

鉛直アレー観測記録を用いた地盤のS波速度およびQ値の同定問題における センサーの最適配置に関する一考察

A remark on optimum sensor locations for identification of shear wave velocity and quality factor of subsurface ground using vertical array records

辻原 治*, 沢田 勉**

Osamu TSUJIHARA and Tsutomu SAWADA

* 博士(工学), 和歌山工業高等専門学校助教授, 環境都市工学科(〒644-0023
和歌山県御坊市名田町野島 77)
** 工博, 徳島大学教授, 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

This paper describes the optimum sensor locations for the identification of shear wave velocity and quality factor of subsurface layers of ground using vertical array records of ground motions. Propagation law of errors is applied to estimate the coefficients of variation for estimated values for unknown properties, then the problem of optimum sensor locations is formulated as the problem to minimize the average value of coefficients of variation. Numerical analysis has been carried out. The results are compared with those of Monte Carlo simulation. GA(Genetic Algorithm) is applied to solve the problem of optimum sensor locations.

Key Words: identification, vertical array record, optimum sensor locations, GA

キーワード: 同定, 鉛直アレー観測記録, センサーの最適配置, GA

1. はじめに

地表の地震動は、比較的軟弱な表層地盤による増幅の影響を大きく受ける。したがって、表層地盤の動的特性を推定することは、構造物の耐震設計において、また、被害予測の観点からみてきわめて重要である。

近年、地震計の普及により、地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた地盤構造の同定が多く行われるようになった(たとえば1)~10)。

この種の研究では、一般に、地盤震動記録のスペクトル比とその計算値の残差を目的関数とし、これを最小化するべく地盤のS波速度および減衰が同定される。最近、同定された未知変数の推定精度について言及した研究がみられるようになった。栗田ら¹¹⁾は、観測記録に含まれるノイズに関する感度解析によって、未知変数の推定精度を評価する方法を示した。吉田ら^{12, 13)}は、目的関数の最小化にMarquardt法¹⁴⁾を適用する方法において、未知変数の推定値の共分散行列が近似的に評価できることを指摘している。また、辻原ら¹⁵⁾は、最小二乗問題における誤差伝播法則に基づき、観測記録のスペクトル比に無関係の偶然誤差がノイズとして混入されている場合の未知変数の推定誤差評価法を示し、数値計算によりその妥当性を検討している。

ところで、鉛直アレー観測記録を用いた地盤同定問題における未知変数の推定精度は、センサーの配置と密接なかわりをもつ。したがって、限られた個数のセンサーで精度の高い推定値を得るために、どのような配置が最適かを考えることは重要である。この問題に対して、未知変数の推定誤差の評価が可能であれば、それが最小となるようなセンサー配置を実現する方法が考えられる。質点系の同定問題におけるセンサーの最適配置問題についてはこれまでに研究がなされている^{16, 17)}が、水平成層地盤モデルの同定問題におけるセンサーの最適配置を扱った研究は少ない。吉田ら¹²⁾は、水平成層地盤モデルのS波速度構造の同定問題において、未知変数の推定誤差分散を最小化する基準により、センサーの位置を決定する方法を示し、情報エントロピーに基づく基準と比較している。

本研究では、鉛直アレー観測記録を用いた水平成層地盤のS波速度およびQ値の同定問題において、辻原らが示した未知変数の推定誤差評価法¹⁵⁾に基づくセンサー配置の最適性基準を示し、モンテカルロシミュレーションによる結果と比較して、その妥当性を検証する。

また、センサー配置の最適性基準が示されても、実際にそれをどのように使うかは別の問題である。センサーの位置を試行錯誤的に変化させ、それぞれのケースにお

ける未知変数の推定誤差を比較することはできるが、センサーの数が増えると、非常に煩雑な計算を必要とする。そこで、センサーの位置を決める問題を、S波速度またはQ値の推定誤差を評価関数とし、センサーの設置深さを未知変数とする最適化問題として扱う。そして、このような最適化問題の性質について考察し、遺伝的アルゴリズム(GA)¹⁸⁾の適用性について検討する。

2. 地盤同定問題の定式化

図-1に示すような水平成層構造をもつ地盤に鉛直下方からSH波が入射するものと仮定し、地表または地中で得られた鉛直アレー観測記録より、地盤各層のS波速度 V_m とQ値 Q_m を同定する問題を考える。なお、地盤各層の層厚 H_m および土の密度 ρ_m は既知とする。

