

# 重力及び微動データの併合処理による 2次元地盤構造の高精度推定のための基礎的研究

坂井 公俊<sup>1</sup>・盛川 仁<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科大学院生  
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: sakaik@enveng.titech.ac.jp

<sup>2</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授  
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

地盤構造の不整形性を詳細に把握するために、微動のアレイ観測から得られる位相速度を用いて地盤構造を推定することがしばしば行なわれている。位相速度はP波速度や密度に対して感度が低いため、妥当と考えられる適当な値を既知量として与えて解析されることが多い。しかし、密度の値を正しく与えていないことにより、推定された速度構造が真のものとは異なっている場合がある。本研究ではこのことを簡単な数値計算例を通して示した上で、この問題の一つの解決法として、地盤の密度構造を表す重力データと微動データとを併合処理することにより、地盤の速度構造と密度構造の推定精度を向上させる手法を提案する。その上で提案手法の妥当性を示すために数値実験を行なった結果、非常に精度良く地盤構造を推定可能であることが確かめられた。

*Key Words* : joint inversion, gravity data, microtremor array data, subsurface structure, geophysical exploration

## 1. はじめに

地盤の三次元形状がその地域での震動特性に大きな影響を与えるということは、過去の研究からも広く認知されている(例えば、川瀬・林<sup>1)</sup>)。このため、地盤構造の不整形性を詳細に把握しておくことは、地震防災を考える上で非常に重要である。地盤構造を推定する手法としては、人工地震探査法<sup>2)</sup>、微動探査法<sup>3)</sup>、重力探査法<sup>4)</sup>など数多く存在する。しかし、人工地震探査は、良い精度で構造を推定できるが、観測が大がかりとなりがちで、手軽にどこでも実施出来るわけではない。一方、微動探査や重力探査では観測はある程度容易であるが、パラメータの設定に自由度があるため、地盤構造を一意に決定することが難しい場合がある。

そこで本研究では、コストをかけずにある程度地盤構造を精度良く推定することを目的として、比較的容易に観測可能である重力と微動のデータを併合処理することで、地盤構造の推定精度を高め得る手法の開発を行なう。

## 2. 既往の解析手法の特徴と問題点

地盤構造を推定するためにはいくつかの手法が考えられる。最も原始的で分かりやすい方法は、ボーリン

グやPS検層などの直接的な手法である。しかし、この手法を基盤岩深度が数kmに及ぶような地域で適用することは、主にコスト的な問題で困難である。その為、反射法や屈折法といった地震探査法がしばしば用いられているが、上に述べた通り一般にこれらの方法はシステムが大掛かりになって非常にコストがかかること、人工地震を発生させるために都市内での実施が難しい場合があることなどの問題がある。そこで、地盤上で比較的容易に観測することが可能な微動や重力異常を用いて地盤構造を推定する手法が多数検討されている。

また、重力値を他の物理量と併合処理して地盤モデルの精度を高めようという試みはAfnimar<sup>5)</sup>らが屈折法探査との併合処理を行っており、よい結果を得ている。しかしこの手法では、密度とS波速度の間の回帰式を用いてS波速度と密度に1対1の対応付けを行なって解析しており、後に述べるような密度の推定精度に関わる問題点を含んでいる可能性がある。重力と微動の併合処理については、両者から求められる地盤構造の整合性に考慮した地盤モデルの作成なども行なわれているが、微動アレイ観測結果を重力基盤構造を推定する際の制約条件として用いるといった方法に限定されている(例えば、Komazawa *et al.*<sup>6)</sup>)。以下では、密度の推定精度の重要性について簡単な計算例を用い

て述べ、密度構造に着目した重力と微動データの併合処理の必要性を明確にする。

微動のアレイ観測記録から求められた表面波の位相速度を用いることにより、地盤の構造をある程度、精度良く推定する方法は広く用いられている。この位相速度を満足する地盤構造を求める際には、地盤のパラメータとして、層厚、密度、S波速度、P波速度を未知数として逆解析を行わなければならない。しかし、実際に逆解析を行なう場合には、位相速度に対する感度が高い層厚とS波速度のみを未知数として考え、密度やP波速度に関しては、S波速度との回帰式などを用いてS波速度の値に併せて変化させたり、最初から定数を与えることで直接的な未知数とせずに逆解析を行なう場合が多い(例えば、山中・石田<sup>7)</sup>)。

