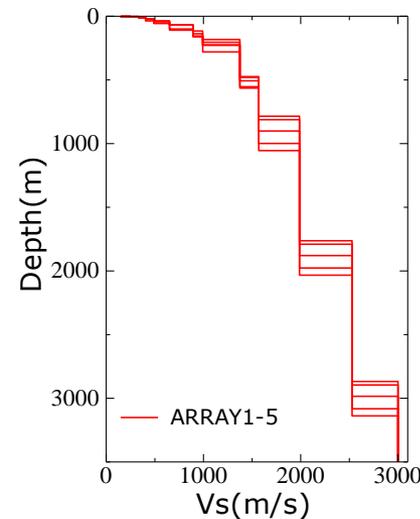
しかし、マンダレーでは地盤の情報がほとんどない

■ 既往の地盤の理論値による検討

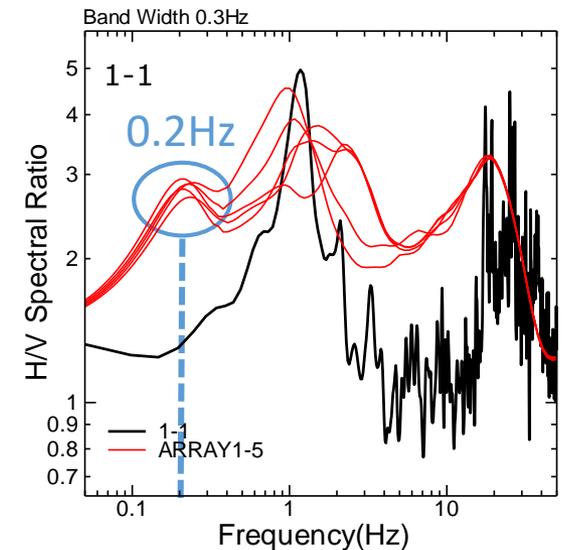
サガインではAungら(2018)により微動アレイ探査が行われており、 $V_s=3000\text{m/s}$ 、深さ3000mまでのS波速度構造が推定されている。



サガインでの微動アレイ探査地点



S波速度構造モデル



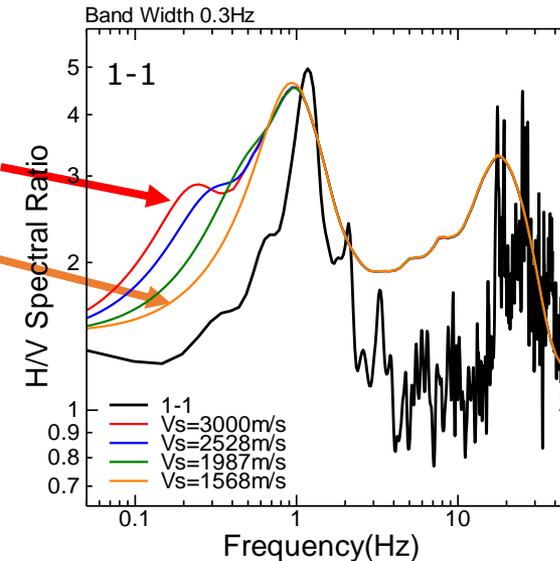
H/Vスペクトル比の比較

サガインでの理論H/Vスペクトル比にはマンダレーでの微動H/Vスペクトル比には見られないピークが0.2Hz付近に現れている。

■ ■ 既往の地盤の理論値による検討

サガインでのS波速度構造モデル

Layers	Thickness(m)	Depth(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	Gam(g/cm ³)
1	1.5	1.5	149	935	1.66
2	1.5	3	247	1139	1.73
3	10	13	332	1312	1.79
4	23	36	404	1457	1.83
5	21	57	489	1625	1.87
6	52	109	651	1939	1.94
7	48	157	893	2388	2.03
8	67	224	992	2566	2.07
9	256	480	1374	3216	2.19
10	332	812	1568	3526	2.24
11	978	1790	1987	4145	2.34
12	1105	2895	2528	4846	2.47
13			3000	5368	2.56



深い層から1層ずつ取り除いて理論値を計算したところ、 $V_s=1600\text{m/s}$ 、深さ800m程度の層で0.2Hzのピークが見られなくなった。

0.2Hz付近のスペクトル特性はこの層よりも深い地盤構造を反映しているものと考えられる。

要因

使用した微動計は2秒計であることから、深い地盤の影響を計測するのは困難であったと推測される。

マンダレーで観測した微動H/Vスペクトル比は $V_s=1600\text{m/s}$ 、深さ800m程度までの地盤構造を反映したものである。

■ ■ 逆解析の探索範囲

- ・Aungら(2018)によるサガインでのS波速度構造モデルを参考に逆解析の探索範囲を設定
- ・ V_s =約1600m/sの層を基盤として、それ以浅のS波速度構造を推定

逆解析探索範囲

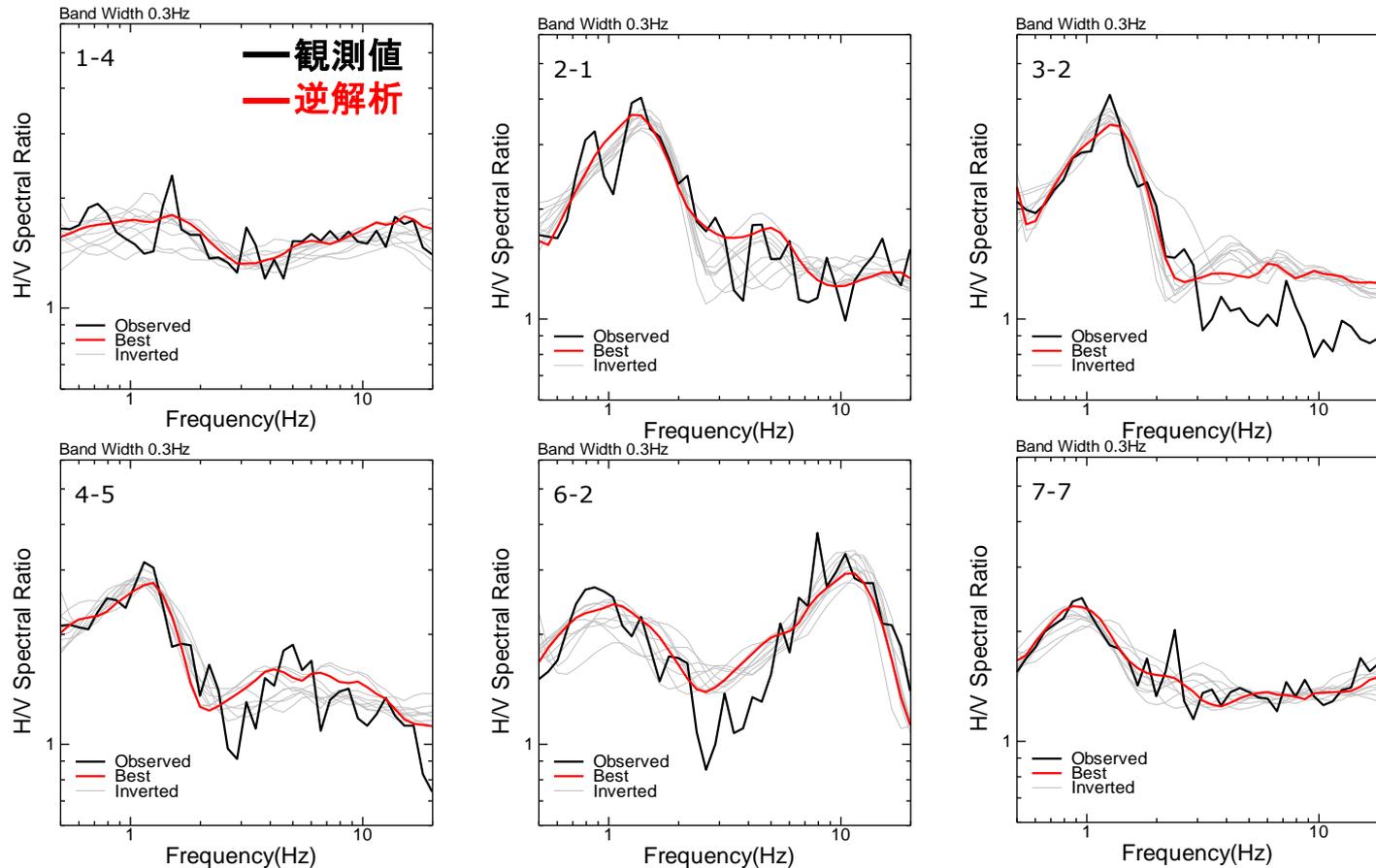
	V_s (m/s)	層厚(m)
1層目	50~200	0~10
2層目	200~400	0~50
3層目	300~600	0~200
4層目	500~800	0~400
5層目	700~900	0~400
6層目	900~1500	0~500
7層目	1568	-

解析条件

- ・解析ソフト HV-Inv ver.2.4
(García-Jerez et al.2016)
- ・解析手法 モンテカルロサンプリング
- ・試行回数 10回

■ ■ 逆解析結果(H/Vスペクトル比)

