

Fused lasso による物理検層データの 地盤構造モデル化

栗田 哲史¹・新垣 芳一²・吉見 雅行³

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: kurita@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: shingaki@tepsco.co.jp

³正会員 産業技術総合研究所 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 つくば中央第七)
E-mail: yoshimi.m@aist.go.jp

サスペンション PS 検層や密度検層によって得られたデータを用いて表層地盤の応答解析を行う時、数値解析用の地盤構造モデルを構築することが一般的である。このモデル化は、通常、経験的な知識に基づいて行われることが多いため、任意性の介在する余地がある。そこで、本研究ではできるだけ客観的な方法論に従ってモデル化するアプローチについて追及することを試みた。着目した手法はスパースモデリングの一種の fused lasso である。Fused lasso は隣接する説明変数の係数を同一化するように正則化項を加えた最適化手法である。本論では、熊本地震の被災地である益城町で実施した物理検層データに fused lasso を適用して地盤構造のモデル化を行い、臨時地震観測データに基づく適切モデルの選択を試みた。

Key Words : *fused lasso, sparse modeling, physical logging, grand structure model, model selection*

1. はじめに

表層地盤の地震応答解析を行うためには、対象地点における地盤物性値が必要となるため、しばしばボーリング調査が行われる。PS 検層の種類には、ダウンホール PS 検層とサスペンション PS 検層がある。両者の測定機構が異なり、前者は地表発振孔内受信、後者は孔内発信孔内受信であることから、得られる結果には自ずと差異が生じる。ダウンホール PS 検層では地層区間ごとの速度構造が得られる。一方、サスペンション PS 検層ではより詳細な速度分布が得られるため、薄層や地層区間内の局所的な速度変化などを捉えられる特徴がある。一般に、ダウンホール PS 検層は地盤の平均的な速度構造を、サスペンション PS 検層は局所的な速度構造を出力する傾向にあると考えられている¹⁾。一次元波動伝播理論で表層地盤の地震応答解析を行うということは、対象地点が水平成層地盤であることを仮定していることになるため、PS 検層結果で得られた速度分布が水平方向に十分

連続しているかどうかは地盤をモデル化をする上で重要となる。このようなことから、中村・吉田²⁾は地盤のせん断波速度のモデル化としてダウンホール PS 検層から得られた速度区間をトレンド成分、サスペンション PS 検層結果とダウンホール PS 検層結果の差異を揺らぎ成分と考え、モデル化の不確定性について検討している。

以上のような背景の下、サスペンション PS 検層や密度検層によって得られた高分解能のデータを用いて表層地盤の応答解析を行う時、数値解析用の地盤構造モデルを構築することが一般的である。このモデル化は、通常、経験的な知識に基づいて行われることが多いため、任意性の介在する余地がある。そこで、本研究ではできるだけ客観的な方法論に従ってモデル化するアプローチについて追及することを試みた。着目した手法はスパースモデリングの一種の fused lasso である。スパースモデリングは情報処理技術の1つとして発展してきた手法であり、複雑な事柄をスパースにすることで本質を浮かび上げさせる特徴がある³⁾。また、fused lasso は隣接する説明変数

同士の係数を同じ値になるように拘束項を加えた lasso であり、変数に順序がある行列データに適用できる⁴⁾。なお、 lasso (least absolute shrinkage and selection operator)は、Tibshirani⁹⁾によって提案された次元圧縮（モデル変数のうち、できるだけ少ない変数を使って予測を行う）を目的とした L_1 正則化手法である。

本研究では、熊本地震の被災地である益城町で実施した物理検層データに fused lasso を適用して地盤構造のモデル化を行い、臨時地震観測データに基づく適切なモデルの選択を試みた。

2. Fused lasso の理論式

スパースモデリングに基づき物理検層データの地盤構造モデル化を行う方法論として、Tibshirani⁹⁾の提案による fused lasso を適用する。Tibshirani and Taylor⁶⁾に従い、はじめに generalized lasso 、次に fused lasso について概略を示す。両理論は以下の通りである。

(1) Generalized lasso

本論では次式のような線形回帰モデルを基本形として考える。

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ は目的変数ベクトル、 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)^T$ は説明変数行列、 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$ は回帰係数ベクトルである。

あらかじめ、これ以降で使用する数学記号の定義を行う。 $\|\cdot\|_1$ は L_1 ノルム ($\|\mathbf{z}\|_1 = \sum_k |z_k|$)、 $\|\cdot\|_2$ は L_2 ノルム ($\|\mathbf{z}\|_2 = \sqrt{\sum_k z_k^2}$) を表す。Tibshirani and Taylor⁶⁾によると generalized lasso は以下のような最適化問題に帰着する。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} \in \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{D}\boldsymbol{\beta}\|_1 \quad (2)$$

ここで、 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ は generalized lasso の解ベクトル、 $\mathbf{D}$ は罰則行列、 $\lambda \geq 0$ は正則化パラメータである。式(2)の解は Lagrange 双対問題として求めることができる。最適解は次式の通り表される。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{y} - \mathbf{D}^T \hat{\mathbf{u}}) \quad (3)$$

従って、制約条件が外れたことから比較的取り扱いやすいものとなり、式(2)の解 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ が得られる。

(2) Fused lasso

式(2)の generalized lasso の簡易な例として、1次元の fused lasso は次のように定式化される。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_i)^2 + \lambda \sum_{i=1}^{n-1} |\beta_{i+1} - \beta_i| \quad (4)$$

