

ウェーブレット解析を利用した重力探査結果の解釈…空洞調査と三重県周辺の活断層調査

三重大学大学院 原 敬徳
三重大学 正会員 大野 研

1 まえがき

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、内陸直下型地震の原因である活断層の存在が注目されるようになった。今日では日本全国の活断層地図も出版されているが、その多くのは地形から判断された活断層であり必ずしも地質学的に活断層であると判明している訳ではない。また活断層に沿って溝を掘るトレンチ調査などは、広域的な調査には向かない。したがって、地形以外からの要素から活断層の位置を調べる方法に期待がよせられている。

本研究では、現在活断層を発見するのに有効で実績のある重力探査から三重県地域における地盤構造を可視化し、活断層地図と比較して既知の活断層を検証すると共に伏在断層を発見することを目的とする。その方法として、従来のフーリエ解析と対比しながら離散ウェーブレット解析を行った。

このように活断層位置の信頼性を高めていくことで、今後の危険度評価つまり長期的な地震予知にも役立つと考えている。

2 重力探査

重力探査法とは調査地域内に適当に配置した測定点で重力測定を実施し、調査地域の等重力線図を作成し、重力分布から地下の質量分布を推定する物理探査法である。

重力探査とは目新しい物理探査ではないが、近年、測定機器の精度が向上し、土木現場への適用が可能となった。しかし、測定機器の向上は外部周辺環境の影響によるノイズに極めて近い重力値を取り扱うことになり、測定値からノイズを除去するためのフィルター処理に改良を加えなければならない段階にきている。

3 解析方法

3-1 ウェーブレット解析

フーリエ変換は、すべて波形関数が三角関数のたし合わせによって表され、無限に続く振動を持つ関数を分解するもので、局所的現象の解析が困難であったが、ウェーブレット変換はすべての波形関数がウェーブレット関数のたし合わせによって表されるという考えのもとで変換される。すなわち空間的に局在化された関数を用いることで、周波数だけでなく空間に対しても高い分解能力を持つという優れた特徴を持っているのである。よって、これまで解析が困難であった不連続波形や特異点を有する波形なども短時間で解析できる。

3-2 手法

ウェーブレット変換は、すべての波形関数がウェーブレット関数 $W(x-b)/a$ から成り立つと考えられた方法である¹⁾。

ウェーブレット関数は $W(x-b)/a$ の a, b を離散的にとり、 $W(x-b)/a$ がそれぞれ直交するように選ばれている。 a, b は $b/a = k, a = 2^j$ の離散的にとられ、 $W(x-b)/a$ は $W(2^j x - k)$ で表される。

離散ウェーブレット変換は変換される信号を直交した軸に射影し、それぞれの軸の成分に分けると同じことである。離散ウェーブレット変換によって算出される値は、その成分にどの程度影響を及ぼしているかのスペクトルのような意味がある。そこで直交の性質を利用した離散ウェーブレット変換は次のように定義されている。

Interpretation of gravity survey using Wavelet analysis.
T.Hara and K.Ohno (Mie University)

$$a_{2^j+k} = 2^j \int_0^1 f(x)W(2^j x - k)dx \quad (1)$$

$$a_0 = \int_0^1 f(x)\Phi(x)dx \quad (2)$$

また正変換によって算出された値を係数とし、逆変換は次のように定義される。

$$f(x) = a_0\Phi(x) + a_1W(x) + [a_2 \quad a_3] \begin{bmatrix} W(2x) \\ W(2x-1) \end{bmatrix} + [a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7] \begin{bmatrix} W(4x) \\ W(4x-1) \\ W(4x-2) \\ W(4x-3) \end{bmatrix} + \dots + a_{2^j+k}W(2^j x - k) + \dots \quad (3)$$

したがって逆変換の後、 $f(x)$ が再構成される。今回、1次元離散ウェーブレット変換を2次元に拡張して解析を行い、この解析には Daubechies のウェーブレット関数を使用した^[1]。

以上の手法を用いて2次元離散フーリエ変換・ウェーブレット変換を行い、双方のパワースペクトル特性を調べ、フィルタリング処理を施す。

4 実際の現場への適用

4-1 概要

使用したデータは、川崎地質(株)により行われたマイクロ・グラビティー探査によって収集されたものである。

調査地域は愛知県長久手町にあり、町役場から南西へ約0.6kmの所に位置し、香流川とその分派川である香桶川に挟まれた低地である。また、本地域は近年の宅地造成により盛土された地区であり、地表面は平坦である。