いま、第 p 層内の点 p および第 q 層内の点 q ($p < q$)で、地盤震動加速度の同時観測記録が得られているものとし、これらの記録のフーリエスペクトルをそれぞれ $X_p(f)$ 、 $X_q(f)$ とする。鉛直下方から入射した周波数 f のSH波の重複反射を仮定すると、それらと地表面加速度のフーリエ振幅 $X_0(f)$ との間にはつぎの関係が成り立つ¹⁹⁾。

$$X_p(f) = \gamma_p(f; \alpha) X_0(f) \quad (1)$$

$$X_q(f) = \gamma_q(f; \alpha) X_0(f) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ は同定すべき未知変数 V_j 、 Q_j 、 $j = 1, 2, \dots, q$ を一般的に表し、 $N (= 2q)$ は未知変数の総数を表す。また、 $\gamma_p(f; \alpha)$ 、 $\gamma_q(f; \alpha)$ は地表面に対する加速度スペクトル振幅の低減率である。

α は一般に未知であるから、式(1)、(2)は近似的にしか成立しない。そこで、未知変数ベクトル α を推定する問

題を、つぎの目的関数を最小化する最適化問題として表す。

$$S(\alpha) = \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha) - U_{pq}(f_j)\}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

ここに、 f_j は対象とする周波数帯を分割したときの j 番目の周波数点であり、 N_f はそれらの周波数点の総数である。また、 $U_{pq}(f_j; \alpha)$ および $U_{pq}(f_j)$ は次式で与えられる。

$$U_{pq}(f_j; \alpha) = |\gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha)| \quad (4)$$

$$U_{pq}(f_j) = |X_p(f_j) / X_q(f_j)| \quad (5)$$

式(4)における $\gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha)$ は一種の周波数応答関数である。式(3)の目的関数は、観測記録から推定された周波数応答関数の振幅とその理論値との残差平方和として表されている。また、地中あるいは地表の3点以上で鉛直アレー観測記録が得られている場合には、それらを同時に取り込んだ目的関数を用いることもできる。たとえば、 p 、 q および r の3点 ($p < q < r$)で地盤震動記録が得られている場合には、次式の目的関数が用いられる。

$$S(\alpha) = \sum_{k=p,q} \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{kr}(f_j; \alpha) - U_{kr}(f_j)\}^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

このように、式(3)または(6)を最小化することによって、最も深い位置にある観測点から地表までの地盤各層のS波速度およびQ値を推定することができる。

3. 未知変数の推定精度評価法¹⁵⁾

式(5)の $U_{pq}(f_j)$ 、 $j = 1, 2, \dots, N_f$ を観測値と見なし、観測値に誤差 ε が含まれているものとし、 ε は偶然誤差で相関がなく、次式で表されるものとする。

$$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{N_f}\}^T \quad (7)$$

$$E\{\varepsilon_i\} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N_f) \quad (8)$$

$$E\{\varepsilon_i \varepsilon_j\} = \begin{cases} \sigma^2 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (9)$$

このとき、未知変数 α_i の推定値の分散 $\sigma^2_{\alpha_i}$ は誤差伝播法則より次式で表される。

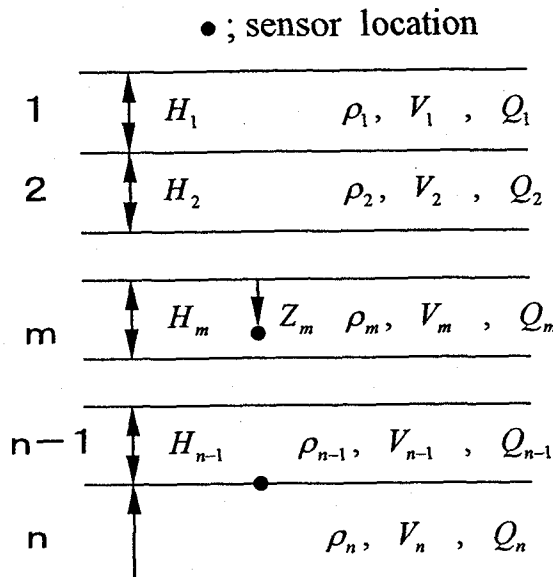


図-1 水平成層地盤モデル

$$\sigma_{\alpha_i}^2 = m_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1} \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{A}$ は $a_{jk} = \partial U_{pq}(f_j; \alpha_e) / \partial \alpha_k, j=1,2,\dots,N_f, k=1,2,\dots,N$ を係数とする行列である。 α_e は未知変数の推定値を表す。 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}$ は $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ の逆行列における第 i 行第 i 列の係数を表す。また、観測誤差の分散の不偏推定量 m_0^2 は次式で表される¹⁵⁾。

$$m_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha_e) - U_{pq}(f_j)\}^2}{N_f - N} \quad (11)$$