ここで、式(4)は式(2)中の $\mathbf{X}$ 及び $\mathbf{D}$ を次のように設定したことに対応する。

$$\mathbf{X} = \mathbf{I} = \text{diag}\{1, 1, 1, \dots, 1\} \quad (5)$$

そして、罰則行列は

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

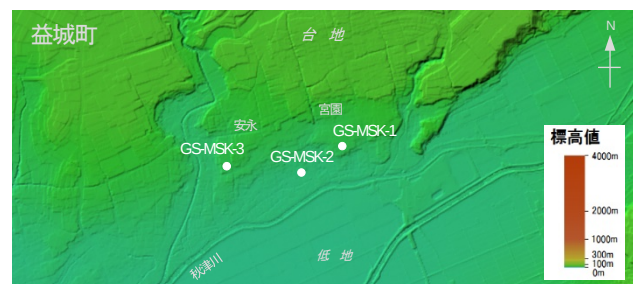
である。式(4)より明らかなように、第2項の罰則項は隣合うパラメータ間の差分を減少させるように作用するため、得られる解は平滑化効果を反映したものとなる。

3. 現地調査の概要

(1) 地盤調査

本研究では吉見他⁷⁾によって2016年熊本地震後に実施された益城町のサスペンション PS 検層結果および新垣他⁹⁾によって同地域で実施された密度検層の結果を用いた。図-1に地盤調査地点の位置を示す。調査地点は台地と低地の間に位置する斜面部である。PS 検層は GS-MSK-1～GS-MSK-3 までの3地点で、密度検層は GS-MSK-1 のみで実施されている。調査地点の表層地盤は主に火山性堆積物で構成されている。各地盤調査の詳細については、原論文を参照されたい。

サスペンション PS 検層の結果は深度方向に 50cm 刻みでデータが得られている。一方、密度検層は 6cm 刻みでデータが得られているため、PS 検層と一致するように 50cm 区間ごとに平均値を求めて以降の分析用データとした。



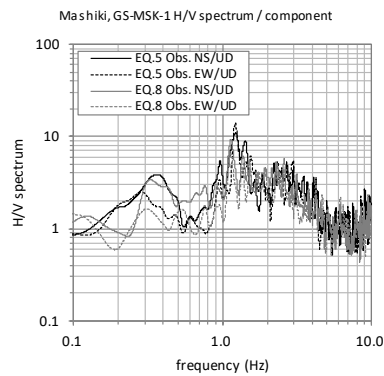
(背景地図：国土地理院 地理院地図 (電子国土 Web))

図-1 ボーリング調査地点の位置図

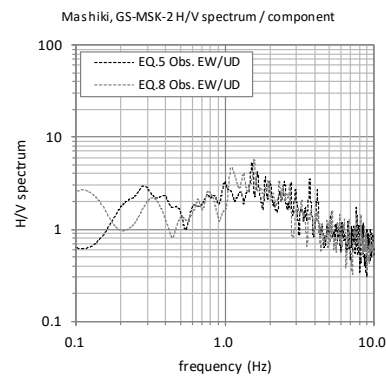
表-1 臨時地震観測で記録が得られた地震諸元一覧

EQ.	Origin time						Hypocenter					Mj	Region	Peak acc.(vector sum)		
							Long		Lat.		Depth (km)			GS- MSK-1	GS- MSK-2	GS- MSK-3
	year	m	dy	hr	mi	sec	deg.	min.	deg.	min.						
1	2016	10	10	3	54	28.57	32	32.88	130	44.33	8.62	3.8	熊本県南部	5.9	4.5	3.6
2	2016	10	11	6	45	10.46	32	40.60	130	44.69	12.17	3.8	熊本県北西部	15.1	22.1	8.9
3	2016	10	12	15	56	11.39	32	42.06	130	38.87	11.35	3.6	熊本県北西部	9.4	7.6	8.3
4	2016	10	18	1	2	10.15	32	34.65	130	38.62	12.38	3.5	熊本県南部	2.0	2.4	1.6
5	2016	10	21	14	7	22.57	35	22.83	133	51.37	10.61	6.6	鳥取県東部	1.9	1.4	—
6	2016	10	22	3	33	46.48	32	47.16	131	56.11	54.71	4.4	日向灘	3.2	2.7	3.2
7	2016	11	6	20	17	48.13	33	40.24	131	0.50	8.33	3.5	福岡県北東部	0.4	0.3	0.4
8	2016	11	6	20	18	28.94	33	40.20	131	0.47	8.29	3.6	福岡県北東部	0.4	0.2	0.3
9	2016	11	7	1	54	20.29	32	41.70	130	41.54	11.46	3.0	熊本県北西部	2.0	1.7	1.3
10	2016	11	11	10	12	49.29	32	44.16	130	39.96	11.83	4.2	熊本県北西部	28.0	27.7	19.8
11	2016	11	17	15	4	32.01	32	48.10	130	42.94	6.05	2.5	熊本県北西部	2.1	1.5	1.7
12	2016	11	23	20	10	15.08	32	44.35	130	40.84	12.54	3.6	熊本県北西部	10.8	11.0	5.8
13	2016	11	26	3	52	6.15	33	12.20	132	7.36	46.99	3.8	豊後水道	0.3	0.3	0.3
14	2016	11	29	2	33	59.28	32	51.52	130	50.16	13.67	2.9	熊本県北西部	6.6	3.9	7.1
15	2016	12	2	6	19	52.43	32	49.77	130	48.86	7.92	3.6	熊本県北西部	24.8	25.5	42.3
16	2016	12	2	15	34	59.57	32	40.96	130	44.60	12.37	3.1	熊本県北西部	4.8	5.5	3.4
17	2016	12	5	11	52	4.61	32	34.08	130	43.40	8.70	3.7	熊本県南部	3.0	2.5	1.9
18	2016	12	6	12	12	11.45	32	32.10	130	40.84	12.58	3.6	熊本県南部	3.6	2.7	2.6
19	2016	12	6	12	16	27.11	32	47.09	130	40.26	10.67	2.6	熊本県北西部	1.9	1.7	1.8
20	2017	1	11	19	11	15.43	32	54.17	130	51.43	8.56	3.4	熊本県北西部	8.0	6.9	10.1