密度は位相速度に対して非常に感度が低いにも関わらず、逆解析によって最終的に得られる速度構造が大きく異なる場合がある。すなわち、上記のように密度を取り扱って解析を行なうと、S波速度と密度の回帰式のばらつきが非常に大きいため、密度を正しく推定出来ず、正しい地盤構造に解が収束していない場合があると考えられる。以下にその簡単な例を示す。

Table 1 に示す簡単な地盤構造を与え、この地盤モデルに対する基本モードのレイリー波の理論分散曲線を求めた<sup>8)</sup>。この位相速度のうち、周波数0.1–1.5Hzの間で23個のデータを取り出し、これを観測値とみなして地盤構造を逆解析によって推定した。このとき、密度の値は事前に与えた値を既知量として用いることとし、Case1では真の値を、Case2では各層の密度に真値よりも0.2t/m<sup>3</sup>大きな密度を与えた場合を模擬している。また、P波速度については以下に示す回帰式<sup>9)</sup>

$$V_P = 1.11V_S + 1290 \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

を用いてS波速度から求めるものとして、未知パラメータはS波速度  $V_S$  及び層厚  $H$  のみとしている。

逆解析の手順としては、地盤モデルから計算される理論位相速度と観測値の差の二乗和を式(2)のように定義し、これを最小とするパラメータを準ニュートン法<sup>10)</sup>によって探索した。このとき、制約条件としては、各未知パラメータが非負という条件のみを与えた。すなわち、

$$\sigma^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [C_{obs}(f_i) - C_{cal}(f_i)]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

とする  $V_S, H$  を求める。ここで  $f_i$  は位相速度を与える  $i$  番目の振動数、 $K$  は観測によって得られた位相速度を与える振動数の個数、 $C_{obs}(f_i), C_{cal}(f_i)$  は、それぞれ位相速度の観測値、及び地盤モデルから計算される理論値である。

この計算の初期モデルを Table 2 に、この初期モデルを与えて得られた構造を Fig.1 に、そのときの構造から求められる理論分散曲線を Fig.2 に示す。

Fig.2 において式(2)で求められる誤差は Case 1 で  $\sigma^2 = 0.1$ 、Case 2 で 0.35 となり、ターゲットとしている位相速度の値(約350–2500m/s)と比較してどちらも

Table 1 観測値を作成するために用いた地盤パラメータ

Layer	$V_S$ (m/s)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	H(m)
1	350	1678.5	1.7	200
2	650	2011.5	2.0	300
3	1200	2622.0	2.2	500
4	3000	4620.0	2.7	$\infty$

Table 2 逆解析を行なう際の初期モデル

Layer	$V_S$ (m/s)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )		H (m)
			Case1	Case2	
1	500	1845	1.7	1.9	500
2	1000	2400	2.0	2.2	500
3	2000	3510	2.2	2.4	500
4	3000	4620	2.7	2.7	$\infty$