観測点の数が 3 個の場合でも、式(10)で評価できるが、 $\mathbf{A}$ の係数および m_0^2 として次式が用いられる。

$$1) a_{jk} = \partial U_{pr}(f_j; \alpha_e) / \partial \alpha_k, k=1,2,\dots,N,$$

$$j=1,2,\dots,N_f$$

$$2) a_{jk} = \partial U_{qr}(f_{j-N_f}; \alpha_e) / \partial \alpha_k, k=1,2,\dots,N,$$

$$j=N_f+1, N_f+2, \dots, 2N_f$$

$$m_0^2 = \frac{\sum_{k=p,q} \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{kr}(f_j; \alpha_e) - U_{kr}(f_j)\}^2}{2N_f - N} \quad (12)$$

4. センサーの最適配置基準

未知変数の推定値の分散はセンサーの配置によって異なる。したがって、センサーの最適配置基準として、未知変数の分散、標準偏差もしくは変動係数のうちいずれかの和を最小にすることが考えられる。未知変数によって、その大きさがかなり異なるような問題においては、変動係数を用いた方が、それぞれの未知変数の推定誤差を同等に評価できるという意味において妥当と思われる。本研究では、次式の評価関数を設定し、これを最小化する基準を用いる。

$$T(y) = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{\alpha_i}(y)}{\alpha_i} / N \quad (13)$$

ここに y は、センサーが 2 個の場合に、地表に近い方のセンサーの位置を表す未知変数であり、地表からの深度を表す。他方のセンサーは、一般に同定の対象となる地下構造の最深部に設置されるので、これについては固定と考えてよい。未知変数 α_i の標準偏差 σ_{α_i} は式(10)から明らかにようにセンサーの配置によって異なり、式(13)の右辺の $\sigma_{\alpha_i}(y)$ は α_i が y の関数であることを表している。センサーが 3 個の場合は次の評価関数が用いられ

る。

$$T(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{\alpha_i}(y_1, y_2)}{\alpha_i} / N \quad (14)$$

ここに y_1, y_2 は、それぞれ地表に近い 2 個のセンサーの位置を表す未知変数である。上式の右辺の $\sigma_{\alpha_i}(y_1, y_2)$ も未知変数 α_i の標準偏差 σ_{α_i} が y_1, y_2 の関数であることを表しており、式(10)により計算される。

センサーの最適配置を考えるとき、実際の観測記録にどのような誤差が含まれているかを知ることは重要である。ここでいう誤差とは、鉛直アレー観測記録のスペクトル比と周波数応答関数との残差をいい、測定誤差の他に地盤のモデル誤差、同一層内の不均一性、鉛直方向以外からの波の入射などから生じる誤差も含める。それが実際にどのようなものであるかを特定することは容易ではない。ここでは前節と同様に、観測記録に含まれる誤差はすべて偶然誤差で相関がなく、どの深さの記録を用いても式(11)における観測誤差の分散が同一であるという仮定を設ける。このとき式(13)は次式で表される。

$$T(y) = C \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}}}{\alpha_i} / N \quad (15)$$

上式の C は定数であり、センサーの位置 y にかかわらず一定であるから、式(15)の $\sum \sqrt{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}} / \alpha_i / N$ が最小となるように y を決定することになる。センサーの数が 3 個の場合も同様である。

以下では、図-2 に示す水平成層地盤モデルを用いて、地表に近い側のセンサーの最適配置について行った数値計算の結果を述べる。なお、 Q 値は周波数によらず一定としている。

2 個のセンサーのうち、一方は G.L.-20m に固定し、他方のセンサーの設置深さ y を、地表から G.L.-19m まで 1m 間隔で変えて、式(15)の $T(y)$ の値を計算した。対象とする周波数帯は 0.1~10Hz、周波数点の総数を 100 とした。ただし、式(15)における C の値はすべて 1.0 としている。図-3 は G.L.-20m に対する地表の周波数応答関数を表