本地域には垂炭採掘古洞があり、浅所陥没および立坑跡沈下などの鉱害が懸念されてきた。このような状況下で地盤の安定を図るために古洞の充填が計画された。本調査は古洞が存在する範囲などの古洞状況を把握し、かつ充填効果を調べるために実施されたMG探査である。

Fig. 1に測点配置を示した。重力測定は調査地域を5m間隔の格子点に分割して、各格子点上で実施した。測定点数は充填工事前が461点、充填工事後が459点であり、合計920点である。測定点の間隔が5mであるから、10m四方よりも小さな重力異常は測定上のノイズと考えられる。

Fig. 2また Fig. 3はそれぞれ充填工事前および後の重力分布を表している。同図は重力残差図であるから、数値は当調査地域の平均的なブーゲー異常値をゼロとおいたとき、この平均値との「くいちがい」を平面分布として表している。図中、 $-20\mu\text{gal}$ 以下の低重力値を示す領域にはドットを付けた。これは、古洞が密集している可能性が高いと判断される領域である。

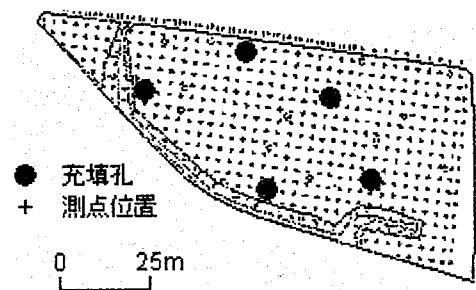


Fig.1 測点配置図

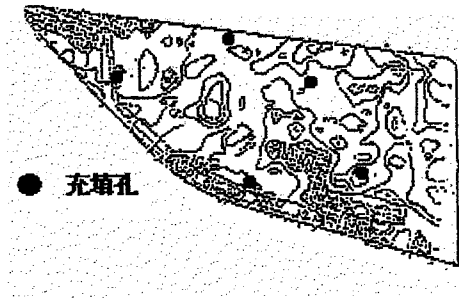


Fig.3 重力分布 (充填前)

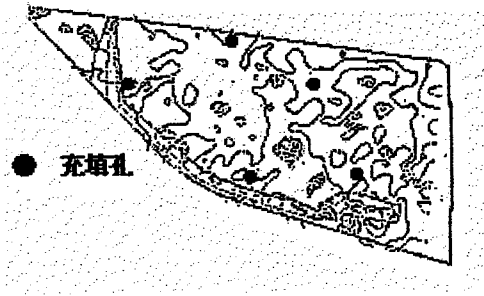


Fig.3 重力分布 (充填後)

4-2 重力データ

次に先に述べた重力探査データを、フーリエ解析およびウェーブレット解析によってフィルタリング処理を行う。今回の解析において重力探査から得られたデータおよびそのパワースペクトルを以下に表示した。

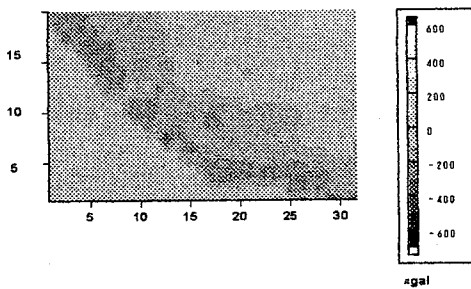


Fig.4-1 ブーゲー異常残差 (充填前)

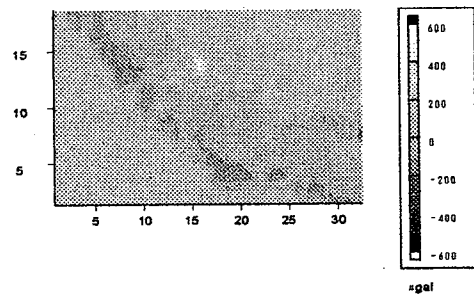


Fig.4-2 ブーゲー異常残差 (充填後)