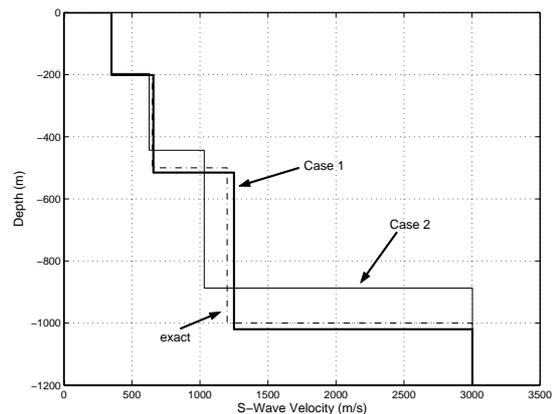


Fig.1 逆解析により求められた構造

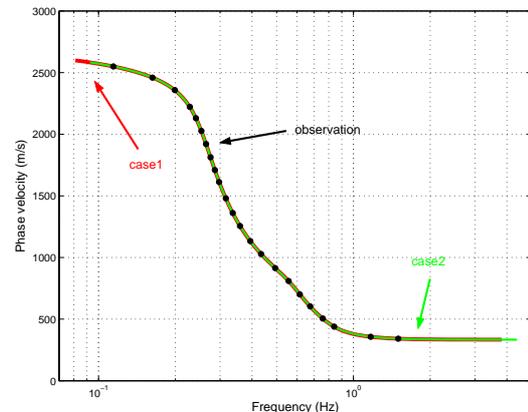


Fig.2 逆解析により求められた理論分散曲線

十分に小さく、地盤モデルとしては収束しているといえる。しかし Fig.1 を見ると、Case 1 では、ほぼ正しい構造を求めることが出来ているのに対して、Case 2 に関しては、正解の構造と大きく異なっている。これより、密度を正しく見積もることが、正確な地盤構造を推定するには必要不可欠であるということが分かる。即ち上の結果は、従来の解析法においてしばしば行なわれているように密度の値を事前に定数として与えておき、未知数をS波速度と層厚のみとして逆解析を行なった場合、密度の値を正しく評価していないために、間違った地盤構造を得てしまう可能性があることを意味している。

また、微動探査と並んで有効な地盤推定法として知

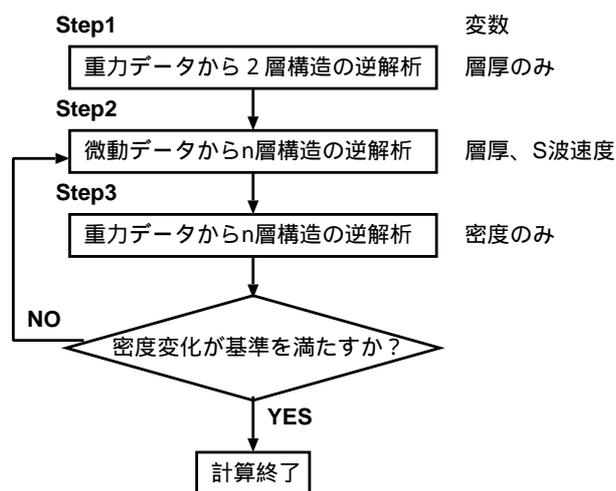


Fig.3 逆解析フロー

られている手法に、重力探査がある。重力探査から得られる重力異常は、地下構造による密度の不均質性から生じる擾乱場を表している。よって、地盤の不均質構造から生じる重力異常を逆解析することによって、地盤構造を求めることが出来る。しかし、重力異常から求められるのは、地盤の速度構造ではなく密度構造である、二層構造の推定は比較的容易に出来るが、多層構造の推定はパラメータの自由度が高く、推定結果の妥当性の判断が困難である、などの問題点がある。

以上をまとめると、微動データからは、速度構造まで含んだ地盤の成層構造を求めることが出来るが、密度を正しく見積もることが難しい。逆に重力データから多層構造を求めることは困難であるが、密度に対する感度が高いため、密度を精度よく評価することが出来る。また、微動のアレイ観測を多数の地点で密に行なうことはコストの面から困難な場合が多いため、微動から得られる情報は深さ方向への解像度は高いが、水平方向への解像度は低い。逆に重力の観測は比較的容易であり、空間的に密に重力値を得ることが出来るため、重力から得られる情報は、水平方向への解像度を持つが、深さ方向へはそれほど高い解像度を持たない。

そこで本研究では、これら二つの手法の長所を活かして微動データと重力データを同時に逆解析することにより、より精度の高い構造を推定する手法についての提案とその妥当性に関する基礎的検討を行なう。

### 3. 重力・微動データ併合処理の方法

既に述べたように、微動データからはP波、S波速度を考慮した多層構造が得られ、重力データからは密度構造を求めることが出来る。この両者の利点を活かして、Fig.3に示す解析手順に従って逆解析を行なう。

まず、Step1として重力観測によって得られたブーゲー異常値から、地盤を基盤と堆積層の2層構造と仮定して逆解析を行ない、密度構造を求める。

次にStep2として堆積層を  $n-1$  層に分け、密度を固定し、微動データから得られる位相速度に合うように逆解析を行ない、各層厚、S波速度を求める。この

時、堆積層の密度は全て等しく、重力解析に用いた密度とし、P波速度はS波速度との回帰式から求める。

Step3として微動解析から得られた層厚を固定して、重力異常値の逆解析により、観測された重力データを説明する各堆積層の最適な密度を求める。得られた密度と計算前の値とを比較し、変化がなければ計算を終了し、変化があればその密度を用いて再び微動解析を行なう。つまり、本手法は微動データから各層厚、速度構造をある程度の精度で求め、これによって得られた層構造と重力データを満足するような密度構造を求めることにより、前回の計算時より正解に近い密度構造を推定しようとするものである。これを繰り返すことにより、精度の高い地盤の速度構造及び密度構造を求めることが出来るものと考えられる。