H/Vスペクトル比の比較

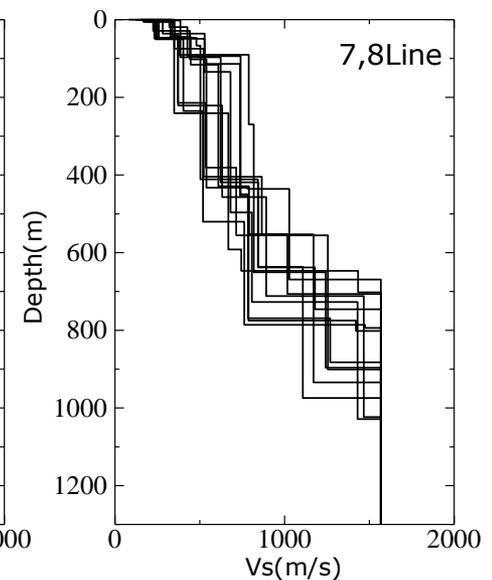
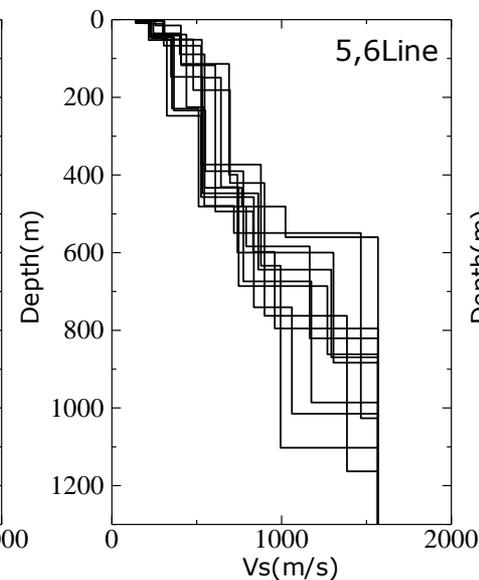
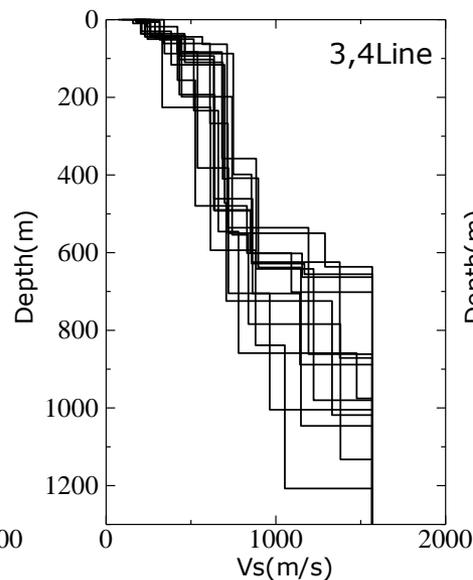
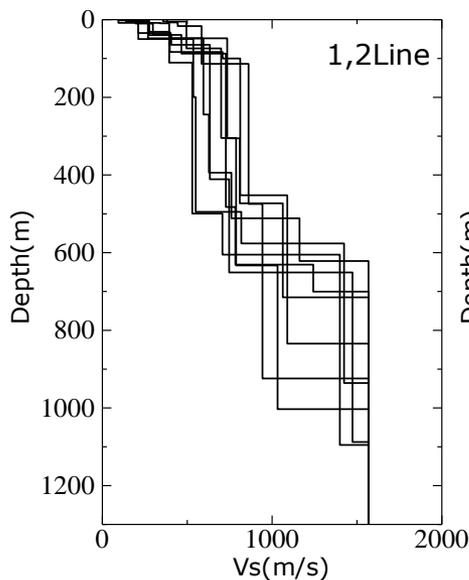


逆解析により算出したH/Vスペクトル比(赤線)は観測値(黒線)とよく一致しており、観測値を説明できるモデルが得られた。

■ ■ 逆解析結果(S波速度構造モデル)

全地点のS波速度構造モデル

北側

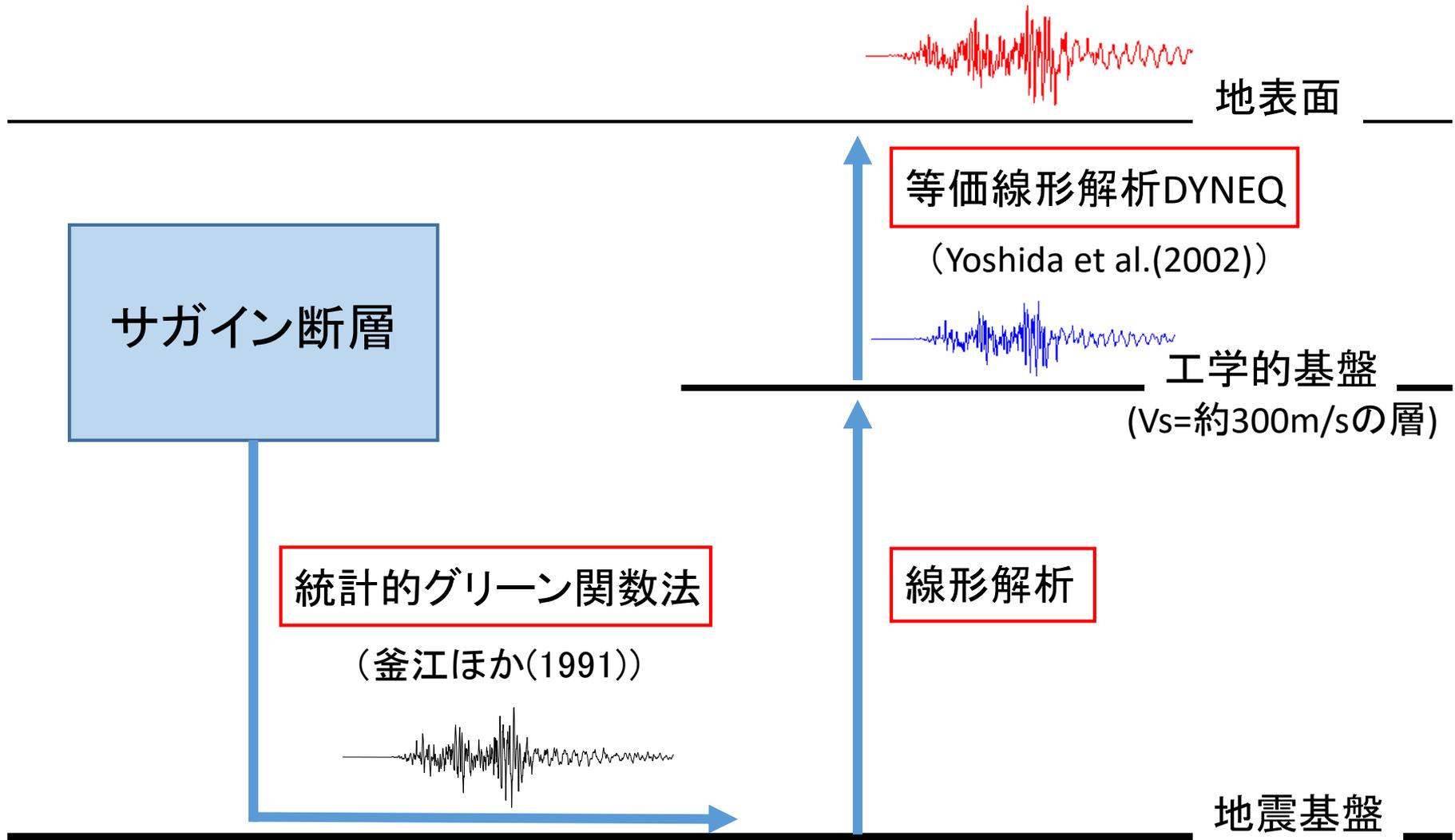


南側

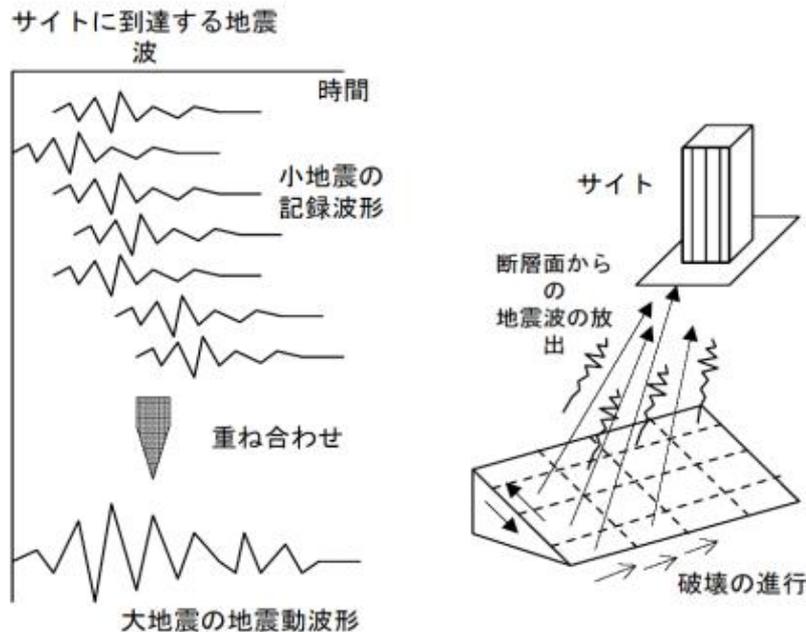
表層のVsは100~200m/s

基盤までの深さは600~1200m

■ サガイン断層を想定地震とした地震応答解析



- ①大地震の断層を複数の小地震からなる要素地震に分離
- ②そこから発生・伝播する地震動波形を震源特性や伝播特性を考慮して人工的に作成
- ③それら小地震動波形を合成することで大地震による地震動波形を推定