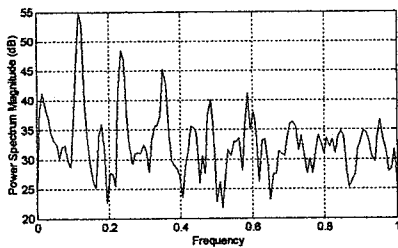


Fig.4-3 パワースペクトル (充填前)

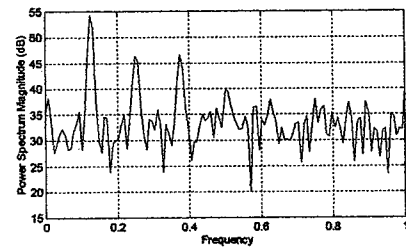


Fig.4-4 パワースペクトル (充填後)

4-3 解析結果

これらの重力探査データに関して2次元離散フーリエ変換・ウェーブレット変換を充填前・後それぞれに行う。ノイズと思われる周波数を抑え、空洞と思われる箇所を強調した解析結果を以下に示す。

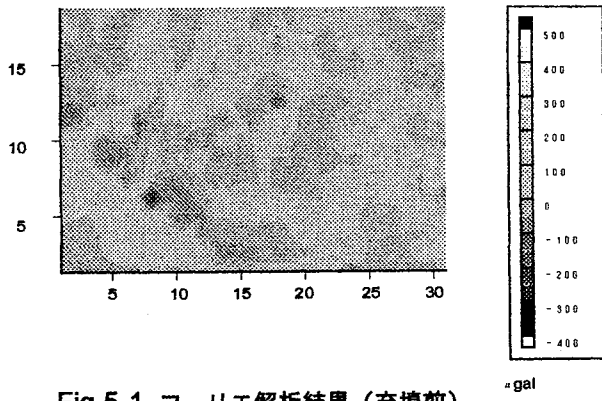


Fig.5-1 フーリエ解析結果 (充填前)

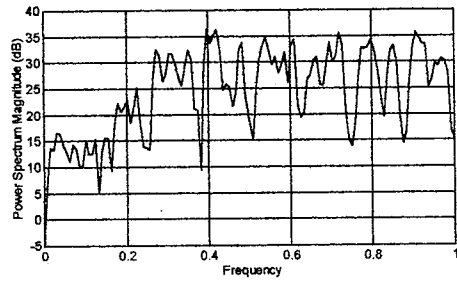


Fig.5-2 パワースペクトル (充填前)

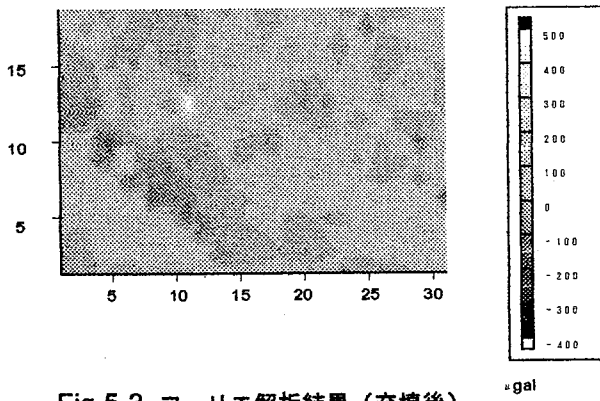


Fig.5-3 フーリエ解析結果 (充填後)

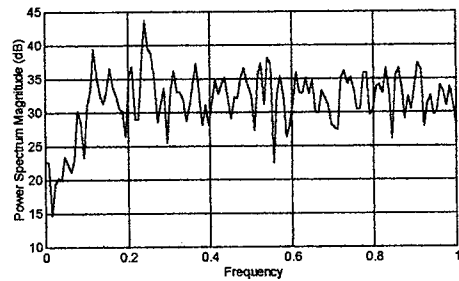


Fig.5-4 パワースペクトル (充填後)

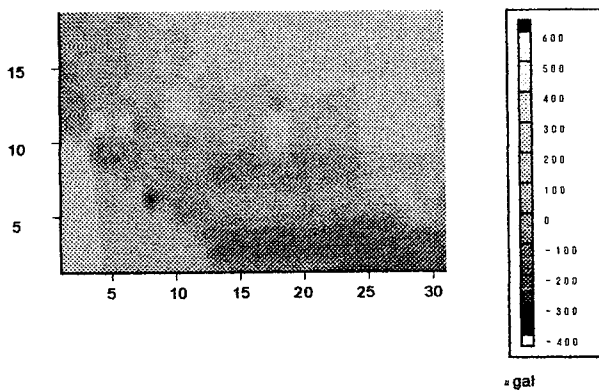


Fig.6-1 ウェーブレット解析結果 (充填前)