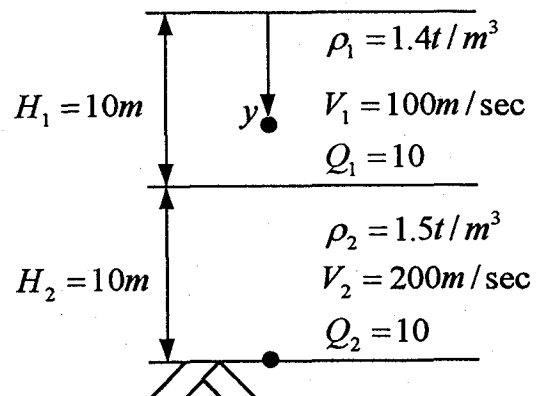


図-2 解析モデル

す。表-1および表-2にそれぞれS波速度およびQ値に対する変動係数とその平均値すなわち $T(y)$ の値を示

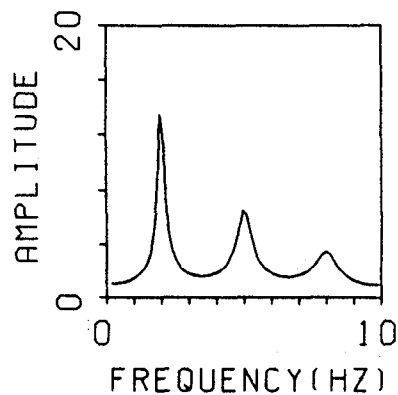


図-3 G.L.-20m に対する地表の周波数応答関数

す。図-4および図-5は、それぞれ $T(y)$ の値を図にしたものである。これより、S波速度、Q値とも、 $T(y)$ は同様の傾向を示していることがわかる。この結果からセンサーは、地表またはG.L.-7mあたりに設置するのが適当であると判断できる。図-6は、地表から地下20mまでの構造のみ考えて計算した1~3次の基準化された振動モードであるが、3次モードの節に相当するG.L.-3mおよびG.L.-9mあたりで $T(y)$ が大きく現れている。振動モードの節の付近にセンサーを設置してもそのモードによるゆれが小さいために、同モードにかかわる情報が検知され難いためであろう。これは、高次モードがセンサーの最適配置に重要な役割を果たすとする吉田らの指摘¹²⁾とも対応する結果になっている。本研究で提案した方法は、このような振動モードの影響を特に意識しなくても自動的に組み込んだものになっていると考えられる。

表-1 S波速度の $T(y)$ 値

y (m)	V_1 の 変動係数	V_2 の 変動係数	$T(y)$
0	0.01680	0.02205	0.01943
-1	0.01883	0.02440	0.02163
-2	0.02803	0.03537	0.03170
-3	0.06130	0.07786	0.06958
-4	0.03763	0.05296	0.04530
-5	0.01972	0.03220	0.02596
-6	0.01396	0.02466	0.01931
-7	0.01352	0.02201	0.01777
-8	0.01631	0.02232	0.01932
-9	0.02417	0.02811	0.02614
-10	0.02081	0.02507	0.02294
-11	0.02127	0.02605	0.02366
-12	0.02236	0.02787	0.02512
-13	0.02387	0.03029	0.02708
-14	0.02600	0.03356	0.02978
-15	0.02906	0.03812	0.03359
-16	0.03349	0.04459	0.03904
-17	0.04022	0.05422	0.04722
-18	0.05315	0.07160	0.06238
-19	0.09542	0.12432	0.10987

表-2 Q値の $T(y)$ 値

y (m)	Q_1 の 変動係数	Q_2 の 変動係数	$T(y)$
0	0.21680	0.29480	0.25580
-1	0.24320	0.32593	0.28457
-2	0.36836	0.47542	0.42189
-3	0.76994	0.97619	0.87307
-4	0.65970	0.91306	0.78638
-5	0.32111	0.49950	0.41037
-6	0.25303	0.41357	0.33330
-7	0.26111	0.39467	0.32789
-8	0.38717	0.48512	0.43617
-9	0.84928	0.88660	0.86794
-10	0.66207	0.64801	0.65504
-11	0.56086	0.55677	0.55887
-12	0.48752	0.49708	0.49230
-13	0.44114	0.46637	0.45376
-14	0.42002	0.46282	0.44142
-15	0.42805	0.49147	0.45976
-16	0.48014	0.57022	0.52518
-17	0.61401	0.74491	0.67946
-18	0.92594	1.14162	1.03378
-19	1.87682	2.36324	2.12003