震源情報の出典：気象庁地震月報（カタログ編）

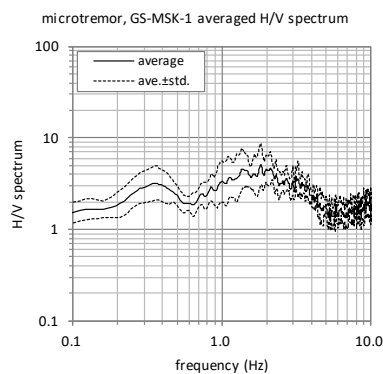


(1)GS-MSK-1

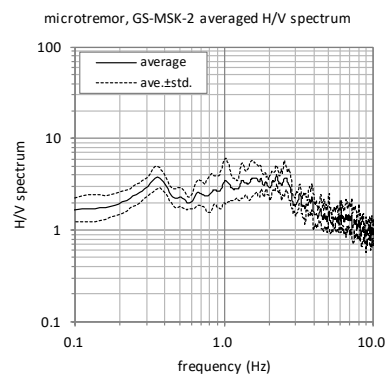


(2)GS-MSK-2

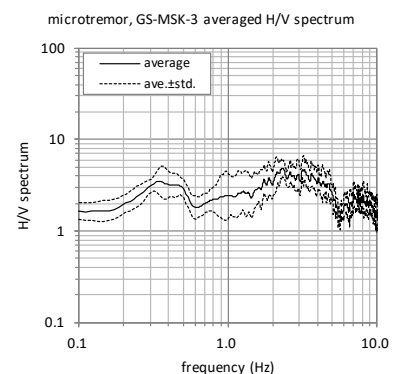
図-2 coda波の H/V スペクトル



(1)GS-MSK-1



(2)GS-MSK-2



(3)GS-MSK-3

図-3 常時微動の H/V スペクトル

(2) 臨時地震観測

地盤調査を実施した前述の3地点では、地表において臨時地震観測を実施した。観測期間は2016年10月～2017年1月迄である。観測に使用した機器は、加速度検出器が(株)ミツトヨのJEP-6A3、収録装置が白山工業(株)のデータマークLS-8800である。

表-1に臨時地震観測で収録された記録の地震諸元一覧を示す。主なイベントとして20地震のデータが得られている。また、熊本地震の余震だけでなく、鳥取県東部の地震など遠地で発生した地震の記録も得られている。本研究では、coda部で表面波の卓越が期待される、この遠地で発生した地震に着目してモデル化検討で利用した。更に、データは連続記録として収録されているため、イベント間には常時微動記録が収録されている。これについても、同様の理由から後述の検討で利用した。

遠方で発生した地殻内の浅い地震の観測記録の coda 波の H/V スペクトルを図-2に示す。対象としたのは、2016年10月21日鳥取県東部の地震(EQ.5)と2016年11月06日福岡県北東部の地震(EQ.8)である。S波到達から十分な時間経過後の coda 部分を、前後1秒のテーパ処理を施して取り出し、継続時間60秒の記録から H/V スペクトルを求めた。なお、GS-MSK-2地点では、2016年11月14日以前の記録についてNS成分に不調が認められたため、当該成分は処理対象から除外した。また、GS-MSK-3地点の記録はノイズ混入のため、使用できなかった。両地点共に0.5Hz以上の周波数帯では、地震の違いによる差異は小さい。更に、GS-MSK-1地点では、成分間の差異が殆ど見られない。

図-3には3地点における常時微動の H/V スペクトルを示す。常時微動はイベント間の記録から交通振動などのノイズ部分を避けて60秒間の記録を10区間分用意し、H/V スペクトルを算定後に幾何平均した。なお、記録の抽出には、前後1秒のテーパ処理を施している。

上述した観測記録の H/V スペクトルでは、0.1HzのParzen windowでFourierスペクトルを平滑化した後にスペクトル比を算定している。

図-2の coda 波と図-3の常時微動の処理結果を比較すると、両者のスペクトル形状が良く対応していることが分かる。従って、両者は主として表面波によって構成されているものと推察される。

4. 地盤構造のモデル化検討結果

(1) Fused lassoによる地盤構造モデル化

正則化パラメータ λ の値を3種類変化させて、3地点のPS検層結果と密度検層結果に対してfused lassoを適用して得られた地盤構造モデルを図-4に示す。図中には

オリジナルの計測データを丸印で示している。図より、正則化パラメータの値を大きくするほど屈曲点数の少ないモデルが得られていることが分かる。また、正則化パラメータの値が大きい時のモデルは、オリジナルの計測データのトレンドを示していることがわかる。

(2) スパースモデルと観測記録とのH/Vスペクトル比較

先の検討では、正則化パラメータ λ の値によって複数の地盤構造モデルが得られた。しかし、実際に必要となるのは表層地盤の増幅特性を良く表現できるモデルである。そこで、先述の臨時地震観測で得られた観測データとの比較検討を行った。着目したのは地震波の coda 部分と常時微動の H/V スペクトルである。表面波理論に基づく H/V スペクトルは表層地盤の増幅特性を直接的に表すものではないが、地盤構造と深く関係するものであることから地盤構造の逆解析などで利用されている。

観測記録と地盤構造モデルから算定される理論値との H/V スペクトルの比較を図-5に示す。Coda波の観測値は図-2に示した複数の H/V スペクトルの幾何平均値を、常時微動の観測値は図-3に示した幾何平均値を示している。理論値は図-4の地盤構造モデルを用いて、Arai and Tokimatsu¹⁰⁾の理論に基づいて算定したものであり、Rayleigh波だけを用いた場合(図中表記: Ray.)とLove波とRayleigh波の両者を考慮した表面波を用いた場合(図中表記: surf.)の2種類を考えた。両者ともに基本モードのみを取り扱っている。なお、GS-MSK-2地点とGS-MSK-3地点では密度検層を行っていないため詳細な密度分布が得られていない。そこで、GS-MSK-1地点の密度検層結果から土質種別ごと設定した平均的な値¹¹⁾を用いた。図-5に示した理論値算定の各地盤モデルと正則化パラメータ λ の値との関係を表-2に示す。