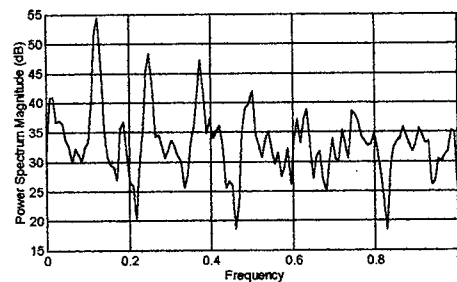


Fig.6-2 パワースペクトル (充填前)

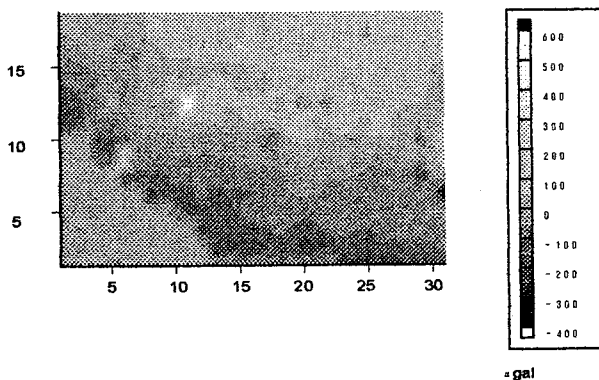


Fig.6-3 ウェーブレット解析結果 (充填後)

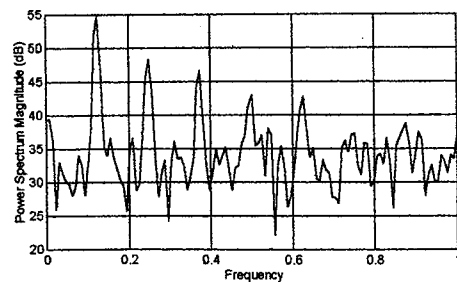


Fig.6-4 パワースペクトル (充填後)

4-4 評価

充填前の古洞内の状態は地下水によって充填されていたことが現地を確認されている。したがって、充填後はこの古洞内の地下水が充填剤によって置換されたことになる。地下水の密度を 1.0g/cm^3 と仮定すると充填剤の密度は 1.4g/cm^3 であるから、その密度差は 0.4g/cm^3 であった。

今回の結果からは、フーリエ解析・ウェーブレット解析とも同じような箇所では充填による変化がみられた。具体的には、両解析結果とも充填前に比べ充填後では数カ所で低重力帯が消えていることがわかる。また、充填孔の周辺では若干であるが充填効果が見受けられる。

今回の結果は、フーリエ・ウェーブレット両解析結果ともノイズと思われる部分がある程度押さえ、局所的な情報が強調されているのではないだろうか。

4-5 今後の問題点

充填工事の計画において最も重要と考えられるのは、空洞の位置とボリュームである。重力分布は地下の質量分布しか与えない。しかも、あらゆる深度の質量分布が含まれている。重力異常の原因として空洞を考える場合、空洞のボリュームを定量的に決定するためには空洞の深度と空洞とその周辺の密度差あらかじめ予測しておかなければならない。

そして、より明確に重力分布から地下状況を把握するためには、物理探査によって与えられたデータだけでなく、今回のようなフィルタリング処理を行うことによって今まで得ることができなかった情報も得られるのである。

調査の順序から言うと、初めにMG探査により空洞箇所の調査を実施し、次に空洞確認のためのボーリング調査を実施して空洞の深度と密度差を求める。これらのデータを用いて重力分布の定量・フィルタリング解析を実施して空洞の位置・ボリュームを推定する。つまりボーリングなどの直接的手法との共同調査が最も適当な手法だと思われる。

5 活断層の可視化

5-1 活断層（伏在断層）

さまざまな定義があるが、一般に過去の断層運動の繰り返しが、最も新しい地質時代の第四紀（約170万年前から現在までの期間）に形成された地形や地層の累積的な変動として記録されており、将来の活動すなわち地震を引き起こす可能性がある活動的な断層を活断層と呼んでいる。