## 4. 数値実験

### (1) 簡単な二層構造の場合

本解析手法の妥当性を評価するために、数値実験を行なう。まず、単純な例として、Fig.4に示す簡単な2層構造について本手法を適用した。

重力観測は500m毎に計11点、微動観測は1000m毎にFig.4にA-Eで示した計5点で行なったと仮定する。観測値として、重力異常値は2次元モザイクモデル解析<sup>11)</sup>によって得られる理論値を観測点に与え、位相速度に関しては、与えた地盤モデルに対して、観測点で水平成層構造を仮定して、基本モードのレイリー波の理論位相速度を求めた<sup>8)</sup>。このうち、周波数0.1-1.5Hzの間でそれぞれの観測点につき11個の周波数に対する位相速度を取り出し、観測値とした。本解析を行なう際の前提条件として、地震基盤の密度は重力基盤の密度  $2.5\text{t/m}^3$  と等しいものとし、これ以外の地盤に関する情報(堆積層厚さ、S波速度、P波速度、密度)は全て未知としている。

解析におけるStep1として、基盤岩密度  $2.5\text{t/m}^3$ 、堆積層密度  $2.2\text{t/m}^3$  を仮定し、観測によって得られたブーゲー異常を満足するような構造を逆解析によって求める。この計算では逆解析の手法として、重力の逆解析でしばしば用いられる二次元定量解析を用いた<sup>4)</sup>。二次元定量解析とは、観測により重力異常値  $g^{res}$  が得られている時の構造を求めるために繰り返し計算を行った時、第  $n$  回目の基盤標高を  $D^{(n)}$  とし、このモデルを使って二次元多層モデルから得られた重力異常値を  $\Delta g^{(n)}$  とすると、第  $n+1$  回目の基盤標高は次式によって求められる。

$$D^{(n+1)} = D^{(n)} + 0.75 \times \frac{(\Delta g^{(n)} - g^{res})}{2\pi G\rho} \quad (3)$$

この計算を繰り返し行ない、重力異常の計算結果と観測値の差の二乗和が最小となる時の基盤標高を最適解であるとした。二次元定量解析を75回繰り返した結果、得られた地盤構造をFig.5に示す。

Fig.5を見ると、基盤の傾斜方向などの変化をある程度示すことが出来ているが、密度を正しく推定できて

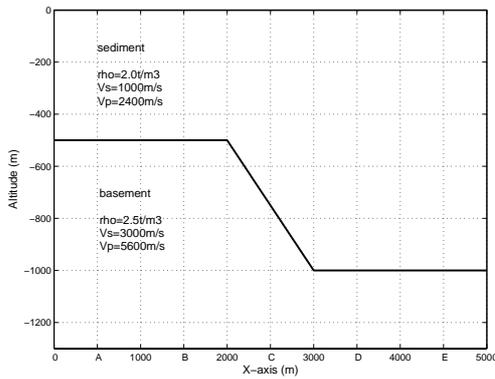


Fig.4 解析に用いた簡単な二層構造

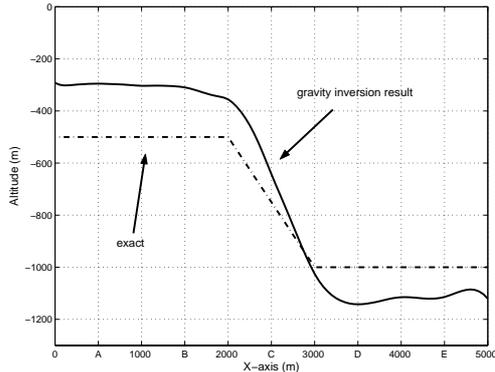


Fig.5 重力逆解析の結果 (Step1)  
(基盤岩 2.5t/m<sup>3</sup>, 堆積層 2.2t/m<sup>3</sup>)

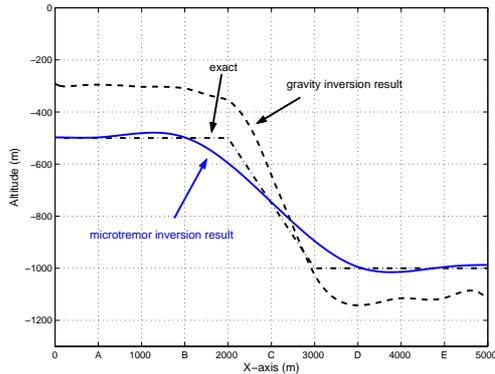


Fig.6 微動逆解析の結果 (Step2-1)

