

スパースモデリングの弾性波探査への適用性の検討

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 佐々木 勝

1. はじめに

スパースモデリングは、近年、医療や天文学などの各種分野で注目されている最適化手法、データ処理技術の一種であり、少ないデータから解を導き出すための方法論である。もう少し踏み込んで説明すると、劣決定問題において、解のスパース性を利用して逆問題を解く手法である。劣決定問題とは、連立方程式を解くときに、方程式の数より未知数（解）の数が多い状況を意味する。

医療分野においては、例えばMRIの計測データ数を減らすことで計測時間を高速化することができ、患者の負担を減らすことに成功している。

物理探査においても、通常は地表もしくはボーリング孔内など限られた場所でしか計測できないため、取得データ数は少ないことが多く、劣決定問題が発生する。そのため、物理探査分野においてもスパースモデリングが適用できるのではないかと様々な検討がなされている。全国地質調査業協会連合会においても、「新マーケット創出・提案型事業 物理探査結果へのスパースモデリングの適用に関する研究会」において物理探査分野への適用性が検討され、2018年に報告書が公開されている¹⁾。

今回は、スパースモデリングの物理探査への適用性を検討するため、屈折法弾性波探査の解析にスパースモデリングを適用してモデル解析を実施した。

2. スパースモデリングの適用条件

スパースモデリングは、解のスパース性を利用して未知数を減らし、逆問題の解を解く手法である。逆問題の解においてほとんどの成分（解）でゼロ、もしくはゼロが期待され、またその中で、意味のある成分がスパース（疎、まばら）に存在する性質をスパース性という。

図-1にスパース性のイメージを示す。解のほとんどがゼロであり、まばらにゼロ以外の解が存在している。このような条件下でのみスパースモデリングを用いた解析が適用できる。

0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	6	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2	0
0	0	0	0	0	0	0	0

図-1 解のスパース性のイメージ

実際の問題においては、スパース解（ゼロ）となる解の個数や位置は未知である。そこで、L1ノルム（解の各成分の絶対値の和）を最小にするという条件を与えることで、積極的にスパースな解がうまく選択される。このL1ノルムの正則化に用いる代表的な手法にLASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) がある。LASSO を解く方法としては、様々な方法が提案されており、代表的な方法として、FISTA (Fast Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm) や ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) が挙げられる。

物理探査においては、成分（解）は地盤の物性値となるが、地盤の物性値にはスパース性はない。そのため、物理探査にスパースモデリングを適用する場合には、スパース性が伴うようにデータ処理において工夫する必要がある。

3. 物理探査への適用性の検討

(1) 物理探査分野におけるスパースモデリング

物理探査分野において、スパースモデリングの研究は主に反射法弾性波探査において行われていた。最近では屈折法弾性波探査を始め、重力探査、電気探査、磁気探査などのインバージョンに適用した研究も報告されている。本稿では、屈折法弾性波探査への適用性を検討した。

(2) 屈折法弾性波探査におけるスパース性

屈折法弾性波探査は弾性波速度を求めめる探査であり、解にスパース性は認められない。そのため、そのままではスパースモデリングを適用することは難しい。ただし、空間分布における変化や、時間における変化に着目した場合、スパース性が期待できる場合がある。

例えば、一様な速度層内において、隣接する2点間の速度差はゼロであり、速度境界を挟んだ2点間でのみ値を持つことになるため、スパース性が期待できる。

また、地盤改良効果を確認するために、改良前後で弾性波探査を実施した場合、弾性波速度の差は改良部のみ値を持ち、改良されていない部分は速度差がゼロのため、スパース性が期待できる。

4. 屈折法弾性波探査のモデル解析

(1) スパースモデリングの解析手法

屈折法弾性波探査のモデル解析は、自社製の屈折法弾性波探査解析ソフトにスパースモデリングのコードを追加して実施した。スパースモデリングの解析方法として、表-1の2パターンを用いて実施した。LASSOの解析手法にはADMMを使用し、スパース性を設定するために①初期

値と解析結果との差, ②速度の空間分布の差にスパース性を見出してスパースモデリングを適用した. ②の速度の空間分布の差とは, 隣接メッシュ間での速度差をスパース性の成分として用いている.

表-1 スパースモデリングの解析手法

名称	解析手法	スパース性の設定
ADMM-1 (時間)	LASSO 型評価関数を ADMM を用いて解析	初期値と解析結果で のスパース性を仮定
ADMM-2 (空間)	LASSO 型評価関数を ADMM を用いて解析	速度値の空間分布の スパース性を仮定

(2) モデル解析

解析のモデルとして, ①地盤改良, ②断層破碎帯の2つの地盤条件を想定した. それぞれのモデルで, 各スパースモデリングの解析手法と通常のトモグラフィ解析手法(重み付き最小二乗法)による方法の3パターンの解析を実施した. 解析結果を図-2, 図-3に示す.

図-2は地盤改良を想定した解析結果である. 解析初期値は改良前の計測結果を想定したモデルを作成して解析を行った. スパース性に初期値からの時間変化を用いたADMM-1については比較的モデルと近い結果が得られているが, 改良部はモザイク状の結果となり, 速度構造は正しい値を示していない. 一方, 空間分布の変化を用いたADMM-2は基盤層や速度値, 速度境界などが若干あいまいになる傾向が認められる.