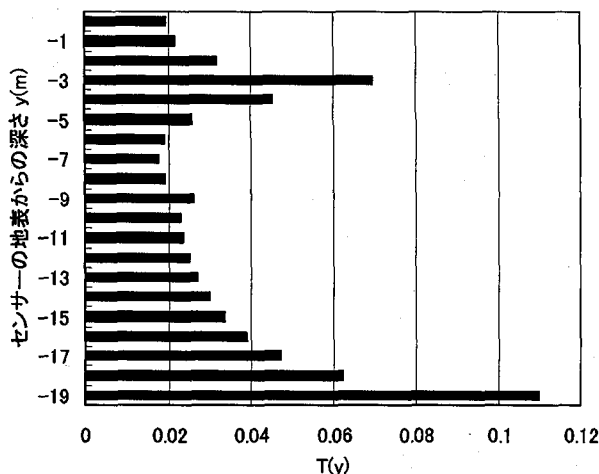


図-4 S波速度の $T(y)$ 値

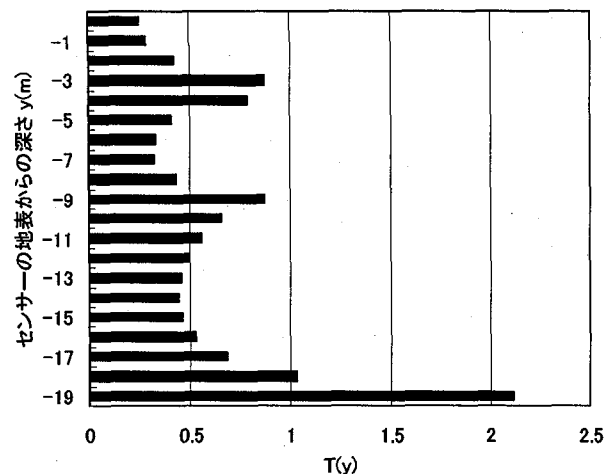


図-5 Q値の $T(y)$ 値

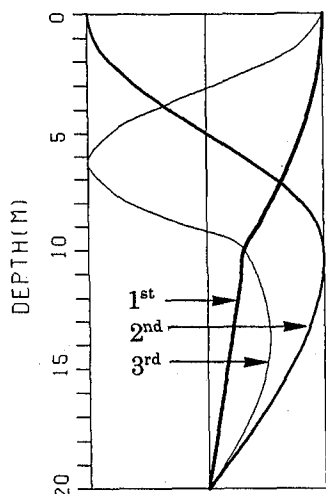
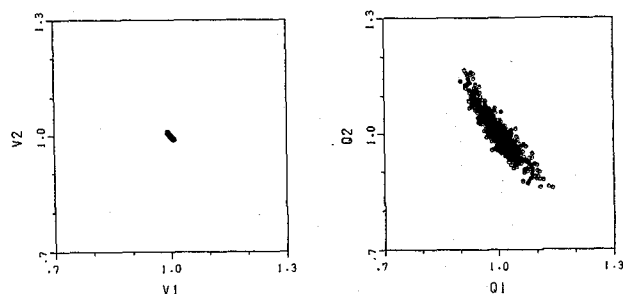


図-6 基準化された振動モード



(a)S波速度

(b)Q値

図-7 真値で基準化した1000組の未知変数の推定値

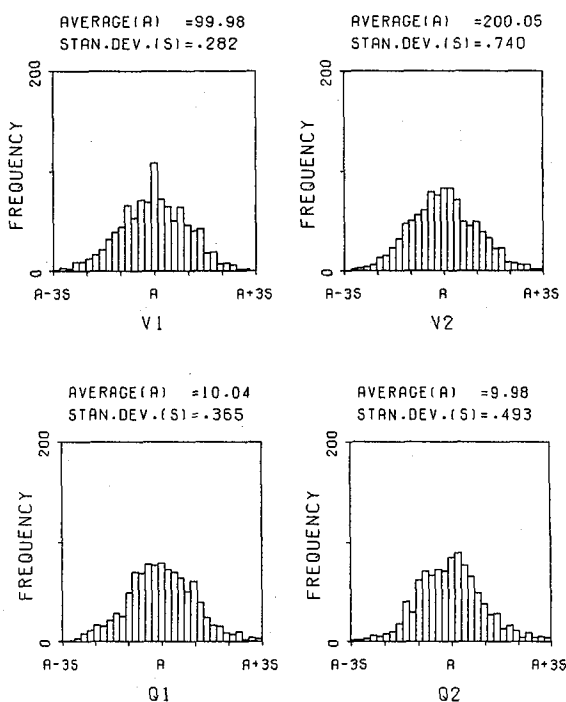


図-8 未知変数の推定値の頻度分布

つぎに、上述の計算結果をモンテカルロ法による結果と比較する。図-2に示す水平成層地盤モデルに対して、センサーがG.L.-20mと地表から y の深度にあるものとし、次の手順で計算を行う。

- ①G.L.-20mにおける地震動加速度を有帯域ホワイトノイズ(帯域幅 0.1~10Hz, 最大加速度 50gal)として作成する。
- ②SH波の重複反射理論¹⁹⁾を適用し、地表から y の深度での加速度を計算する。これに、r.m.s強度が地表加速度のその10パーセントとなる別の有帯域ホワイトノイズ(帯域幅 0.1~10Hz)を観測ノイズとして付加する。
- ③式(3)を改良SLP法²⁰⁾を用いて解き、S波速度およびQ値の収束値を得る。
- ④②および③を1000回繰り返す。ただし、②において、付加する観測ノイズはすべて異なる。
- ⑤1000回の計算で推定されたS波速度およびQ値の収束値の変動係数を求める。
- ⑥②~⑤を、 y が0,1,2,...,19の場合について繰り返す。 $y=0m$ とした場合の1000組のS波速度およびQ値の収束値をそれぞれ図-7の(a)と(b)に示す。図は、それぞれ横縦の軸を(V_1, V_2)および(Q_1, Q_2)とし、推定値はそれぞれの真値で基準化されている。図-8に各未知変数の収束値の平均、標準偏差および頻度分布を示す。このようにして得られた結果をまとめ、S波速度およびQ値に対する変動係数とその平均値をそれぞれ表-3および表-4に示す。図-9および図-10は、変動係数の平均値を図にしたものである。