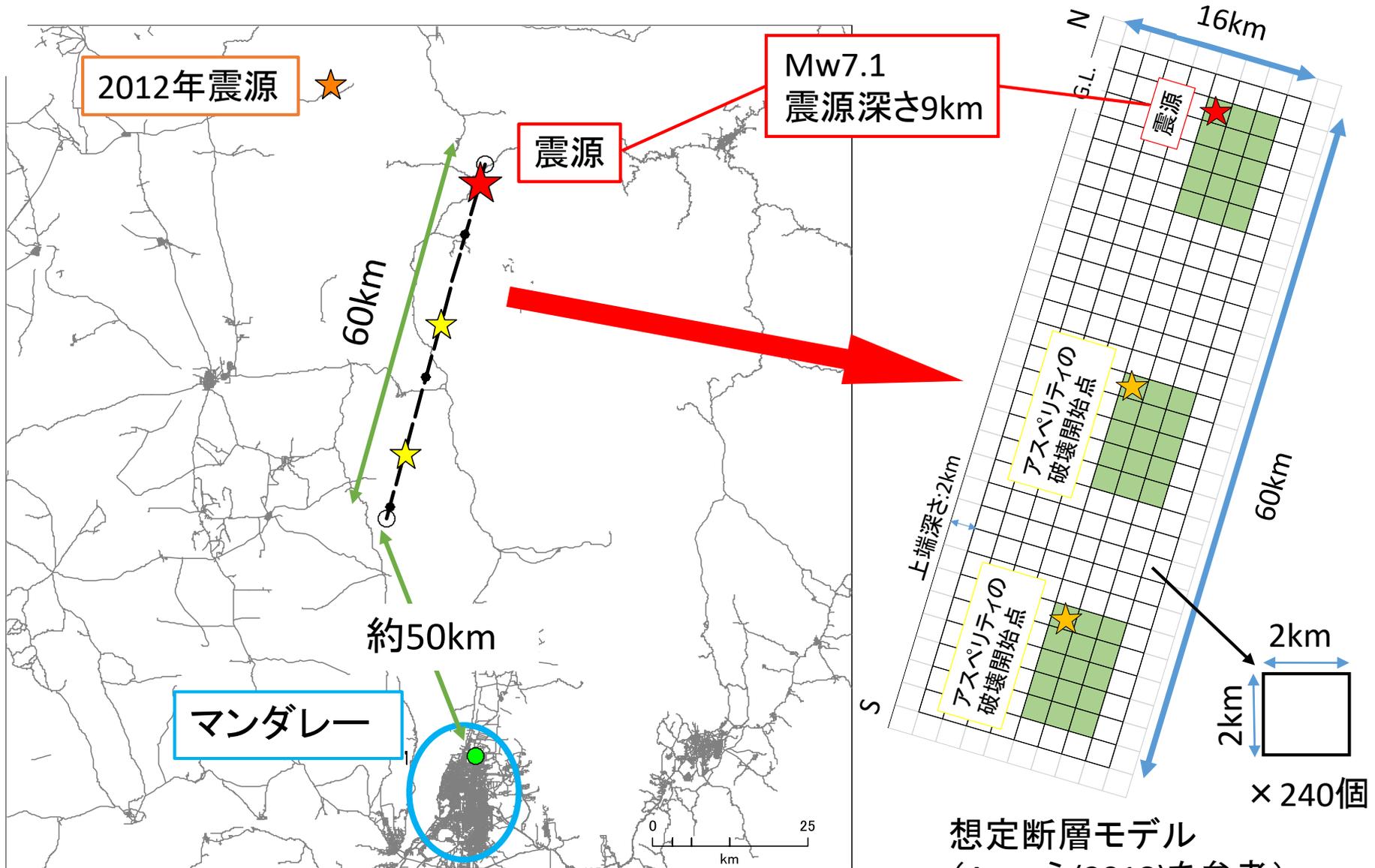
人工的に小地震を作成するため、
当該サイトでの地震記録を必要としない



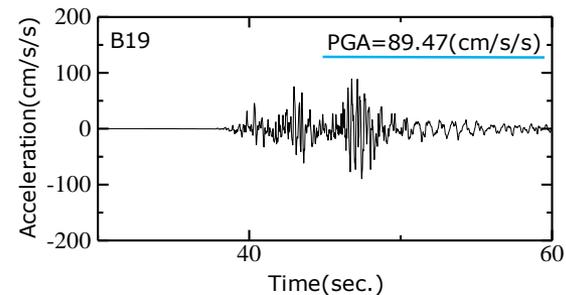
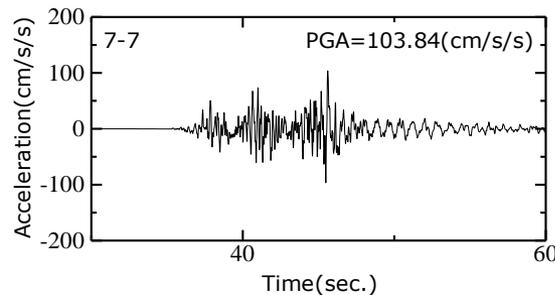
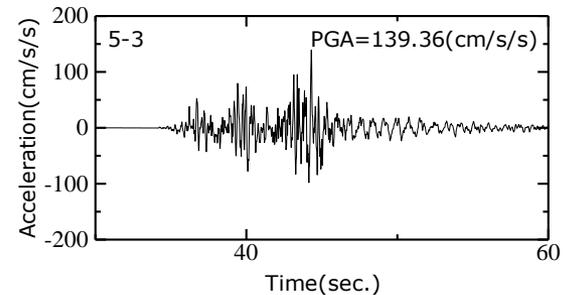
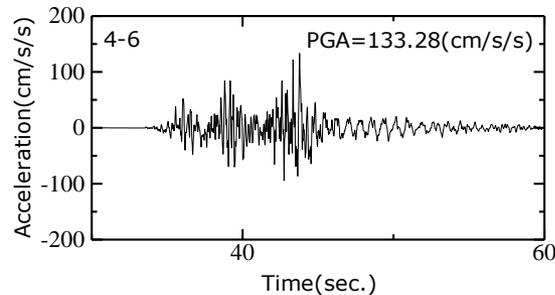
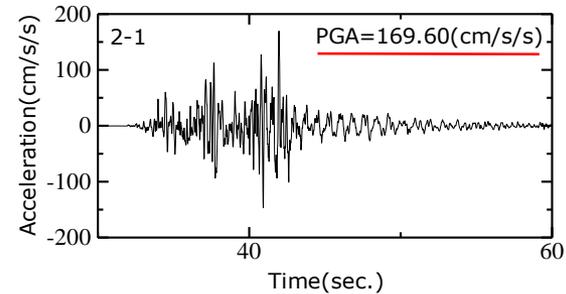
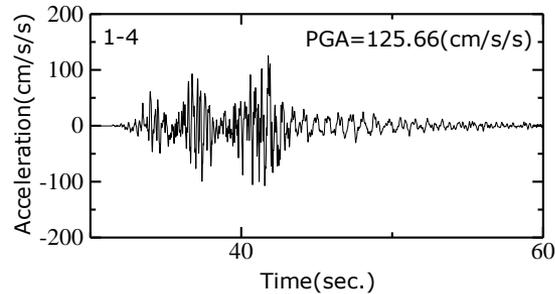
適切な地震観測記録が得られていない
マンダレーでも適用可能

統計的グリーン関数法概念図
(内閣府防災情報)

■ サガイン断層による想定断層モデル



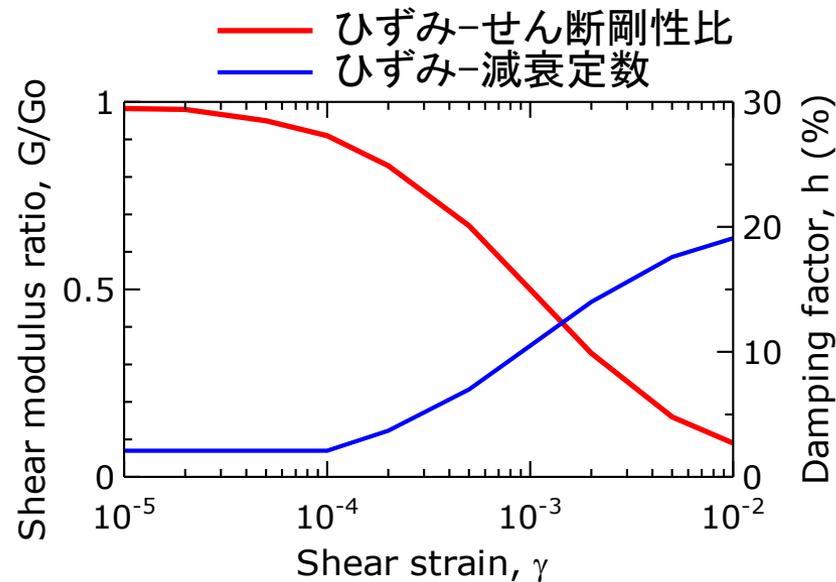
■ ■ 推定した地震基盤面での地震動波形



最大加速度PGAは概ね100~200cm/s/s程度となった。

■ ■ 等価線形解析DYNEQ

- ・等価線形解析手法に基づく一次元地盤の地震応答解析プログラム。
- ・散乱の減衰と応力-ひずみ関係の非線形挙動の両方を考慮できる。
- ・周波数に依存した材料特性を考慮できる。