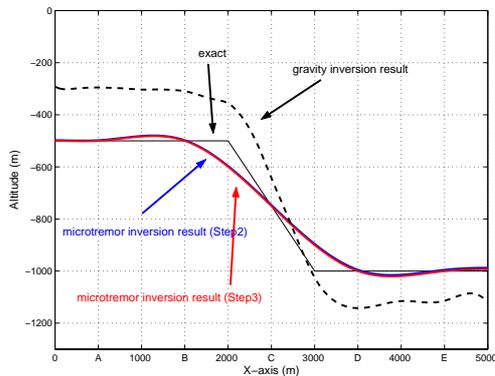


Fig.7 微動逆解析の結果 (Step2-2)

いない為、正解とは異なる構造となっていることが分かる。

次に Step2-1 として、重力の逆解析によって得られ

た構造を初期モデルとして、微動データの逆解析を行なう。ここで、”-1” は Step2 の一回目のループであることを示している。初期モデルの S 波速度, P 波速度は式 (1) 及び次式を用いて地盤の密度から推定した<sup>12)~14)</sup>。

$$\rho = 0.536 \ln V_P + 1.635 \quad (\text{Sediment}) \quad (4)$$

$$\rho = 0.319V_P + 0.76 \quad (\text{Basement}) \quad (5)$$

このようにして求めたパラメータを初期モデルとして与え、準ニュートン法を用いて逆解析を行なった結果を Fig.6 に示す。観測点間の値は 3 次の B-スプライン関数を用いて補間した。Fig.6 を見ると、ある程度正確に構造を求めることが出来ている。

Step3-1 としてこの構造を固定して、ブーゲー異常を満足するような堆積層密度を逐次二次計画法によって求める。このとき、目的関数は次式で表し、

$$\sigma^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [G_{obs}(x_i) - G_{cal}(x_i)]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

これを最小とする密度を求めた。ここで  $K$  は重力観測の観測点数を示し、 $G_{obs}(x_i)$ ,  $G_{cal}(x_i)$  はそれぞれ観測点  $x_i$  での重力異常の観測値、及び地盤モデルから計算される理論値である。ここで制約条件として堆積層の密度  $\rho$  について  $1.0 \leq \rho(\text{t/m}^3) \leq 3.0$  を与えた。その結果、密度  $\rho = 1.99\text{t/m}^3$  となり、ほぼ正確に密度を推定することが出来た。この一連の計算の結果、堆積層の密度がはじめに推定した  $2.20\text{t/m}^3$  から、このステップにおける計算結果では  $1.99\text{t/m}^3$  と大きく変化しているので、計算の終了条件を満たしていない。よってもう一度 Step2 に戻って計算を繰り返す。

つまり、堆積層密度  $1.99\text{t/m}^3$  を使って微動データの逆解析を行なった (Step2-2)。この結果を Fig.7 に示す。Step2-2 の逆解析結果は Step2-1 の結果とあまり変化が見られない。そこで、推定された構造がどの程度正解に近いのか、ということを表すために次式のように誤差の大きさ  $f_{Vs}$ ,  $f_H$  を定義して、その値によって評価する。

$$f_{Vs} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M [V_S^{ans}(x_i, j) - V_S^{inv}(x_i, j)]^2}{L \times M} \quad (7)$$

$$f_H = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{M-1} [H^{ans}(x_i, j) - H^{inv}(x_i, j)]^2}{L \times (M - 1)} \quad (8)$$

ここで、 $V_S^{ans}(x_i, j)$ ,  $H^{ans}(x_i, j)$  は、観測点番号  $i$  の  $j$  層目の  $V_S$  と  $H$  の正解値、 $V_S^{inv}(x_i, j)$ ,  $H^{inv}(x_i, j)$  は逆解析によって得られた値を表している。また、 $L$ ,  $M$  はそれぞれ観測点および層の数である。

この結果、Step2-1 から Step2-2 の解析により、 $f_{Vs}$  は 474.02 から 1.19,  $f_H$  は 15.74 から 0.039 となり、誤差が大幅に改善されていることが分かる。