図-4、5および図-9、10を比較すると、ほぼ同じ傾向が得られており、モンテカルロ法を用いないでも、式(15)で未知変数の推定誤差の変動係数を評価でき、これよりセンサーの最適配置を決定することが可能であることがわかる。

5. センサーの最適配置問題へのGAの適用

一つのセンサー位置を決める問題であっても、図-4および図-5に示すように、評価関数の形状は単純ではない。いくつかの局所解を持っていることがわかる。したがって、その位置を決めるべきセンサーの数が増えた場合に、問題はさらに複雑になり、センサーの位置を順次変化させて $T(y)$ 値を比較するような直接的な方法を用いることは困難になる。そこで、大規模な問題にも適用できるようにセンサーの配置の問題を、式(15)を最小化する最適化問題と考え、これに数理計画法などを適用して解くことが考えられる。しかし、前述のように局所解を多く含む評価関数になっているため、勾配法的手法を適用するのは不適切である。本研究では、初期値の影響を受けにくいGA(遺伝的アルゴリズム)を適用する。

以下では、図-2に示す水平成層地盤モデルにおいて、合計3個のセンサーを、1個はG.L.-20mに設置するもの

表-3 モンテカルロ法によるS波速度の変動係数

y (m)	V ₁ の 変動係数	V ₂ の 変動係数	変動係数の 平均値
0	0.00282	0.00370	0.00326
-1	0.00316	0.00410	0.00363
-2	0.00465	0.00592	0.00529
-3	0.01105	0.01368	0.01237
-4	0.00667	0.00939	0.00803
-5	0.00326	0.00519	0.00423
-6	0.00234	0.00392	0.00313
-7	0.00224	0.00348	0.00286
-8	0.00269	0.00360	0.00314
-9	0.00395	0.00471	0.00438
-10	0.00355	0.00418	0.00386
-11	0.00361	0.00430	0.00400
-12	0.00380	0.00461	0.00420
-13	0.00406	0.00503	0.00455
-14	0.00444	0.00561	0.00503
-15	0.00498	0.00640	0.00569
-16	0.00576	0.00750	0.00663
-17	0.00701	0.00916	0.00808
-18	0.00943	0.01230	0.01086
-19	0.03715	0.02193	0.02954

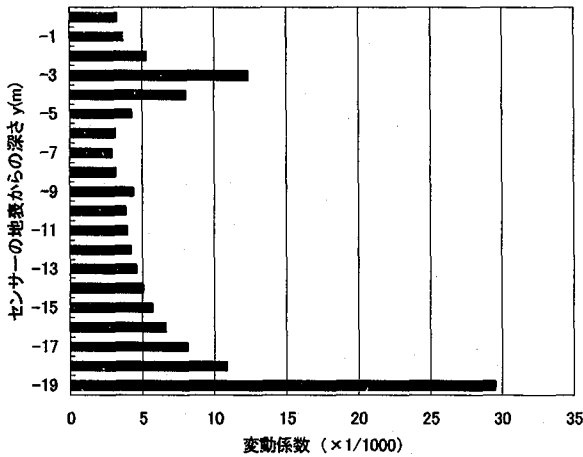


図-9 モンテカルロ法によるS波速度の変動係数

とし、残る2個のセンサーの最適配置問題を考える。
解析条件を以下に述べる。

- 1) 個体群の設定
2個のセンサーの設置深さ(y_1 , y_2)の初期値(第1世代)の組み合わせとして、50組を用意する。十進法で表すと、 y_1 については1.0mから9.0mまで2m刻みの値とし、 y_2 については0から18.0mまで2m刻みの値とする組み合わせを用いる。遺伝子列の長さとしては y_1 , y_2 にそれぞれの分解能を0.1mとして8ビット使用するものとし、合計16ビットとした。
- 2) 繁殖・淘汰
それぞれの遺伝子列について適応度を計算し、適応度の最も低い2個の遺伝子列を適応度の最も高い2個の遺伝子列に置き換える方式を採用する。
- 3) 交叉
交叉率は0.6とした。交叉方法は2点交叉とし、16ビ