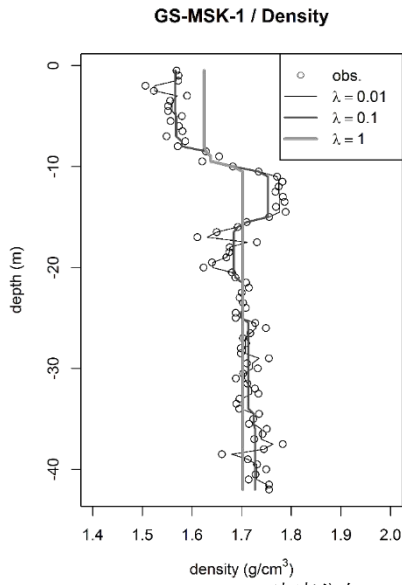
図-5より、coda波および常時微動共に地盤構造モデルから算定された理論値と良く対応している。特に既往検討¹⁰⁾と同様、Rayleigh波だけの H/V スペクトルより、Love波とRayleigh波を考慮した表面波の H/V スペクトルの方が、観測記録との振幅レベルの対応が良いと言える。これらの傾向は、3地点全てに共通している。

(3) 情報量基準に基づくモデル選択

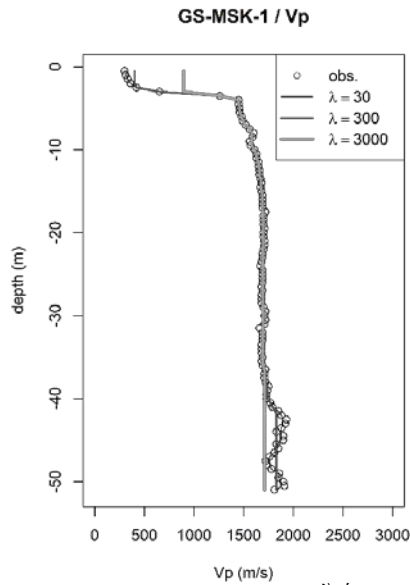
正則化パラメータ λ の値を、考慮している範囲内でステップ状に変化させた時、 λ の値ごとのfused lasso解

表-2 各モデル化 case における λ の値

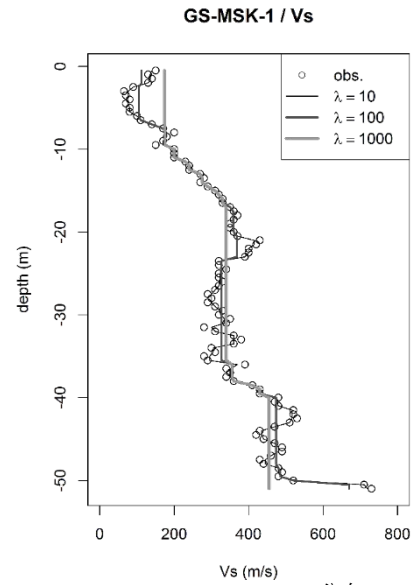
modeling	λ		
	density	Vp	Vs
case 1	0.01	30	10
case 2	0.1	300	100
case 3	1	3000	1000