次に微動解析 (Step2-2) で得られた地盤構造を満足する堆積層密度を重力データから求めた結果 (Step3-2),  $1.99\text{t/m}^3$  となり、Step3-1 の結果と変化がなかったため、計算を終了した。

以上より、本解析手法を用いることによって、密度を非常に正確に求めることが出来るため、既往の手法よりも精度良く地盤構造を推定出来る可能性があることが分かった。

## (2) より複雑な構造の場合

次に、Fig.8のように地盤がより複雑な四層構造をしている場合について本手法が適用可能かどうか、検討を行なう。観測データとして、重力データを1000m毎に13点、微動データをFig.8のA-Fに2000m毎に計6点与えた。解析手法は上記の二層の場合と同様の手順で行なう。ただし、重力解析で得られた二層構造から、微動解析を四層構造で行なう時に、初期モデルとして、堆積層厚さを三等分したものを、各層の初期厚さとして与えた。堆積層の密度に関しては、重力解析で用いた値(2.3t/m<sup>3</sup>)を三層の堆積層全てに与えた。微動解析(Step2)-重力解析(Step3)を1サイクルとして、計50回の繰り返し計算を行なった。この繰り返し計算に対する各層の密度の変化をFig.9に、式(7)、(8)で示された誤差の変化をFig.10に、最終的に得られた構造をFig.11に示す。

Fig.9を見ると、密度変化はそれぞれが大きな振動を繰り返しながら徐々に正解値に近づいていき、繰り返し9回目である程度収束し、その後は振動しながら一定の値に近づいていることが分かる。また、最終的に得られた密度の値は、正解に非常に近い。また、Fig.10に示す誤差の変化を見ると、繰り返し数が9回までは減少していき、その後は振動しながら一つの値に収束している。Fig.11を見ると、最終的にほぼ正解の構造が得られていることが分かる。このことより、本手法は複雑な構造に対しても適用可能であると言える。

ただし、この計算例では最終的に求められた密度の値は正解に近いものの、厳密に一致しているわけではない。この原因について考察を行なう。正解値が得られない理由として、微動解析を行なった後の構造モデルの補間方法に問題がある、と考えて検討する。微動解析はA-Fの6点で行なっているため、重力解析を行なう際に必要な対象地域全域の地盤構造を決定するために、何らかの補間手法を用いて測点間の構造を決める必要がある。本手法では、過去の研究などを参考に、スプライン関数による補間を行なっているが<sup>15)</sup>、この補間によって測点間の構造を正確に見積もれないことが、重力解析に影響を与えているのではないかと考えられる。つまり、たとえ微動解析によってA-Fの正解値が分かったとしても、補間作業を経ることによって、次の重力解析を行なった結果が正しい密度にはならないということが考えられる。このことは、Fig.11で微動観測点A-Fでは地盤境界深度が正確に求められているが、他の場所では必ずしもそうならないことから示唆される。

これを確認するために、スプライン補間によって正しい解が得られる地盤構造(A-FのみにFig.8と同様の地盤データを入力し、それ以外の場所での値をスプライン補間によって求めた構造)をターゲットとして問題設定し、逆解析を行なってみた。この時の繰り返し