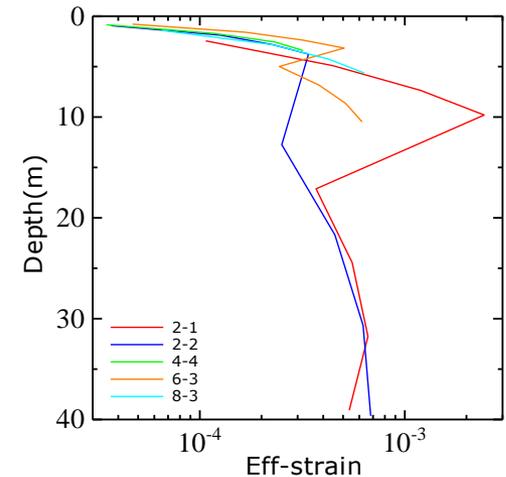
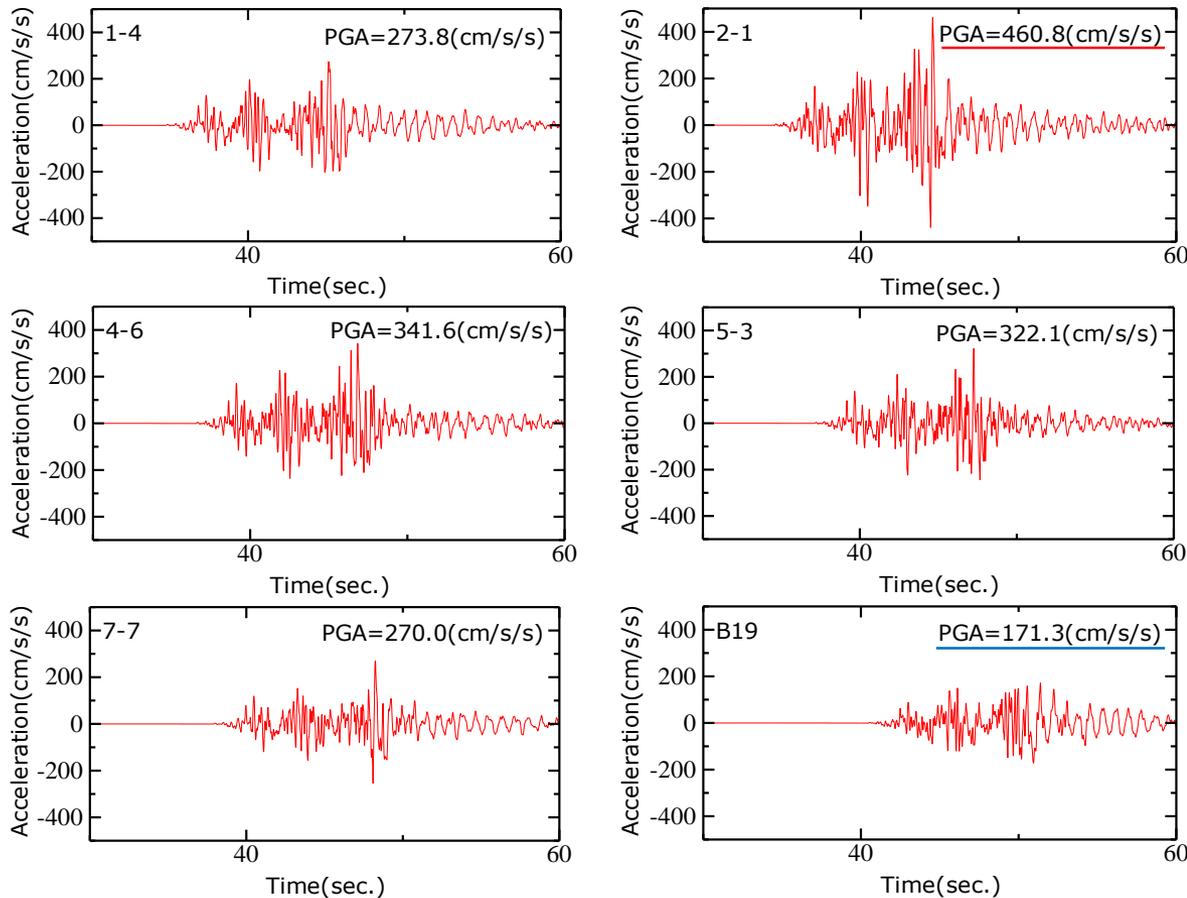


動的変形特性(古山田ら(2003))

土質はすべて砂地盤と仮定した。



DYNEQによる地表面での地震動波形



PGAが大きい5地点でのひずみレベル

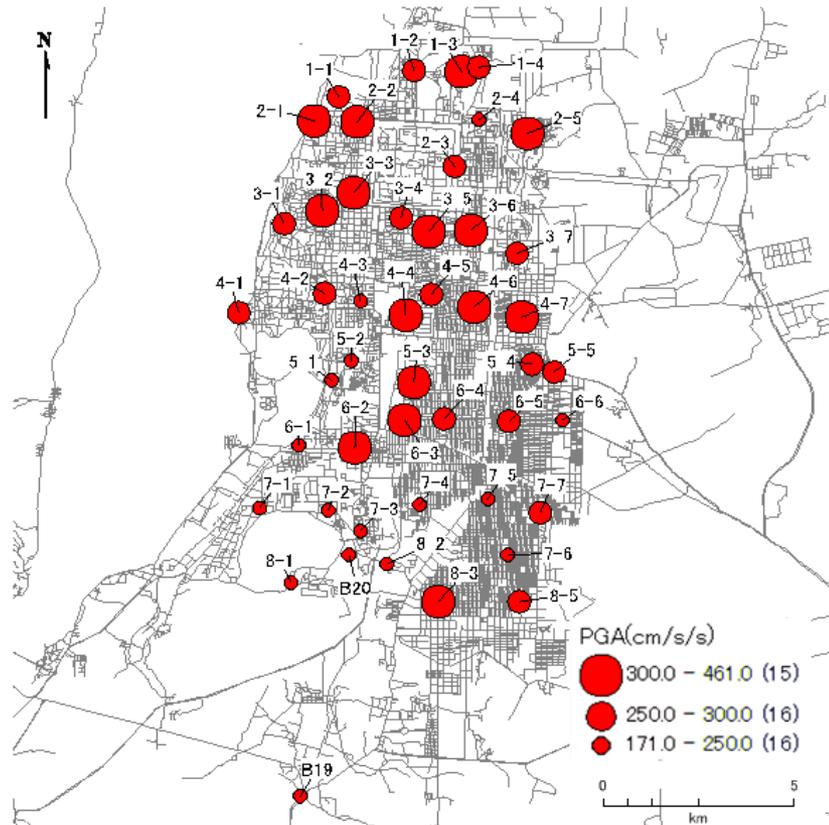
地点2-1ではひずみレベルが最大で 10^{-3} 程度で非線形の影響がみられたが、ほとんどの地点では最大でも 10^{-4} 程度となり、非線形の影響は小さかった。