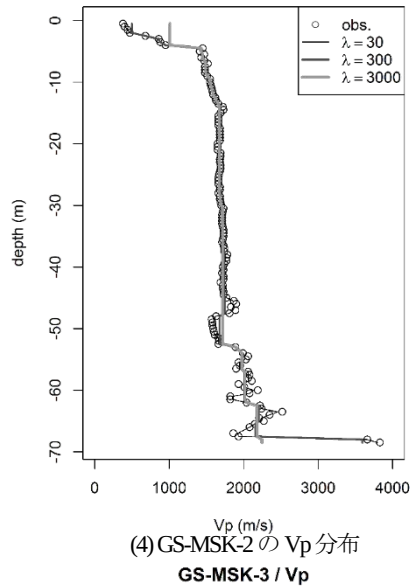
(1) GS-MSK-1 の密度分布



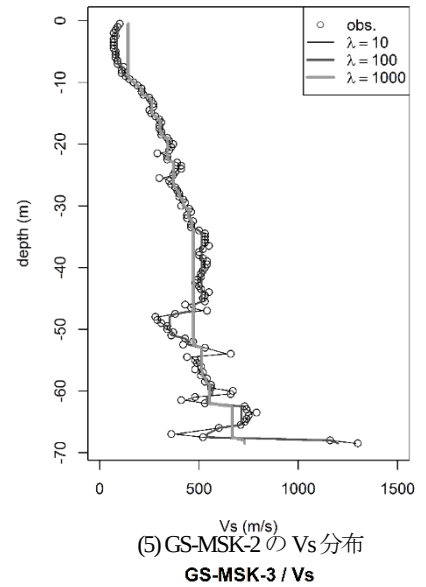
(2) GS-MSK-1 の Vp 分布
GS-MSK-2 / Vp



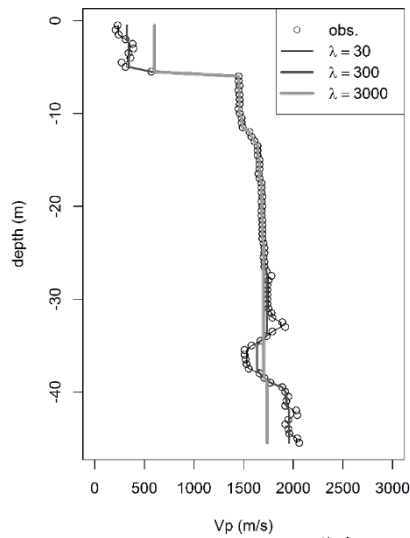
(3) GS-MSK-1 の Vs 分布
GS-MSK-2 / Vs



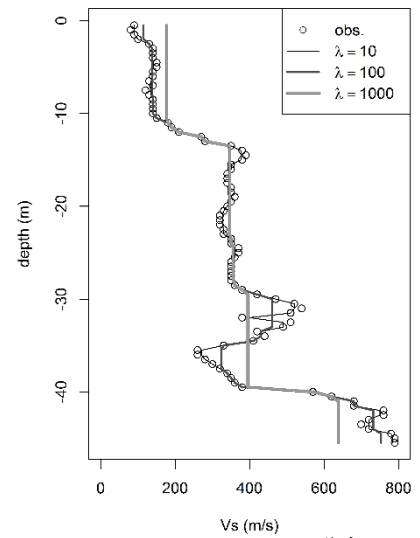
(4) GS-MSK-2 の Vp 分布
GS-MSK-3 / Vp



(5) GS-MSK-2 の Vs 分布
GS-MSK-3 / Vs

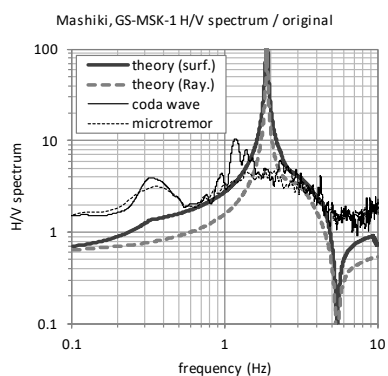


(6) GS-MSK-3 の Vp 分布

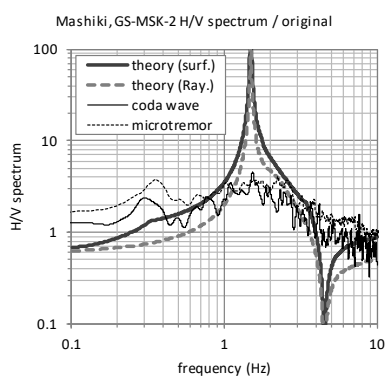


(7) GS-MSK-3 の Vs 分布

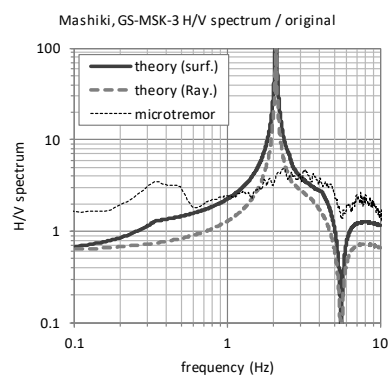
図-4 fused lasso による地盤構造モデル化の結果



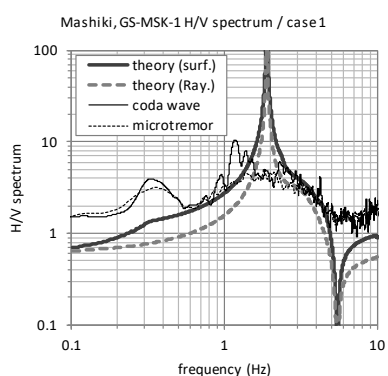
(1) GS-MSK-1 のオリジナルデータ



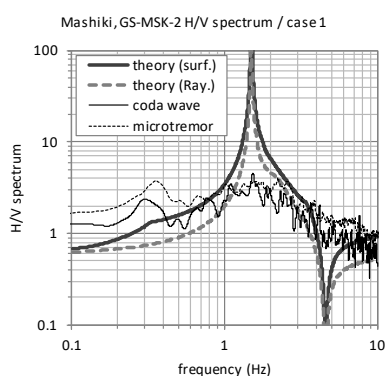
(5) GS-MSK-2 のオリジナルデータ



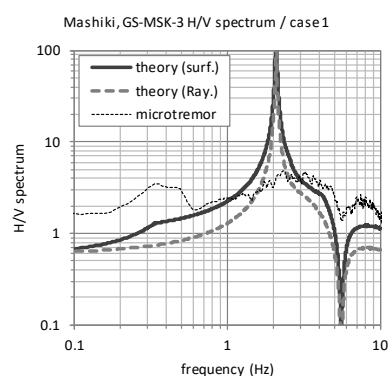
(9) GS-MSK-3 のオリジナルデータ