表-4 モンテカルロ法によるQ値の変動係数

y (m)	Q ₁ の 変動係数	Q ₂ の 変動係数	変動係数の 平均値
0	0.0365	0.0493	0.0429
-1	0.0411	0.0546	0.0479
-2	0.0634	0.0808	0.0721
-3	0.1289	0.2185	0.1737
-4	0.1033	0.2371	0.1702
-5	0.0529	0.0932	0.0731
-6	0.0429	0.0747	0.0588
-7	0.0442	0.0697	0.0570
-8	0.0649	0.0924	0.0787
-9	0.1446	0.2513	0.1980
-10	0.1078	0.1441	0.1260
-11	0.0920	0.1114	0.1017
-12	0.0805	0.0938	0.0872
-13	0.0733	0.0855	0.0794
-14	0.0704	0.0831	0.0768
-15	0.0724	0.0875	0.0800
-16	0.0827	0.1032	0.0930
-17	0.1081	0.1403	0.1242
-18	0.1693	0.2582	0.2138
-19	0.4089	0.6625	0.5357

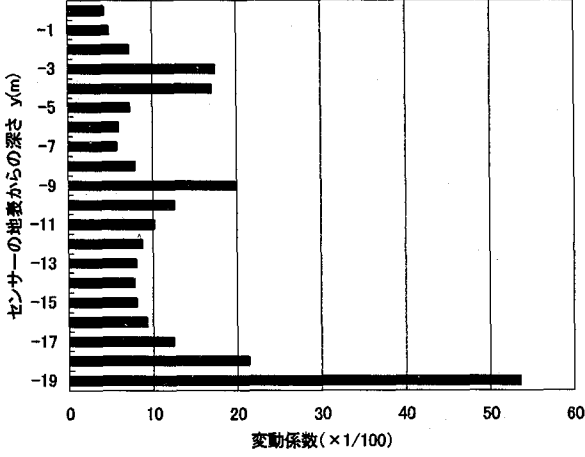


図-10 モンテカルロ法によるQ値の変動係数

ットの遺伝子列の4ビットずつに分割し、前半の8ビットについては5～8ビットの部分を交叉し、後半の8ビットについては交差する部分を50パーセントの確率で前の部分の9～12ビットもしくは後の部分の13～16ビットとする。

- 4) 突然変異
突然変異率は0.1とし、ランダムに選ばれた遺伝子列において、さらにランダムに選ばれたビットの値(1と0)を入れ替える。
 - 5) 世代数
世代数は100とする。
 - 6) その他
2個のセンサーの設置位置が極端に近いのは非現実的であることから、 y_1 と y_2 の差が1m未満になった場合は、適応度の低い値を与える。
- 以上の条件で、S波速度の推定誤差を最小化する基準を

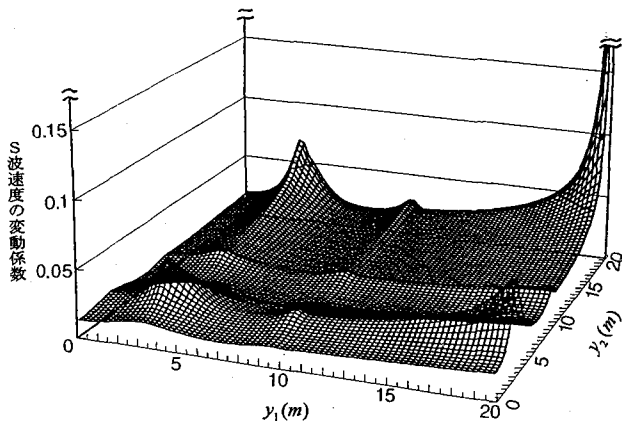


図-11 y_1 , y_2 に対する評価関数の3次元表示

用いて解析した結果、最適解として $y_1=6.9\text{m}$, $y_2=0.0\text{m}$ が得られた。図-11 は、 y_1 , y_2 に対する評価関数を3次元的に表しているが、概ね良好な解が得られていることがわかる。さらに詳細に検討するために、図-11において、 $y_2=0.0\text{m}$ を固定し、 y_1 の変化に対する評価関数の値を表したのが図-12 である。 $y_1=7.0\text{m}$ 付近で評価関数が最小となっており、前述の解析結果が妥当であることがわかる。

6. まとめ

地盤構造の同定を主たる目的として地震計の鉛直アレー配置を計画する際、限られた数の地震計で精度の高い同定結果を得るための最適配置について考えた。

以下に本研究によって得られた結果を要約する。

- 1) 地盤震動の鉛直アレー観測記録のスペクトル比とその計算値との残差を観測誤差と考え、地盤各層の S 波速度および Q 値の推定誤差の変動係数を誤差伝播法則から誘導し、これを最小化するように地震計の配置を決定する方法を示した。
- 2) 観測誤差がホワイトノイズで、その r.m.s 強度は地震計が設置されている深度にかかわらず一律と仮定して、提示した方法とモンテカルロ法による数値計算結果を比較し、両者がよく対応することを明らかにした。
- 3) 地震計最適配置の問題を、S 波速度および Q 値の変動係数を評価関数とする最適化問題として扱えること、また、このとき評価関数が一般に局所解を多く有する複雑な形状となることから、最適化手法として初期値の影響を受けにくい GA の適用が妥当であることを指摘し、数値計算を行った。