推定された最大加速度、最大速度の分布

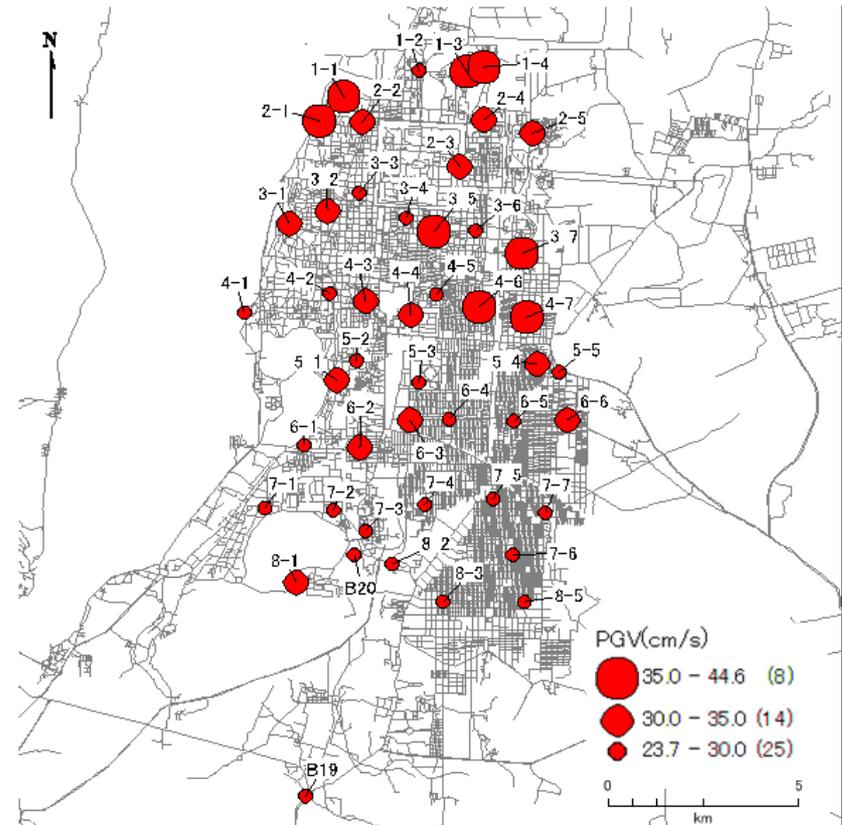
23

推定された最大加速度PGAの分布



PGA=170cm/s/s~460cm/s/s

推定された最大速度PGVの分布



PGV=25cm/s~45cm/s

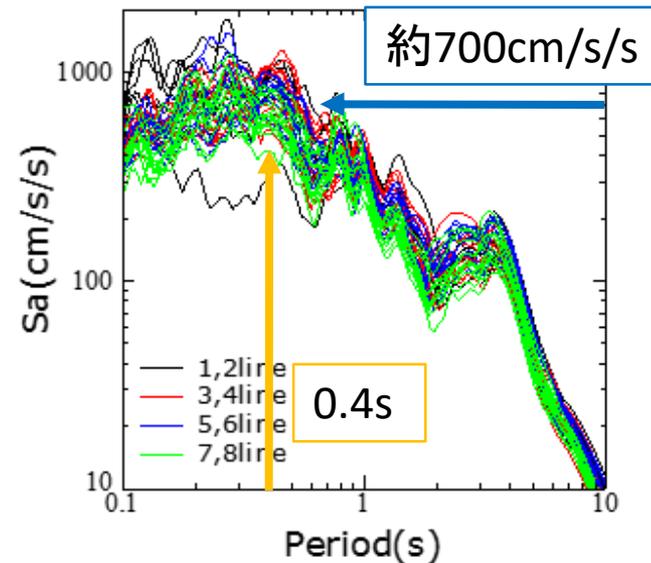
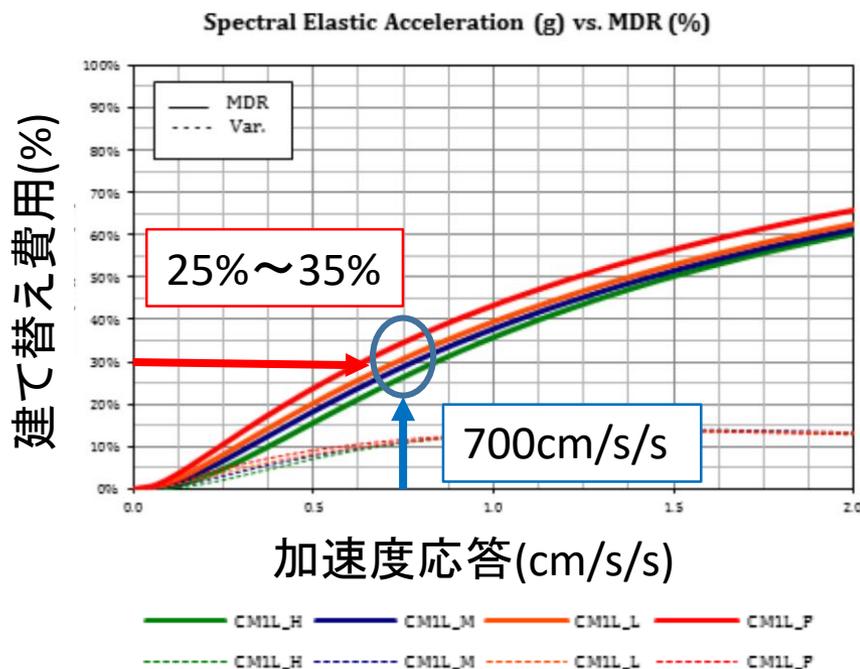
断層に近い北部の方が大きくなる傾向が見られた。

■ ■ 建物被害関数による地震被害予測

低層組積造建物の物性値 (UNISDR(2013))

	耐震設計レベル	高さ(m)	階数	固有周期(s)
CM1L_H	HIGH	9.14	3	0.4
CM1L_M	MEDEIUM	9.14	3	0.4
CM1L_L	LOW	9.14	3	0.4
CM1L_P	POOR	9.14	3	0.4

地震による建物被害関数 (UNISDR(2013))



想定地震による加速度応答スペクトル

想定地震により25~35%程度の建物に被害が発生することが予測された

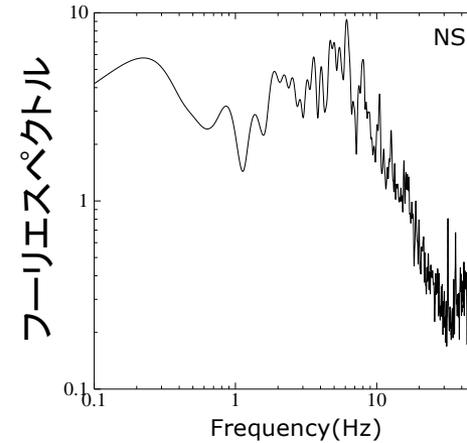
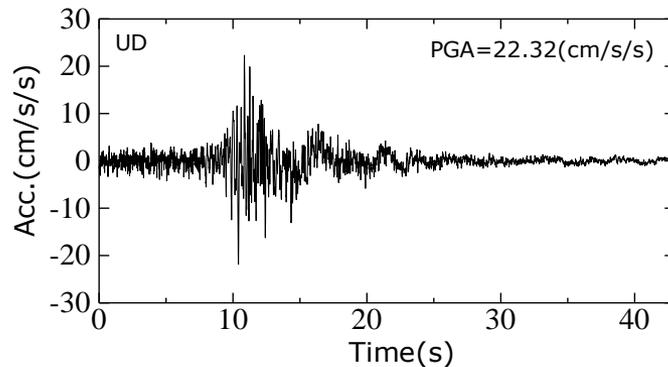
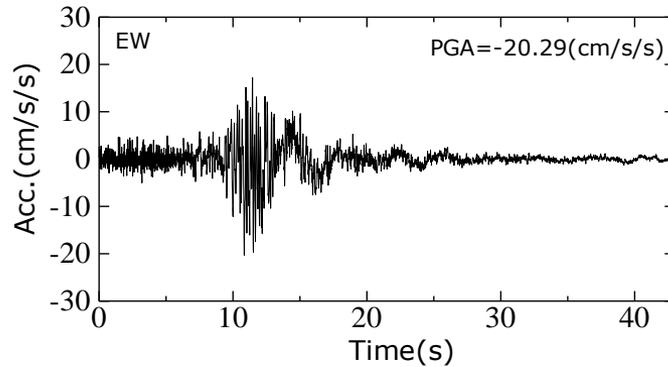
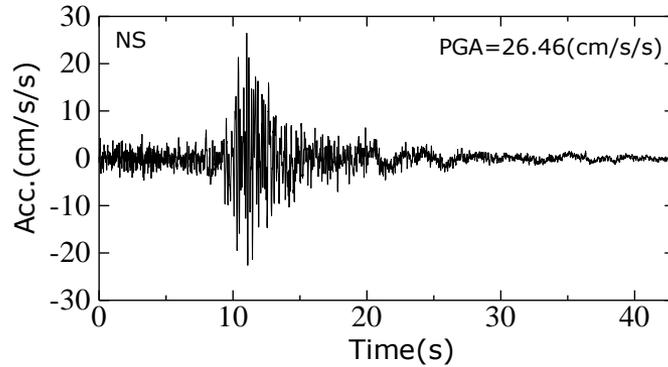
■ ■ 結論

1. ミャンマー・マンダレーを対象として、計47地点の微動データを用いて各地点でのH/Vスペクトル比を算出した。
2. 拡散波動場理論に基づいて逆解析を行い、観測値を説明できるS波速度構造モデルを推定した。
3. 統計的グリーン関数法、等価線形解析DYNEQなどを用いてサガイン断層を想定地震としたマンダレー各地の地表面での地震動を推定した。
4. 想定地震によるマンダレーでの最大加速度は170cm/s/sから460cm/s/s程度となることを推定した。
5. 建物被害関数を用いて想定地震による被害予測を行ったところ、低層組積造建物の場合、30%程度の建物被害が発生することを予測した。



2012年地震 地震動波形(M6.8)