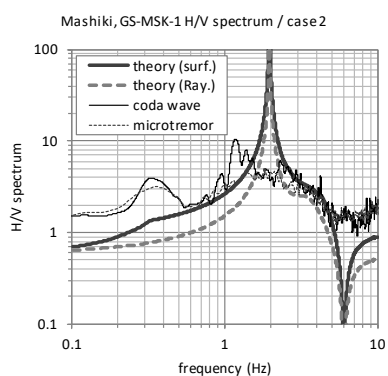
(2) GS-MSK-1 の case 1 モデル



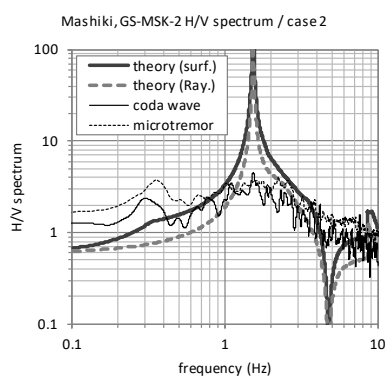
(6) GS-MSK-2 の case 1 モデル



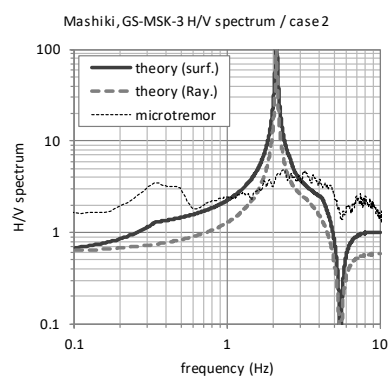
(10) GS-MSK-3 の case 1 モデル



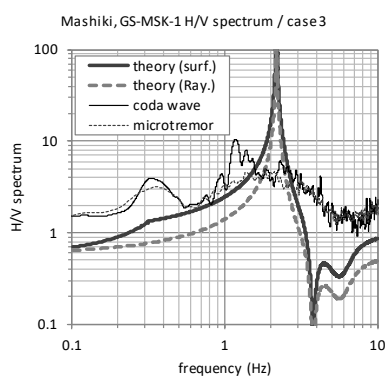
(3) GS-MSK-1 の case 2 モデル



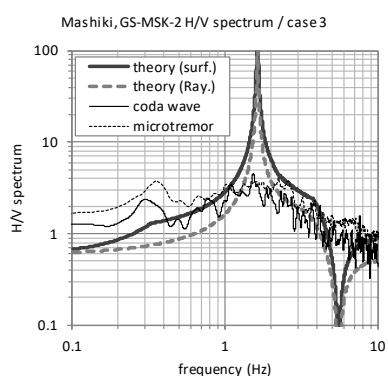
(7) GS-MSK-2 の case 2 モデル



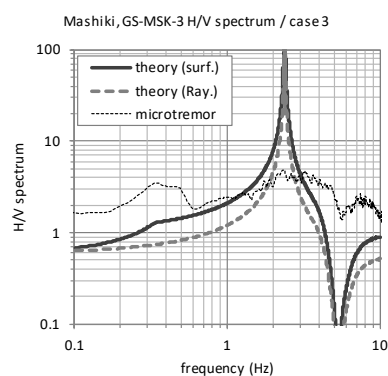
(11) GS-MSK-3 の case 2 モデル



(4) GS-MSK-1 の case 3 モデル



(8) GS-MSK-2 の case 3 モデル



(12) GS-MSK-3 の case 3 モデル

図-5 観測記録と地盤構造モデルから算定される理論値との H/V スペクトルの比較

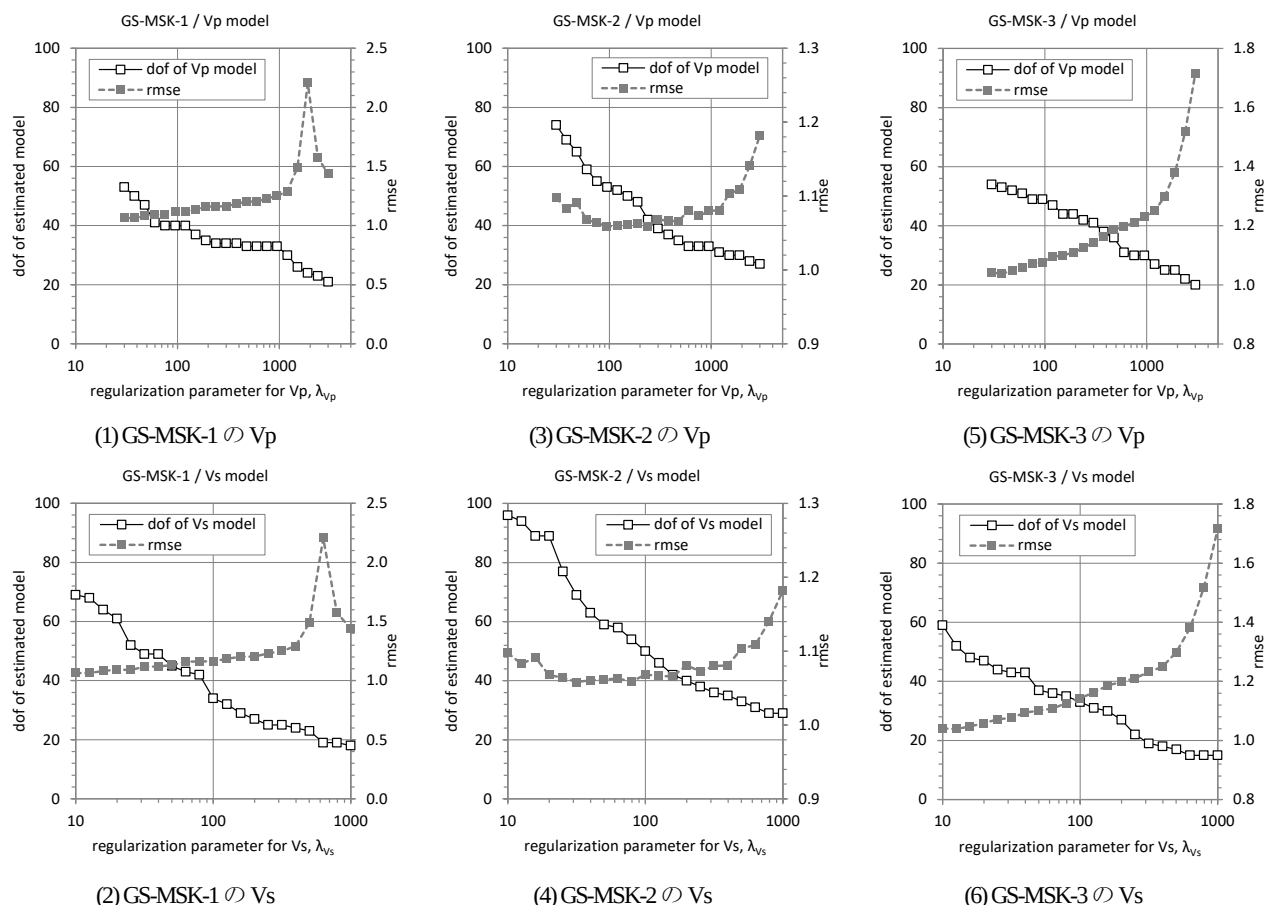


図-6 正則化パラメータ λ の値ごとの fused lasso 解モデルの自由度およびモデル理論値と観測記録との rmse の関係

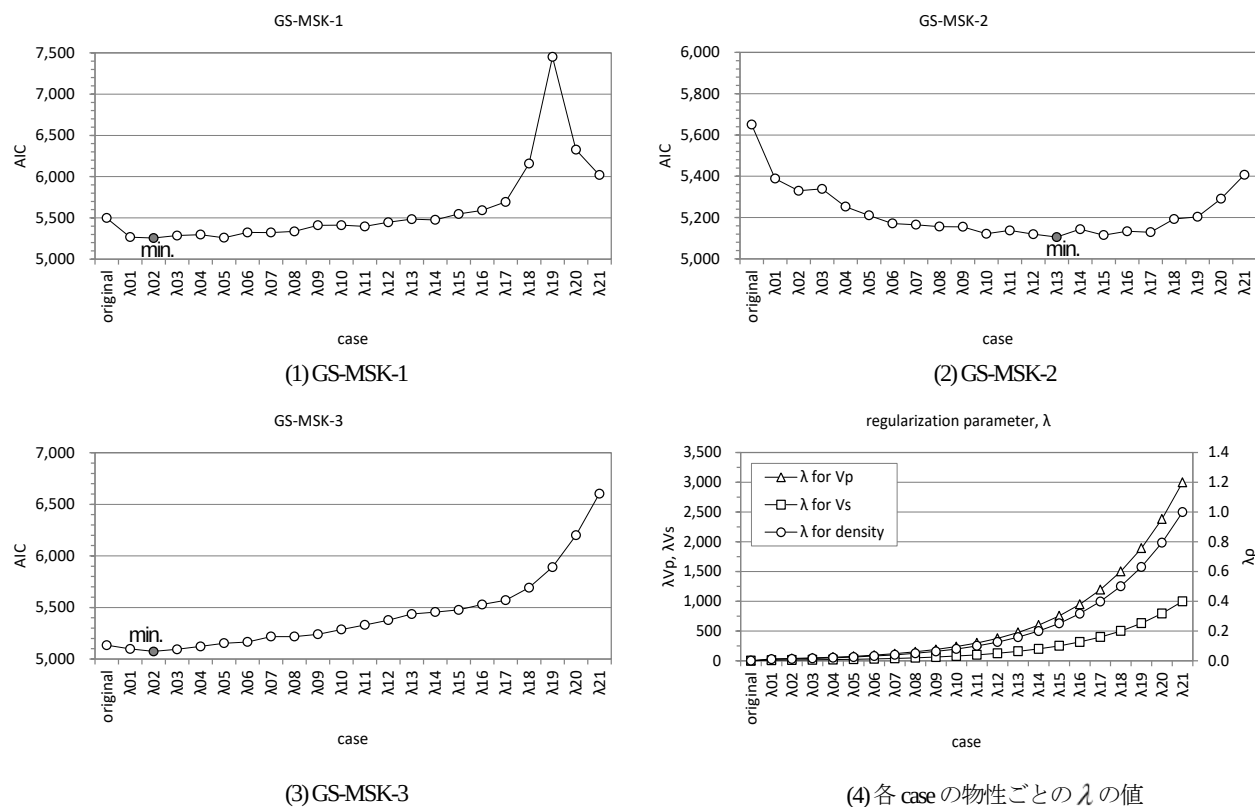


図-7 正則化パラメータ λ を変化させたモデルごとの AIC の推移

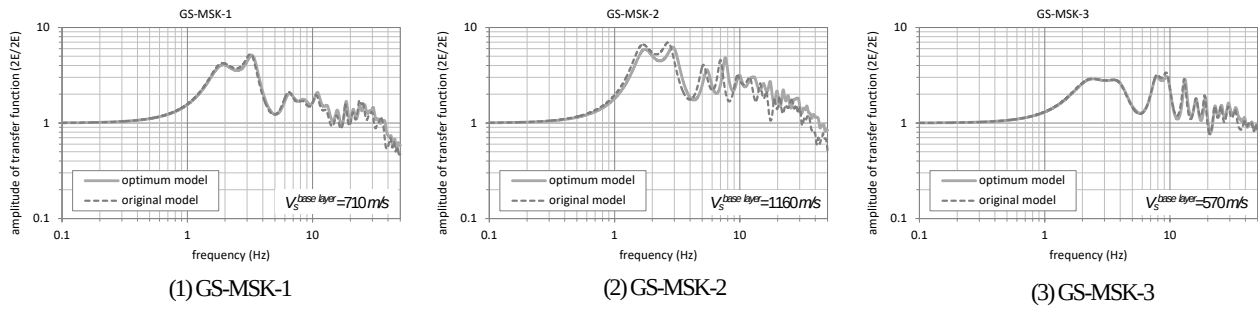