近畿地方には活断層が多い。日本の活断層地図を見ると、中部地方と近畿地方北半分には、活断層が数多く分布している。しかし、関東地方をはじめ多くの都市域において活断層は沖積層のなかに埋もれていて、地表ではっきりとした地形を観察するのは難しい。このように活断層のうち、平野下に存在しているため新しい地層（沖積層）に厚く覆われ、地表には断層変位が直接現れないものを伏在断層という。兵庫県南部地震においても、建物の被害集中域は必ずしも地盤の悪い地域と一致するわけではなく^[4]、この地域の地下に地震を起こした伏在断層が存在していると考えられている。

よって、今後の課題としては伏在断層をきちんと評価していくことが必要となる。

5-2 短波長とブーゲー異常

現在、一般にはブーゲー異常を長波長ブーゲー異常とそれ以下の短波長ブーゲー異常とに分ける方法がとられている。波長の境界としては、ある程度以上の波長をもつ地形は地殻の弾性によって支えきれず、アイソスタシーによって均衡を保つという事実によるものである。つまり短波長ブーゲー異常はマントル以深に関係しない、地殻構造だけを示すものといえる。

次に活断層研究会（日本の活断層一分布図と資料、東京大学出版会）がまとめた活断層と短波長ブーゲー異常との関係を、東北日本を例にとって見てみることにする。

図1において、影を施した部分は短波長ブーゲー異常が正の部分、色がかかったところは負の部分である。図には活断層の位置も同時に記入してあるが、あきらかに断層の走向は短波長ブーゲー異常のトレンドにほぼ一致していることがわかる。例外として、正の短波長ブーゲー異常帯に一致する活断層分布が伊豆半島から埼玉県西部など部分的みられる。

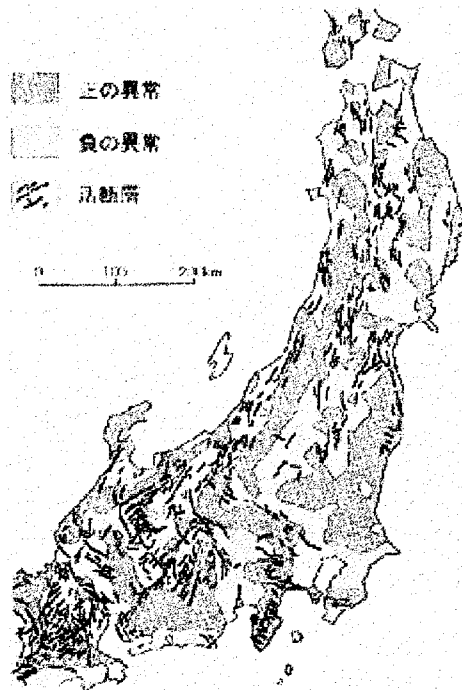


Fig.7 短波長とブーゲー異常

5-3 重力探査データについて

今回使用した重力値データは、名古屋大学火山地震予知センターの志知らによって収集されたものであり [2]、補正密度 2.67g/cm^3 、コンター間隔は 0.5mgal の西南日本全域におけるブーゲー異常傾向図から使用されたものである。下図に示す Fig.8-2 に、ある三重県周辺域において1マスを約1 km で 64×64 のメッシュをプロットしたものが Fig.8-1 となる。