参考文献

- 1) 太田裕；地震工学への最適化手法の適用－1. 八戸港 SMAC 設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文

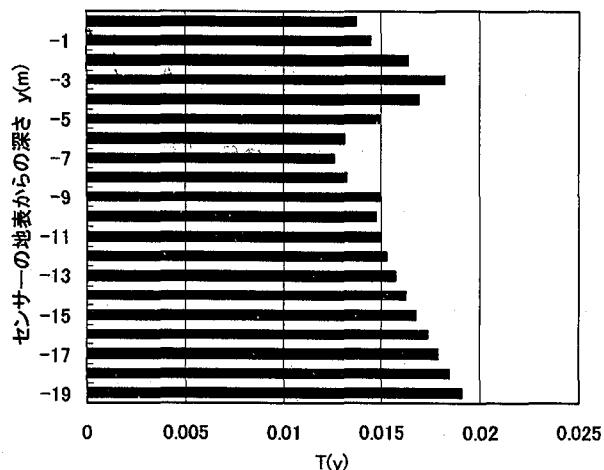


図-12 $y_2=0.0\text{m}$ を固定しての y_1 軸に沿った評価関数

報告集, 第229号, pp.35-41, 1975.

- 2) TSUJIHARA, O. and SAWADA, T.; A Localized Identification of Dynamic Soil Properties of Subsurface Layers in Ground by Vertical Array Records, Proc. of 11 W.C.E.E. in CD-ROM, 1996.
- 3) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明; ポアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的特性, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp.19-28, 1994.
- 4) 服部哲, 西川啓二, 沢田勉, 平尾潔; 鉛直アレー観測記録により同定した Q 値の周波数依存性に関する一考察, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.109-112, 1997.
- 5) 鬼丸貞友, 吉澤睦博, 杉本三千雄, 本城勇介; 地震アレー観測記録に基づく動的地盤定数の拡張ベイズ法による逆解析, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.101-104, 1997.
- 6) 栗田哲史, 吉田郁政, 安中正, 山本みどり; 鉛直アレー観測記録を用いたポートアイランド表層地盤の地盤特性の同定, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1087-1088, 1996.
- 7) 安中正, 都築富雄, 増田民夫, 嶋田昌義, 岡留孝一; 鉛直アレー観測記録から推定した表層地盤の剛性率及び減衰定数のひずみ依存性, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.493-498, 1994.
- 8) 國生剛治, 松本正毅, 青柳寮大, 高橋佳宏, 本間昌幸, 本山隆一; 兵庫県南部地震の鉛直アレー観測記録によるサイトの非線形増幅特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.999-1004, 1998.
- 9) 野澤貴, 石田寛; 鉛直アレー地震観測記録を用いた地盤定数の評価に関する一考察, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1241-1244, 1998.
- 10) 古賀威信; 地盤のせん断波速度と減衰の同定に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1089-1094, 1998.

- 11) KURITA,T. and MATSUI,K. : Sensitivity Analysis on Measurement noise in the Identification of Soil Properties from Vertical Array Observation Data, E.E.S.D, Vol.26,pp.951-965,1997.
- 12) 吉田郁政, 佐々木卓也, 星谷勝; 逆解析によって推定されたモデルの信頼度と最適観測点位置, 応用力学論文集, Vol.1, pp.109-116, 1998.
- 13) 吉田郁政, 豊田耕一, 星谷勝; 2次元 FEM を用いた確率論に基づく逆解析の定式化とその解放, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.129-136, 1995.
- 14) R.H.Gallagher and O.C.Zienkiewicz (川井忠彦, 戸川隼人監訳), 最適構造設計—基礎と応用—, 培風館, pp.61-62, 1977.
- 15) 辻原治, 沢田勉; 鉛直アレー観測記録を用いた地盤のS波速度とQ値の同定精度に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.801-808, 1999.
- 16) P.C.Shah and F.E.Udwadia;Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Structures, Transaction of ASME, Vol.45, 1978.
- 17) 栗田哲史, 松井邦人, 新延泰生; 模型振動実験データを用いたせん断多層モデルの構造パラメータ同定, 応用力学論文集, Vol.1, pp.75-82, 1998.
- 18) 古田均, 杉本博之; 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, pp.1-31, 1997.
- 19) 土岐憲三; 新体系土木工学 11 建造物の耐震解析, 技報堂出版, pp.80-81, 1982.
- 20) 沢田勉, 辻原治, 平尾潔, 山本英史; 地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用, 土木学会論文集, No.446/I-19, pp.205-213, 1992.

(1999年9月17日受付)