27

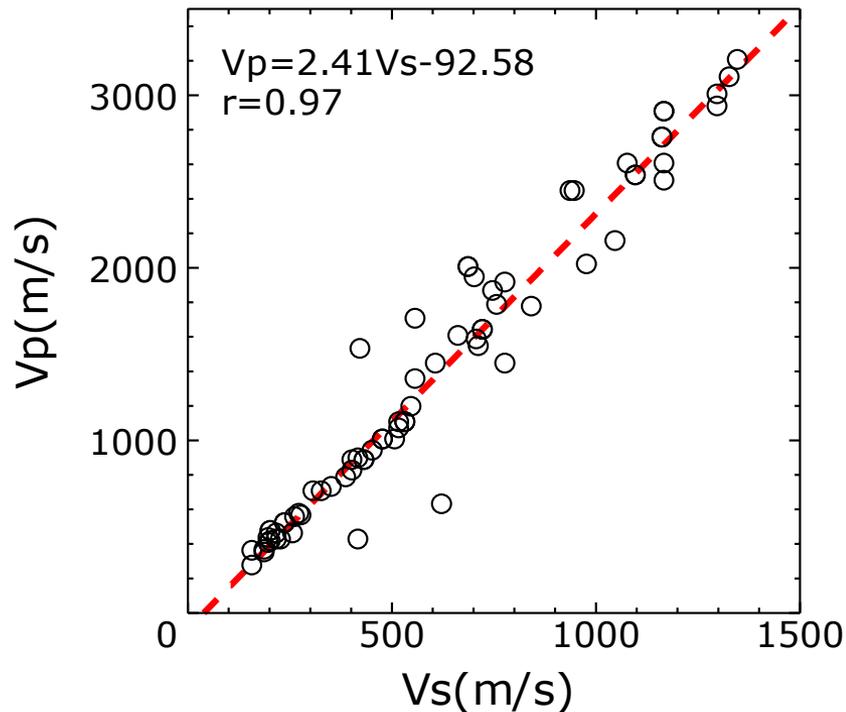


フーリエスペクトル(NS)

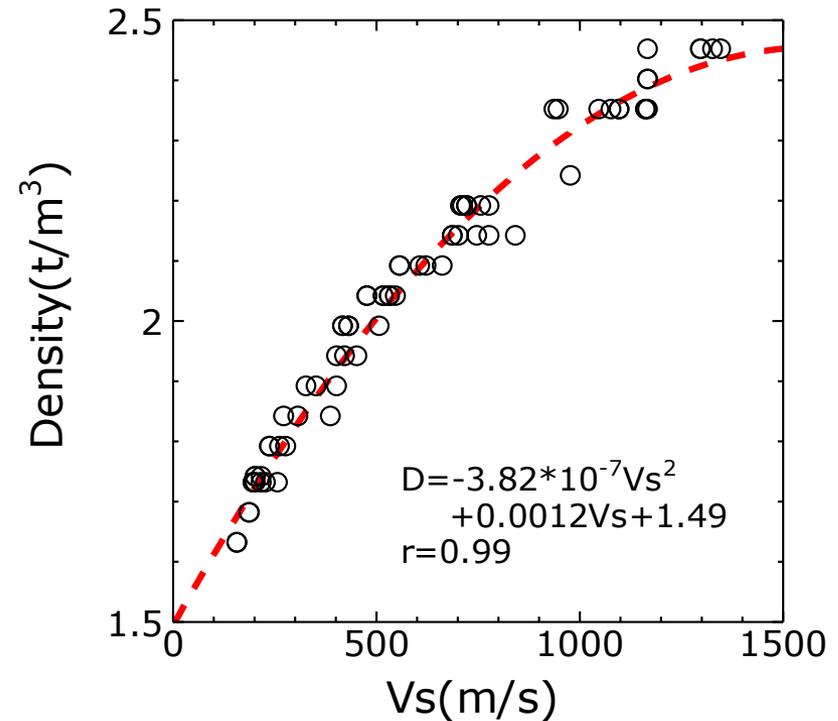




Bagan, Myanmar



S波速度とP波速度

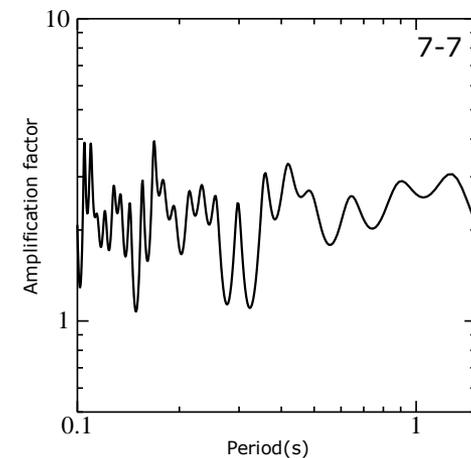
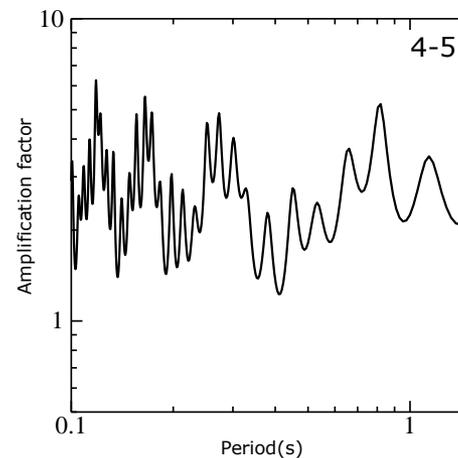
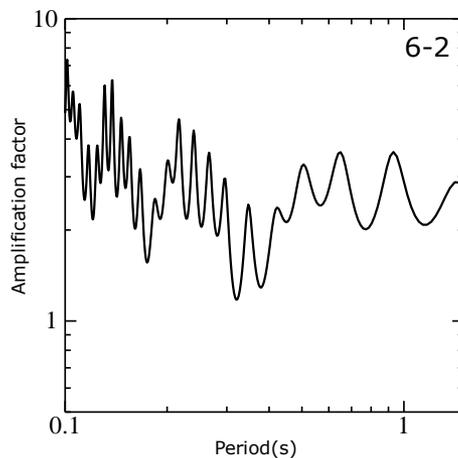
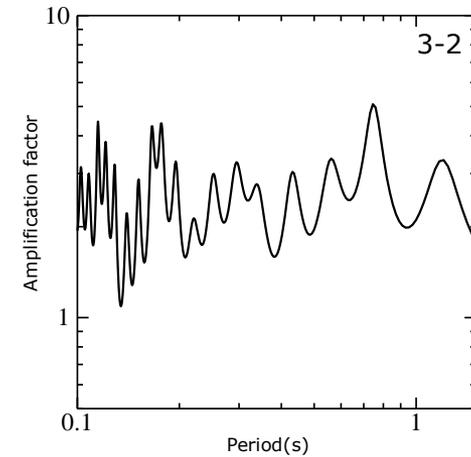
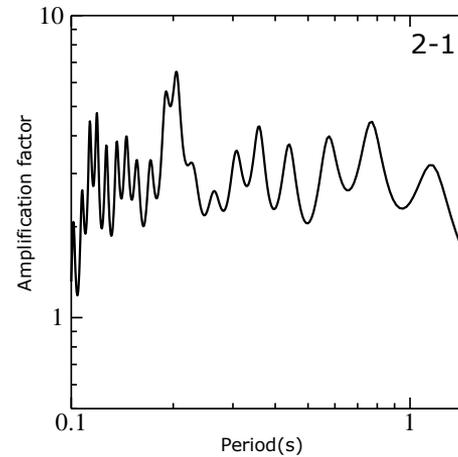
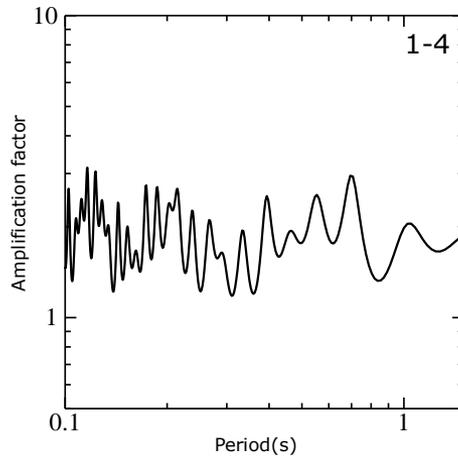