図-8 選択された最適地盤構造モデルのSH波増幅率

モデルの自由度 (dof) およびモデル理論値と図-5 に示した各地点の常時微動観測記録との rmse (二乗平均平方根誤差) の関係を図-6 に示す. ここで, fused lasso 解モデルの自由度は全モデル・パラメータのうち, 同値のパラメータ・ブロック数を表している. λ の値は表-2 における各物性ごとの最小値と最大値の間を対数軸上で等間隔に 21 分割したものである. rmse 算定の対象周波数帯は 0.5Hz~7.0Hz とした.

図より, 正則化パラメータ λ の値を大きくするほど得られるモデルの自由度 (dof) が小さくなることが分かる. 一方, rmse は正則化パラメータ λ の値を大きくすると増加する傾向にあり, 両者はトレードオフの関係にある. 従って, 情報量基準の考え方に基けば, 適切なモデルがこの λ の組み合わせの中にあると期待される.

図-5 に示した各地点の観測記録を用いて, 次式で表される AIC (赤池の情報量基準)¹²⁾によって適切なモデル選択を試みた.

$$AIC = -2 \cdot MLL + 2 \cdot m \quad (7)$$

ここで, MLL : 最大対数尤度, m : モデルの次数 (自由度数: dof), である. なお, 最大対数尤度は誤差が正規分布に従うと考え, 常時微動観測記録と各スパスモデルから算定される理論値との H/V スペクトルの残差二乗和より算定した. 残差二乗和を算定した周波数範囲は rmse と同様に 0.5Hz~7.0Hz とした. AIC の値はモデルの悪さを表しているため, AIC 最小のモデルを最良モデルとする.