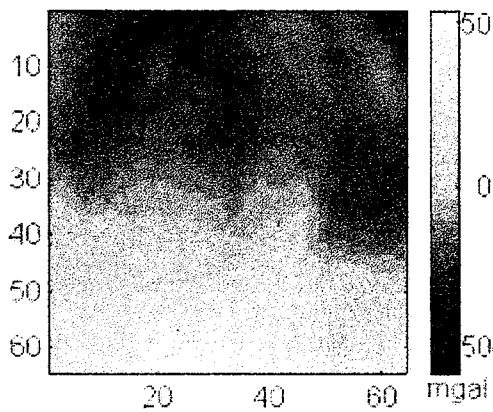


Fig.8-1 重力値データ

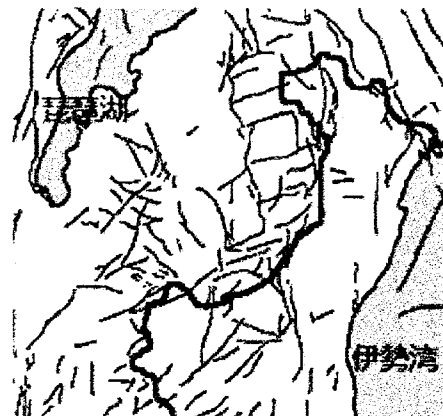


Fig.8-2 プロット範囲

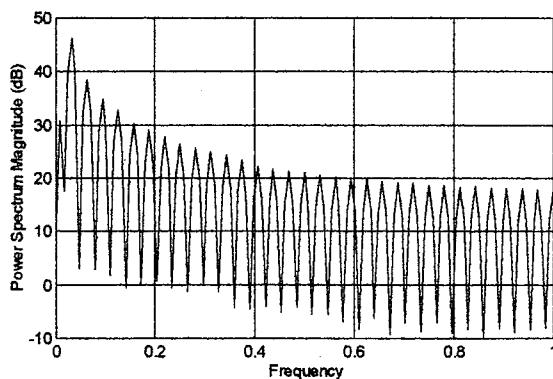


Fig.8-3 パワースペクトル

先ほどと同じ手法で2次元離散フーリエ変換・ウェーブレット変換を行い、双方のパワースペクトル特性を調べ、ブーゲー異常値を解析した。

5-3 解析結果

活断層図と重ね合わせた、フーリエおよびウェーブレットによる解析結果を以下に示す。

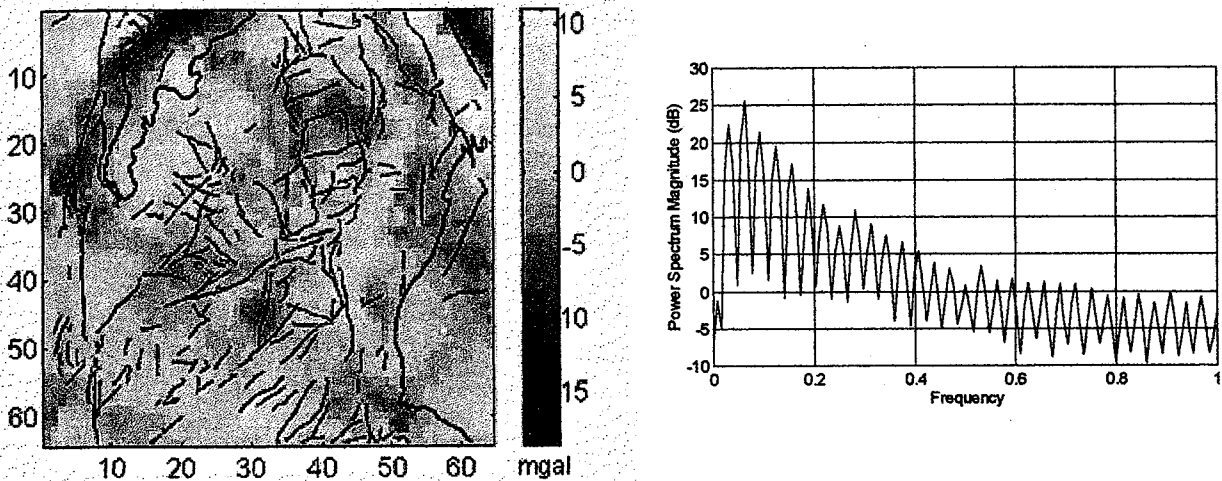


Fig.9 フーリエ解析結果

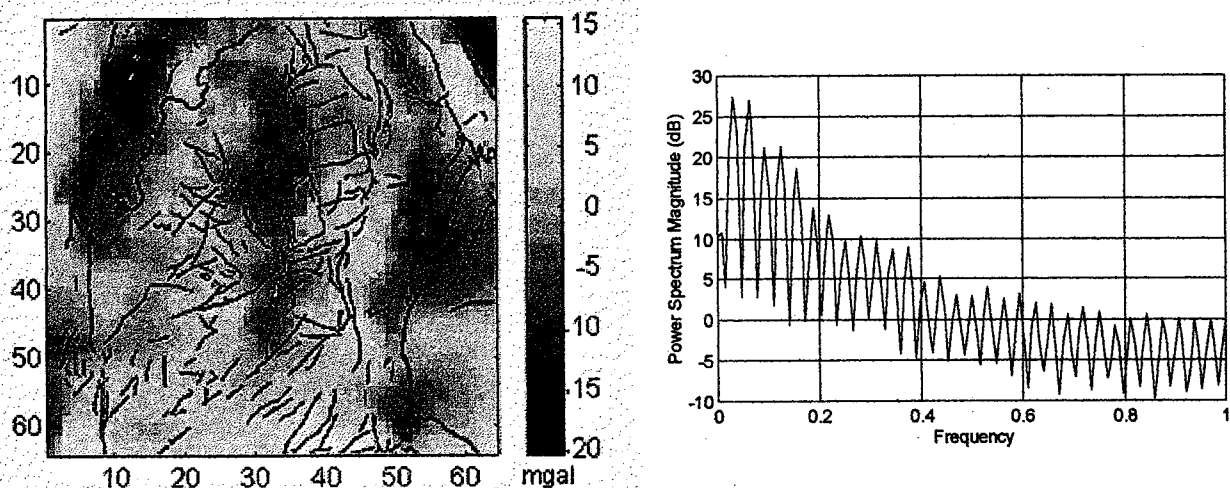


Fig.10 ウェーブレット解析結果

5-4 考察

以上、重力値の短波長成分を強調し長波長成分を抑える方法で、活断層位置の可視化を試みた。全体的に見ると、双方の解析結果は既存の活断層が集中している位置とほぼ一致している。

しかし、重力値の短波長成分を強調するという点ではウェーブレット解析の方が、フーリエ解析よりも活断層の位置をより強調しているように見える。

図の右上に伏在断層が存在すると言われているが、フーリエ解析・ウェーブレット解析双方とも断層が存在すると予測しており、これらの方法の有効性が確認できる。

ここで示したように、地形等から判断された活断層位置と、重力値から判断された活断層位置とが一致すれば、それらの活断層の信頼性は向上し、重力値からは未知な伏在断層存在の可能性を指摘することができる。したがって、詳細な重力データが得られたのならば精度の高い解析結果が得られ、発見困難な活断層の存在地点を明確にできる場合もあり、今後の建設物立地候補地の選定や地震予知などに非常に有効であると

思われる。

6 まとめ

本研究では、地盤データ解析におけるウェーブレット解析が特性把握において有効な一手法であることを示した。取り扱ったデータ数が少ないが、今回の結果から次のような事がいえる。