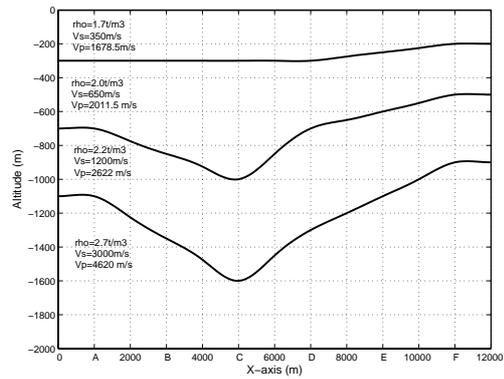


Fig.8 より複雑な地盤モデル

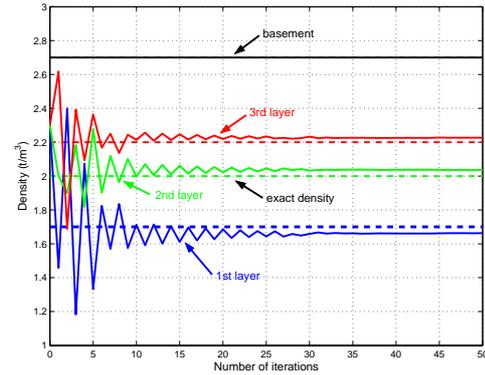


Fig.9 繰り返し計算に対する密度変化

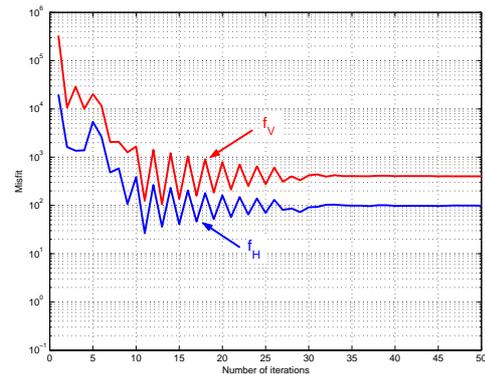


Fig.10 繰り返し計算に対する誤差変化

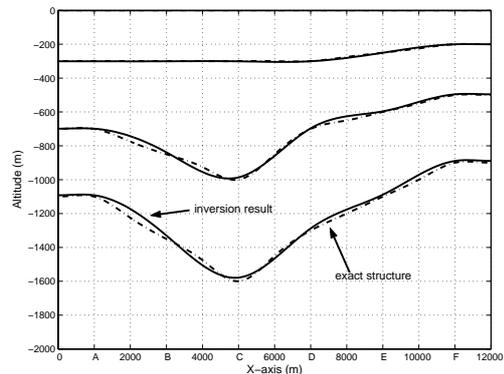


Fig.11 最終的に得られた地盤構造

計算に対する密度変化をFig.12に、誤差変化をFig.13に示す。Fig.9とFig.12を比較すると、両者は非常によく似た変化をしているが、後者の方がより厳密な解に収束している。誤差についてもFig.13の方が小さく

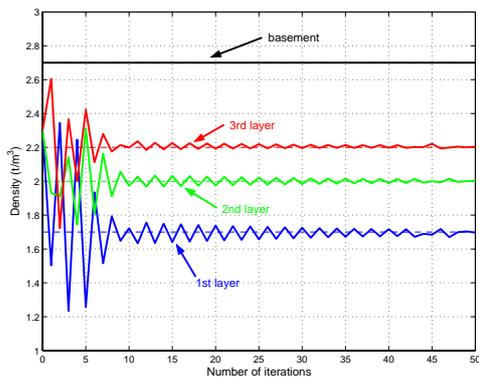


Fig.12 繰り返し計算に対する密度変化

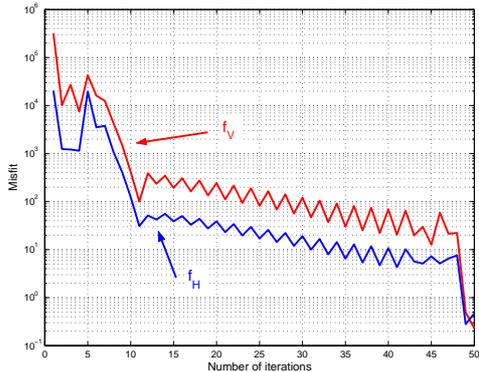


Fig.13 繰り返し計算に対する誤差変化

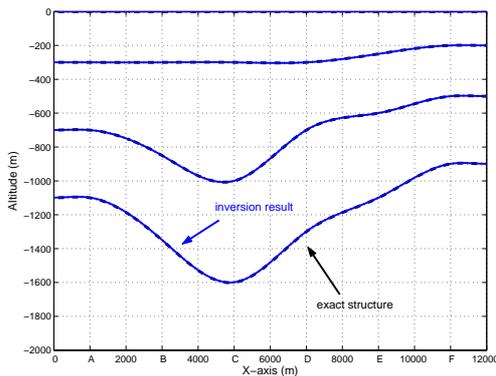


Fig.14 最終的に得られた地盤構造

なっており、正しい構造を推定できているということが分かる。Fig.14の最終的に得られた地盤構造を見ると、ほぼ正しい構造を得られている。つまり、測点間の構造をうまく補間できていれば、本手法は非常に有効であるということが分かる。

## 5. まとめ

本研究では、微動データと重力データを多段階で逆解析することによって、より精度の高い地盤構造を推定する為の解析手法を提案した。本手法の妥当性を確かめるために、簡単なモデルを用いて数値実験を行なった結果、地盤構造を正確に推定することが出来、本手法を適用することにより、地盤構造を非常に精度良く推定できる可能性があることを示した。

