

Moving-window Poisson Analysis 法の実データへの適用性に関する考察

高橋千佳¹・盛川仁²・澤田純男³

¹ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

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

² 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻
(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

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

³ 京都大学 防災研究所 地震災害研究部門
(〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

重力と磁気探査結果を用いて地盤の水平境界を検出する手法として Chandler et al.¹⁾ が提案した Moving-window Poisson analysis 法 (MWP 法) がある。MWP 法は重力と磁気の相関などを求めることで構造境界を抽出する方法であり、Chandler et al.¹⁾ はモデルスタディなどを行うことによりこの手法の妥当性について論じている。本研究では MWP 法でこれまで検討されていなかった形状の地盤構造を用いたモデルスタディを行い、水平方向の境界を抽出し得る条件を整理した。あわせて、MWP 法によって、構造境界を検出することが可能なケースと、困難が予想されるケースがあることを示した。さらに、MWP 法を新潟県中越地方における重力・磁気データに適用することにより、構造境界となりうる領域を示した。

Key Words : estimation of the bedrock structure, Moving-window Poisson Analysis, gravity data, magnetic data, anomaly

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。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、微動探査法、重力探査法、磁気探査法など数多く存在する²⁾。これらの中でも特に重力探査は比較的容易に、広範囲の地盤構造を推定できる手法であり、数多くの探査が行われている。しかし、重力探査結果のみでは解析の際のパラメータの設定に自由度があるため、地盤を一意に決定することが難しい場合がある。

そのため、重力探査結果のみの解析では、地盤を堆積層と基盤の 2 層として、かつ堆積層と基盤の密度を解析エリア全体で一定とするなどの仮定がおかれることが一般的である。しかし、このような仮定のもとで作成された地盤モデルでは地震による波動場を適切に再現できないなどの問題が生じることがある。例えば、Goto et al.³⁾ は 1999 年のトルコ・コジャエリ地震の被災地で

あるアダパザル盆地における人工地震探査記録の解析の際に、重力探査結果から推定された 2 層の地盤モデルでは走時を適切に説明することができなかったため、基盤岩に鉛直な境界面を入れることでこの問題を解決している。このように問題にされることが多い水平な境界面だけではなく鉛直な境界面についても検討を行うことが重要である。

そこで本研究では水平方向に変化する地盤構造に着目し、その境界面の位置を検出する手法について検討する。

よく知られているように重力の鉛直一次微分の急変部を見ることによって、構造境界を抽出できる可能性がある⁴⁾。しかし、これは基盤深度の変化に起因する場合もあるためこれらの区別が困難である。だが、異なる物理量を援用することでこのような問題を解決できる可能性がある。Chandler et al.¹⁾ は重力異常と磁気異常の関係式であるポアソンの式²⁾を用いることで水平方向の地盤構造の変化を抽出する MWP 法を提案し、それを実際のデータに適用している⁵⁾。また、梶原・他⁶⁾ はこの手法を応用し、北海道北部地域における構造境界を抽出している。

MWP 法は磁気と重力の相関などを求めることで水

平方向に変化する構造の境界を抽出可能な方法であり、Chandler et al.¹⁾や梶原・他⁶⁾は単純な二層構造モデルにおいて理論計算を行い、手法の有効性について議論している。

しかし、それらのモデルは図-1で示すように密度や磁化率が0である地中に単一の異常源がある場合についてのみしか理論計算が行われていない。そこで本研究ではより現実に近いモデルでの理論計算を行うと共に、その結果についての考察を行った。さらに、これらの結果を踏まえて、新潟県中越地方における重力および磁気の実データへMWP法を適用し、対象地域における構造境界の抽出を試みた。