- (1) 充填現場の解析については、フーリエ解析結果の左下に現れているノイズと思われる箇所がウェーブレット解析結果では抑えられている。また活断層の解析結果についてはフーリエ解析に比べウェーブレット解析結果の方が、より活断層と思われる情報を強調している。
- (2) フーリエ解析における周波数特性では、地質の違いや活断層、空洞などによる局所的な情報を把握しにくい。一方、ウェーブレット解析では分解係数ごとの周波数域特性を抽出することが可能なので、局所的な情報を強調できたのではないかと思われる。
- (3) 全体的にフーリエ解析とウェーブレット解析を比べた場合、双方とも特性をよく表している。よって、ウェーブレット解析の特徴を補完的な意味でフーリエ解析結果と対応させることが解析の信頼性を高めることになると考えられる。

謝辞

最後に、本研究に際して貴重な文献およびデータを提供していただいた川崎地質（株）に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] D.E.Newland : "Random vibrations,spectral and wavelet analysis", Longman Scientific & Technical, 1993.
- [2] Rept .Geol.Surv.Japan,no.280,1994 Gravity Research Group in Southwest Japan,"A Bouguer gravity anomaly map in Central Japan,
- [3] H.B. Wilsonand L.H. Turcotte : " Advanced Mathematics and Mechanics Applications Using MATLAB", CRC Press,1994
- [4] “科学朝日 地震科学最前線”、朝日新聞社、1995
- [5] 高木幹雄 下田陽久：“画像解析ハンドブック”、東京大学出版、1992
- [6] 池田安隆 島崎邦彦 山崎晴雄：“活断層とは何か”、東京大学出版会、1996
- [7] “新編 日本の活断層地”、東京大学出版会、1994