しかし、観測点間の構造が補間によって正しくモデ

ル化されていない場合には、密度の推定結果に誤差が生じる可能性があることも明らかとなった。既往の研究などから、地盤構造を補間する際にスプライン関数を用いれば、よく構造を説明できることが分かっているが<sup>15)</sup>、急激な地盤変化のある場所ではスプライン関数による補間では地盤を適切に表現することは難しいと考えられる。このような急激な地盤変化に対応可能な補間方法としてクリギング法なども考えられる<sup>16) 17)</sup>。本手法の精度は地盤構造の補間法の精度に依存する部分もあるため、適切な補間法を選択することは重要である。しかし本研究では手法の実現性を確認することを重視した検討を行なったため、補間法の違いによる精度の違いを検証するには到っていない。また、補間の精度が出にくいような地盤構造の急変域にあっては、観測点を密にとるなどといった対策をとることも必要であるだろう。

今後は補間法の違いによる精度の違いの検討、観測点の適切な密度、配置に関する検討を行なった上で、三次元問題への拡張や実データへの適用性について検討をすすめていく必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 川瀬博, 林康裕: 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 480, pp.67-76, 1996.
- 2) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, 1993.
- 3) Okada, H.: *The Microtremor Survey Method*, Geophysical Monograph Series, No. 12, translated by K. Suto, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA, 2003.
- 4) 駒澤正夫: 重力探査, 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, pp.433-468, 1998.
- 5) Afnimar, K., Koketsu, K., Nakagawa: Joint inversion of refraction and gravity data for the three-dimensional topography of a sediment-basement interface, *Geophys. J. Int.*, 151, pp.243-254, 2002.
- 6) Komazawa, M., H. Morikawa, K. Nakamura, J. Akamatsu, K. Nishimura, S. Sawada, Erken, A., and Onalp, A.: Bedrock Structure in Adapazari, Turkey - A Possible Cause of Severe Damage by the 1999 Kocaeli Earthquake -, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.22, No.9-12, pp.829-836, 2002.
- 7) 山中浩明, 石田寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 468, pp.9-17, 1995
- 8) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.43, pp.17-34, 1953.
- 9) 狐崎長良, 後藤典俊, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 斉藤徳美, 黒田徹, 山根一修, 奥住宏一: 地震動予測のための深層地盤 P・S 波速度の推定, *自然災害科学*, 9-3, pp.1-17, 1990
- 10) 田村明久, 村松正和: 最適化法, 共立出版, 2002.
- 11) Talwani, M. and Ewing, M.: Rapid computation for gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, 25, pp.203-225, 1960.

- 12) Nafe, J.E. and Drake, C.L. : Physical properties of marine sediments, in *The Sea*, Vol.3, edited by M.N.Hill, pp.794-815, 1963.
- 13) Birch, F. : The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2 *J.Geophys.Res.*, 66, pp.2199-2224, 1961.
- 14) Tondi, R., de Franco, R., and Barzaghi, R. : Sequential integrated inversion of refraction and wide-angle reflection traveltimes and gravity data for two-dimensional velocity structure, *Geophys.J.Int.*, 141, pp.679-698, 2000.
- 15) Koketsu, K., and S.Higashi : Three-Dimensional Topography of the Sediment/Basement Interface in the Tokyo Metropolitan Area, Central Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, pp.2328-2349, 1992.
- 16) Matheron, G. : Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58, pp.1246-1266, 1963.
- 17) Journel, A. G., and Ch. J. Huijbregts : *Mining Geostatistics*, Academic Press., 1978.

(2005.3.11 受付)

## JOINT INVERSION OF GRAVITY AND MICROTREMOR DATA FOR ESTIMATION OF 2-D SUBSURFACE STRUCTURE

Kimitoshi SAKAI and Hitoshi MORIKAWA

It is important to estimate detailed 3-D subsurface structure for strong ground motion simulation. Ground motions are controlled by ground parameters such as layer thickness, P-wave velocity, S-wave velocity, and density. In the most of past studies, detailed model of density structures is not fully included in the estimation of velocity structures. In this case, the small estimation error of the density may lead the large error of the velocity structure. Thus, we propose a method to estimate subsurface structure using gravity and microtremor data simultaneously. We applied the proposed method to synthetic data of gravity and microtremor, and confirmed its appropriateness.