図-3は断層破碎帯を想定した解析結果である. 事前情報がないと想定して, 一様な速度値を初期値として解析を行った. ADMM-1は断層位置に若干の速度の落ち込みが確認できるが, 速度値や断層の幅ははっきり出していない. ADMM-2は断層の速度値は捉えているものの, 基盤の速度値が安定せず, まだらな模様を描いている.

5. まとめ

物理探査, 今回は特に屈折法弾性波探査にスパースモデリングの適用性を検討した. 物理探査にスパースモデリングを用いる場合は, 探査の観測値にスパース性がないので, 少し工夫をしてスパース性を見出すことができれば適用は十分に可能であることがわかった. 物理探査は元々観測値が少ないことが多いので, 適用することができればある程度の効果は期待できる. ただし現状ではシンプルな条件でのモデル解析のみなので, 今後は様々な条件下において検討する必要がある. また今回は検討できなかったが, ノイズの有無・大小による解析精度の影響や他手法を用いた解析も今後検討したい.

今後の課題としては, ①観測値からスパース性を見出すための検討, ②複数のパラメータ設定の決定方法, ③様々なモデリングに対応したプログラムの開発などが挙げられる.

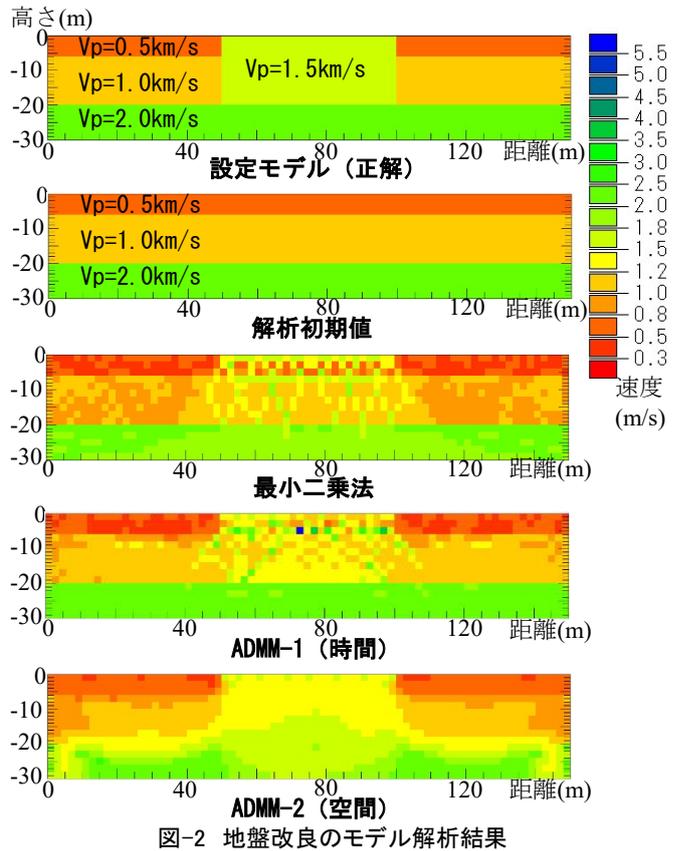


図-2 地盤改良のモデル解析結果

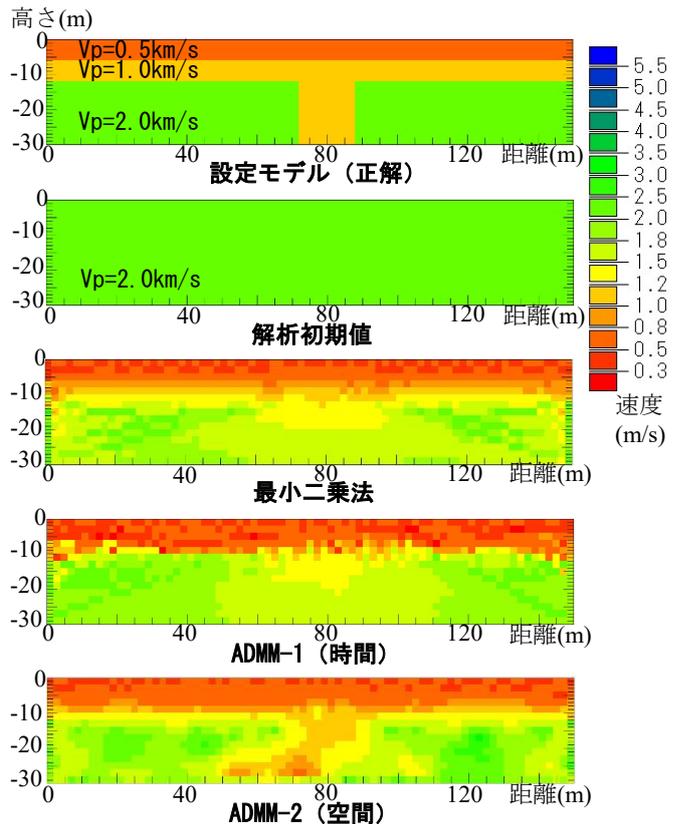


図-3 断層破碎帯のモデル解析結果

《引用・参考文献》

1) 物理探査結果へのスパースモデリングの適用に関する研究会編:「新マーケット創出・提案型事業 物理探査結果へのスパースモデリングの適用に関する研究会報告書」, 一般社団法人全国地質調査業協会連合会, 2018.3