正則化パラメータ λ を変化させて得られた推定モデルごとの AIC の推移を図-7 に示す. 図中で最小値を示す場合のシンボルを灰色で塗りつぶして示している. 図より, GS-MSK-1 地点と GS-MSK-3 地点では, λ の最小値から 1 ステップだけ大きくした場合 (λ_{02}) に AIC が最小値を示している. 一方, GS-MSK-2 地点では中間よりやや大きい値の場合 (λ_{13}) に AIC が最小となっている. これらのモデルが AIC に基づく最良なモデルとして選択された.

(4) SH 波の増幅特性

先の検討で選択された最良な地盤構造モデルを用いて, 一次元波動伝播理論で求めた SH 波の増幅率 (2E/2E) を図-8 に示す. ここでは, 工学的基盤から地表間の線形増幅率を表している. なお, 比較のために物理検層で得られたオリジナルの計測データを用いて算定した結果も示している. 各地点の工学的基盤は, 最深部で速度のコントラストが明確な層に設定した. 減衰定数は全層一律で 2%としている.

図-8 より, GS-MSK-1 地点と GS-MSK-3 地点では, 最適な地盤モデルとオリジナルの計測値とで増幅率の差異が小さい. 一方, GS-MSK-2 地点については若干の差異が認められるものの, 著しく傾向が異なるものではない.

5. まとめ

本研究では, 物理検層データに対して fused lasso を適用して地盤構造のモデル化を行い, 臨時地震観測データに基づく適切なモデル選択に関する検討を行った. 本研究で得られた知見を以下にまとめる.

- fused lasso を用いることによって, 物理検層データからモデル次数を低減させた地盤構造モデルが得られた. また, 正則化パラメータの値を大きくすることによって, より簡略化されたモデルが得られることを確認した.
- 益城町の被害地域で行われた物理検層データから理論的に算定される H/V スペクトルは, 遠方地震の coda 波や常時微動観測記録の H/V スペクトルと良く対応することが確認された. この時, 既往検討¹⁰⁾と同様に理論値として Rayleigh 波だけを用いるよりも, Love 波と Rayleigh 波の両者を考慮する方が観測値と良く一致することが分かった.
- 正則化パラメータを順次変化させた場合, fused lasso 解モデルの自由度およびモデル理論値と観測記録との rmse の間にはトレードオフの関係があることが分かった.
- fused lasso 解モデルの自由度およびモデル理論値と

観測記録との残差二乗和を用いて、情報量基準 AIC による適切なモデル選択を試みたところ、GS-MSK-1 地点と GS-MSK-3 地点ではオリジナルの検層データに比較的近いモデルが、GS-MSK-2 地点ではやや異なるモデルが選択された。

- AIC によって選択された最良の地盤構造モデルを用いて SH 波の増幅特性を求めたところ、オリジナルの計測データを用いた場合とで顕著な差異が認められなかった。

謝辞：震源情報として気象庁地震月報（カタログ編）を利用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：地盤の動的解析-基礎理論から応用まで-, (1)弾性定数の設定, pp.106-107, 2007.
- 2) 中村晋, 吉田望：せん断波速度の不均質な空間分布のモデル化に関する一考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 3-026, 2008.
- 3) 大関真之：今日からできるスパースモデリング, <http://www-adsys.sys.i.kyoto-u.ac.jp/mohzeki/>. (2019 年 5 月 9 日閲覧)
- 4) Tibshirani, R., Saunders, M., Rosset, S., Zhu, J. and Knight, K.: Sparsity and smoothness via the fused lasso, *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Statistical Methodology)*, Vol.. 67, No. 1, pp.91-108. 2005.
- 5) Tibshirani, R.: Regression Shrinkage and Selection via the lasso, *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological)*, Vol.58, No.1, pp.267-288, 1996.
- 6) Tibshirani, R. J. and Taylor, J.: The solution path of the generalized lasso, *The Annals of Statistics*, 39, 3, 1335-1371, 2011.
- 7) 吉見雅行, 秦吉弥, 後藤浩之, 細矢卓志, 森田祥子, 徳丸哲義：熊本県益城町の 2016 年熊本地震被害集中域におけるボーリング調査結果（速報）, 日本活断層学会 2016 年度秋季学術大会, P17, 2016.
- 8) 吉見雅行, 後藤浩之, 秦吉弥, 吉田望：益城町市街地の 2016 年熊本地震被害集中域における非線形地盤応答特性, 平成 28 年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会, No. A05, 2016..
- 9) 新垣芳一, 吉見雅行, 後藤浩之, 栗田哲史, 佐藤強兵, 細矢卓志, 荒井靖仁, 森田祥子：益城町の 2016 年熊本地震被害集中域の表層に分布する凝灰質土の物理特性・動的変形特性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.3, pp.552-559, 2017.
- 10) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-wave velocity profiling by inversion of Microtremor H/V spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 53-63, 2004.
- 11) 新垣芳一, 栗田哲史：2016 年熊本地震被害集中域の表層凝灰質土の非線形挙動による地表応答への影響, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, CS12-048, 2018.
- 12) Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory*, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest: pp. 267-281, 1973.

FUSED LASSO SOLUTIONS FOR PHYSICAL LOGGING DATA MODELING

Tetsushi KURITA, Yoshikazu SHINGAKI and Masayuki YOSHIMI

Conducting seismic response analysis of surface ground using the survey data obtained by suspension PS logging and/or density logging, it is general to construct a ground structure model for numerical analysis. Since this modeling is often based on empirical knowledge, it leaves scope for arbitrary. Therefore, in this study, we tried to pursue an approach that models ground structures according to the objective methodology as much as possible. The method we focused is the fused lasso, which is a kind of the sparse modeling. The fused lasso is an optimization technique considering regularizations to uniformise the coefficients of adjacent explanatory variables. In this paper, the ground structure was modeled by applying the fused lasso to the physical logging data obtained in Mashiki-town, where is a disaster area of the 2016 Kumamoto earthquake, and made an appropriate model selection based on the temporary seismic observation data.