S波速度と密度の関係

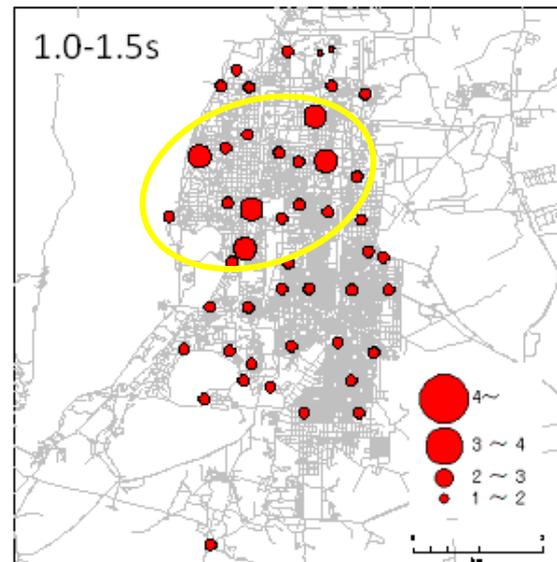
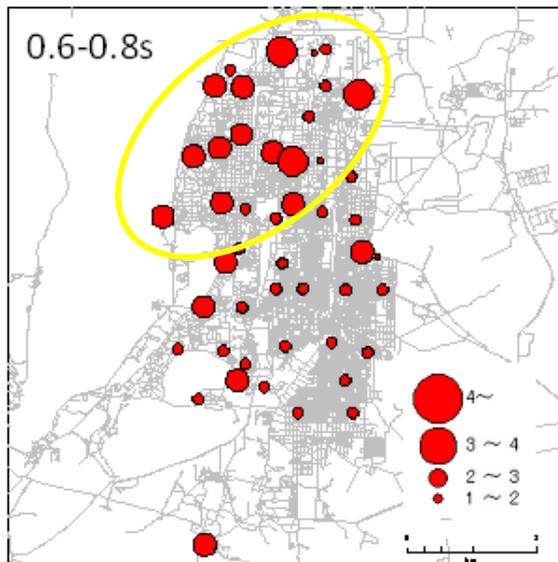
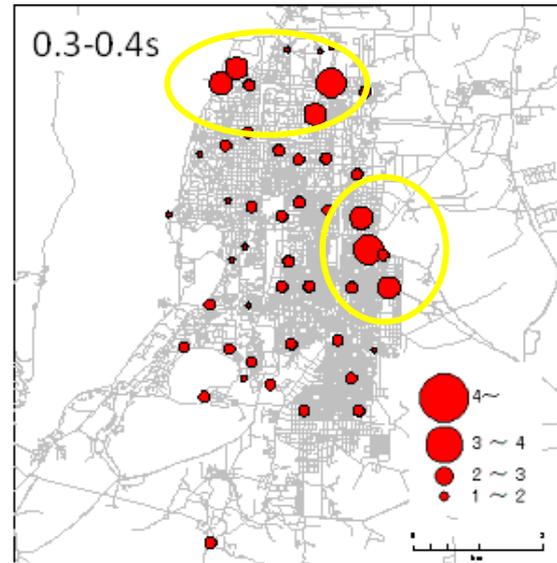
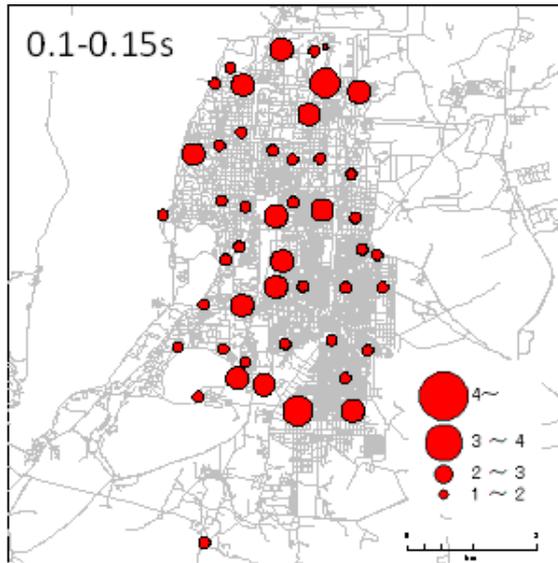
(Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology,
University Skopje(1983))

■ ■ 推定されたS波速度構造モデルによる理論増幅率 29

減衰を表すQ値： $Q = V_s/15 \cdot f^{1.0}$ (三浦ほか(2014))



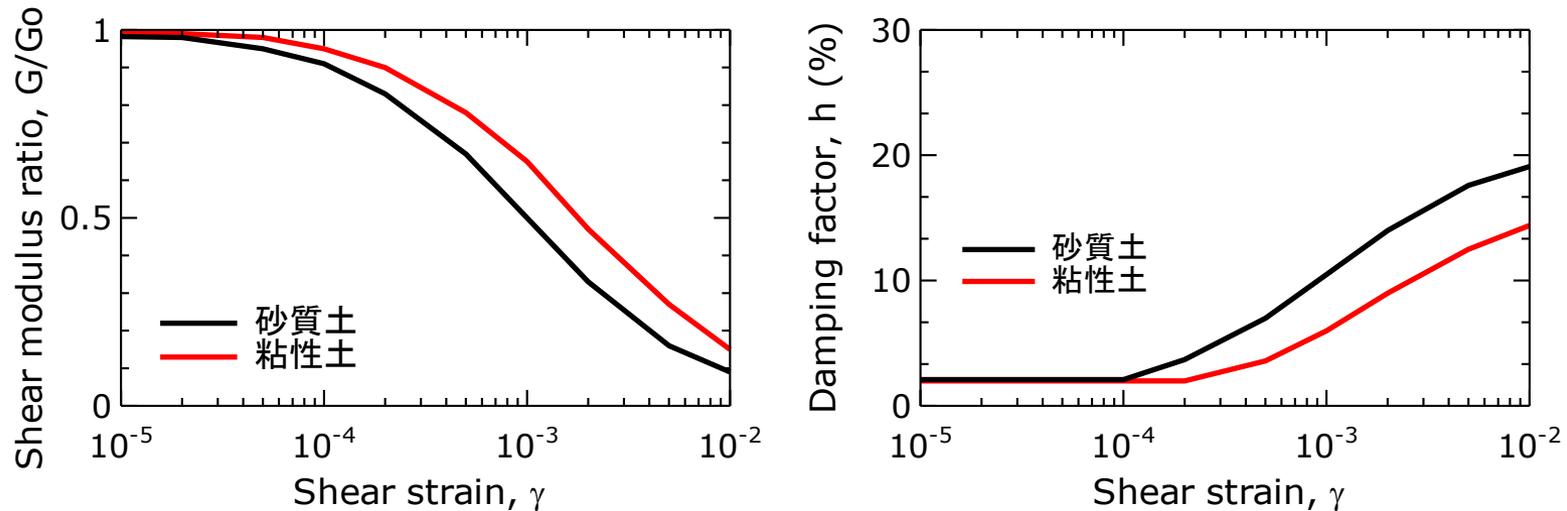
■ 周期ごとの地盤増幅率の分布



- ・周期0.1～0.15秒
地域的な偏りなし
- ・その他の周期帯
地域的な偏りあり
- ・周期0.6～0.8秒
増幅率が大きくなる
地点が最も多い
- ・全体的に北部で増幅
率が大きくなる傾向

■ ■ 減衰・動的変形特性について

古山田ら(2003)による動的変形特性



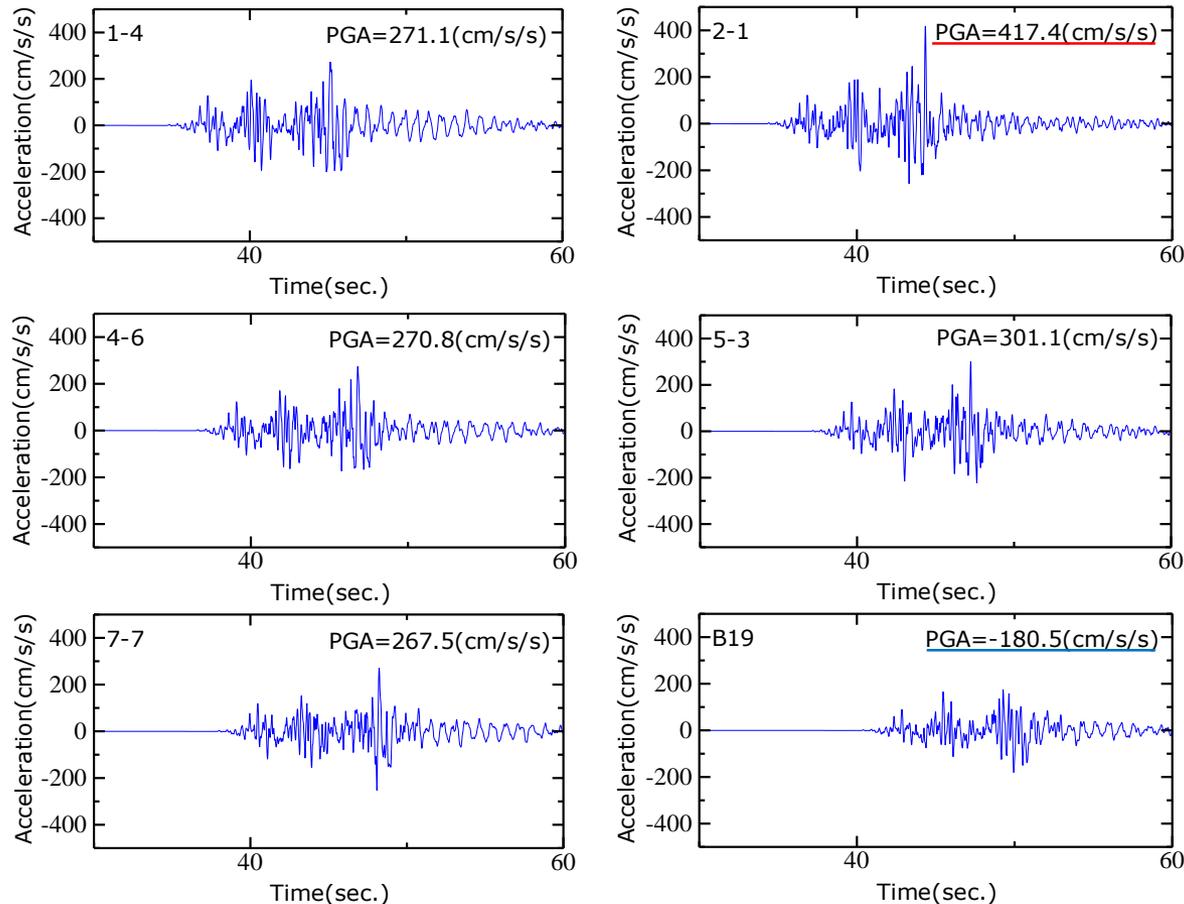
砂地盤と仮定した理由

マンダレーでは地盤調査が未だ行われていないため、バガンでのユネスコによる屈折法探査結果(下記文献)を参考として砂地盤と仮定した。

参考文献: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University Skopje(1983)



線形解析による工学的基盤面上での地震動の推定



線形解析により地震基盤から工学的基盤となる $V_s=300\text{m/s}$ 程度までの層の地震動波形を求めた。

減衰を表すQ値： $Q = V_s/10$

モンテカルロサンプリング

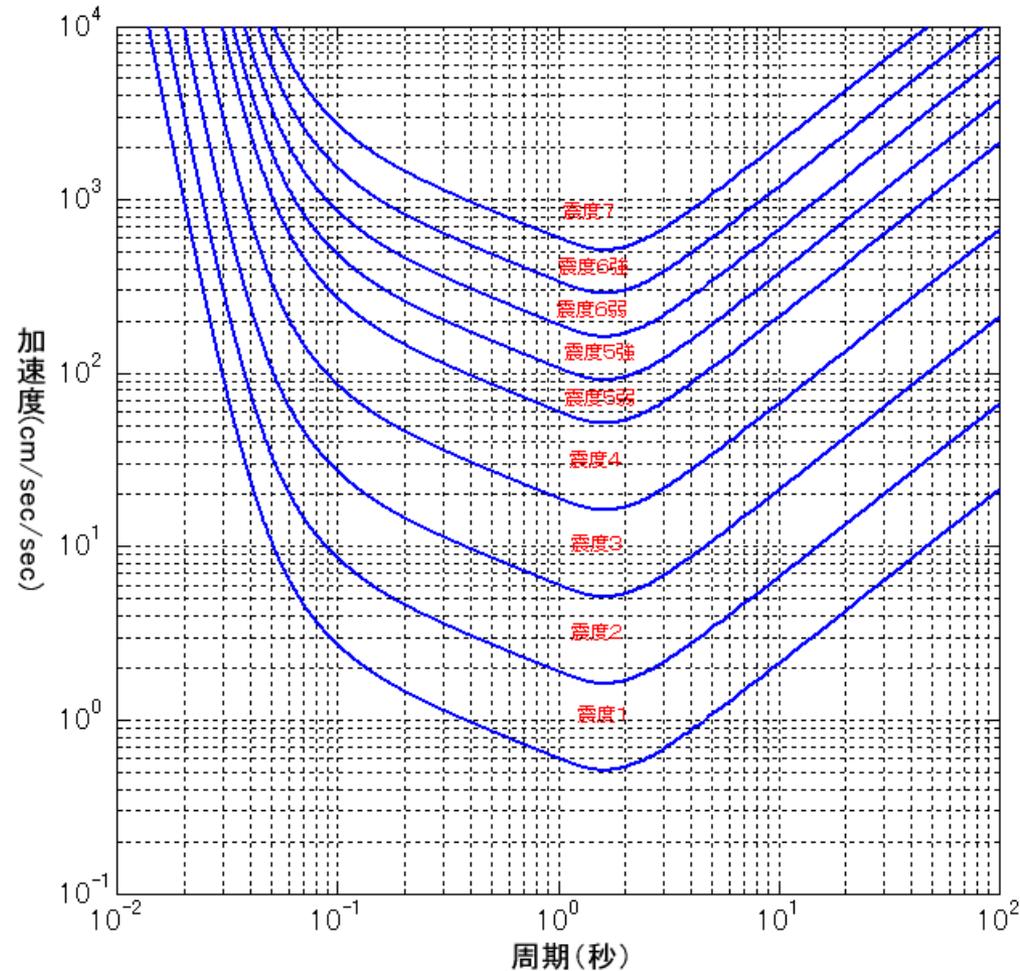
モンテカルロ法を用いて目的とする確率分布からサンプリングを行う

確率分布の理論式を知らなくても使用可能

モンテカルロ法

- ・乱数を用いる数値計算法の総称
- ・カジノの町モンテカルロに由来
- ・「ランダムなパラメータの組み合わせの生成」「結果の評価」を繰り返す
- ・得られた結果は必ずしも正しい答えではないが、試行回数を増やすことで精度が上がる→本研究の試行回数は500回

■ 周期および加速度と震度(理論値)の関係



周期および加速度と震度(理論値)の関係
(均一な周期の振動が数秒間継続した場合)

国土交通省
気象庁

アスペリティ

アスペリティモデルとは、震源断層面上での不均質性を表す概念モデルのひとつ。

プレート境界や活断層などの断層面上で、通常は強く固着していて、ある時に急激にずれて(すべって)地震波を出す領域のうち、周囲に比べて特にすべり量が大きい領域のことを、アスペリティという。

アスペリティでは、とくに強い地震波を出すとされ、強震動の研究などでも重要視されている。

■ ■ サガイン断層の断層パラメータ

巨視的 パラメータ	地震モーメント M_0 (dyne-cm)	5.13E+26
	マグニチュード M_w	7.1
	震源の緯度	22.3656
	震源の経度	95.9733
	断層の上端深さ(km)	2
	震源深さ(km)	3
	活断層長さ L (km)	60
	活断層幅 W (km)	16
	面積 S (km^2)	960
	走向 θ	N16.3E
	傾斜角 δ	90
	すべり角度 γ	180
	応力降下量 $\Delta\sigma$ (Mpa)	4.2
	平均すべり量 D (m)	2.3
	剛性率 μ (N/m^2)	2.30E+10
	密度 ρ (kg/m^3)	2560
	S波速度 β (km/s)	3
	破壊伝播速度 V_r (km/s)	2.2
	短周期レベル A ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)	1.97E+19
	の全 生強 成震 域動	地震モーメント
マグニチュード		6.77
実効応力(MPa)		2.34
全面積		180
平均すべり量		4.6

ア ス ペ リ テ ィ ① ② ③	① ② ③ 共通	地震モーメント	6.08E+18	
		マグニチュード	6.46	
		断層長さ	10	
		断層幅	6	
		面積	60	
		等価半径	4.371	
		立ち上がり時間(背景領域)	0.931	
		平均すべり量	4.4	
		要素断層の長さ	2	
		要素断層の幅	2	
		立ち上がり時間	0.897	
		立ち上がり時間の分割数	4	
		長さ方向の要素番号(破壊開始点位置)	5	
		幅方向の要素番号(破壊開始点位置)	1	
	①	① ② ③	実効応力	23.4
			緯度(要素地震の震源位置)	22.86035
			経度(要素地震の震源位置)	96.11865
			緯度(大地震の断層モデル基準点)	22.78224
			経度(大地震の断層モデル基準点)	96.0957
			実効応力	23.4
②	②	緯度(要素地震の震源位置)	22.65204	
		経度(要素地震の震源位置)	96.05745	
		緯度(大地震の断層モデル基準点)	22.57392	
		経度(大地震の断層モデル基準点)	96.0345	
③	③	実効応力	23.4	
		緯度(要素地震の震源位置)	22.46109	
		経度(要素地震の震源位置)	96.00135	
		緯度(大地震の断層モデル基準点)	22.38297	
		経度(大地震の断層モデル基準点)	95.9784	

■ ■ サガイン断層の断層パラメータ

背景領域	地震モーメント	3.30E+19
	マグニチュード	6.94E+00
	断層長さ	60
	断層幅	16
	面積	780
	平均すべり量	1.8
	等価半径	17.48
	実効応力	3.1
	マグニチュード(要素地震)	4.566
	緯度(要素地震の震源位置)	22.78224
	経度(要素地震の震源位置)	96.0957
	立ち上がり時間(背景領域)	0.931
	緯度(大地震の断層モデル基準点)	22.3656
	経度(大地震の断層モデル基準点)	98.9733
	要素断層の長さ	2
	要素断層の幅	2
	立ち上がり時間	0.072
	立ち上がり時間の分割数	16
	長さ方向の要素番号(破壊開始点位置)	5
	幅方向の要素番号(破壊開始点位置)	29
その他	イベント数	4
	サイト数	1
	出力データ数	9000
	初期乱数値(乱数位相)	4123
	データ点数	8192
	時間間隔	0.01
	FS	2
	PRTITN	0.71
	乱数初期値(放射係数)	127
	モンテカルロの繰り返し数	1000
	KRC	4
	KRM	4
	CRDS	0.62
	CRDM	0.62
	Fmax	13.5
QV	204	
ALF	0.65	
緯度(観測点)	21.8981	
経度(観測点)	95.97226	