2. Moving-Window Poisson Analysis¹⁾

重力ポテンシャルと磁気ポテンシャル間には互いに相関性があり、それは以下のような式によって定義される。

$$U = \frac{\Delta J}{G\Delta\rho} (p\nabla\phi_g) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U は磁気ポテンシャル、 ΔJ は実効磁化率の差、 G は万有引力定数、 $\Delta\rho$ は密度差、 $p\nabla$ は磁化方向への微分、 ϕ_g は重力ポテンシャルである。式(1)をPoissonの式という²⁾。この式を鉛直下向き方向へ2階微分すると以下のような式が導かれる。

$$T_z = \frac{\Delta J}{G\Delta\rho} \frac{dg}{dz} \dots\dots\dots (2)$$

ここで z 軸は鉛直下向方向を正とし、 T_z は極磁気異常、 dg/dz は重力異常の一次微分である。しかし、これらの式は物質の磁化率と密度の比が場所によらず一定である時のみ成立し、式(2)の実データへの適用は非常に限られる。そこで、Chandler et al.¹⁾により、Moving-window Poisson Analysis (MWP法)が提案された。

MWP法ではまず、解析範囲において長波長の地域的な異常が分布していると仮定し、その値を定数 A とおく。このとき式(2)は以下のように書き改められる。

$$T_z = A + \frac{\Delta J}{G\Delta\rho} \frac{dg}{dz} \dots\dots\dots (3)$$

この式の適用をある一定の空間window内に限定し、その範囲内にある重力異常と磁気異常の観測記録を用いて dg/dz と T_z を求め、これらの値を式(3)で直線回帰し、 $\Delta J/\Delta\rho$ 、 A 、および相関係数を算出する。次に、このwindowを解析領域内でずらし、それぞれのwindowの位置ごとにパラメータの値を求め、windowの中心座標におけるパラメータの値とする。このようにして $\Delta J/\Delta\rho$ 、 A 、および相関係数の空間分布を求め、その分布形状から構造境界等を抽出しようとするものである。

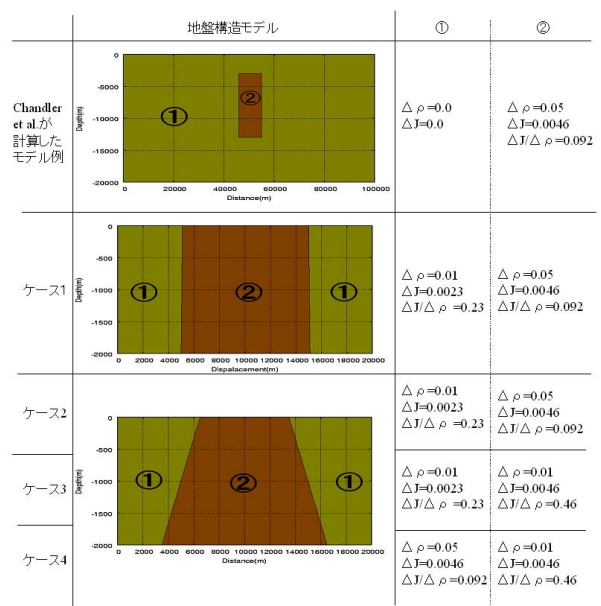


図-1 地盤構造モデル

3. モデルスタディ

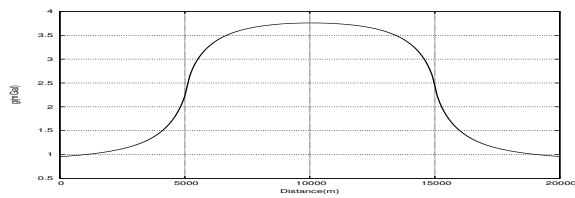
地盤構造と式3から得られるパラメータの関係を明らかにするために実地盤を模した簡単なモデルを用いてモデルスタディを行った。以下では図-1のケース1～4に示す地盤構造を用いて理論計算を行い、その結果について考察をする。

モデルスタディではそれぞれ仮定した地盤構造に基づいて、2次元のTalwaniの式⁷⁾を用いて地表面における重力異常、重力異常の鉛直一次微分および極磁気異常の理論値を求めた。このとき、理論値は100m間隔で求めている。このようにして得られた重力異常の鉛直一次微分と極磁気異常の理論値を観測記録とみなして、MWP法を適用した。すなわち最小二乗法により極磁気異常と重力の鉛直一次微分を式(3)で回帰し、その傾き($\Delta J/\Delta\rho$)、切片(A)および相関係数を求めた。なお、windowのサイズを900mとして、10組の記録を用いて回帰計算を行った。

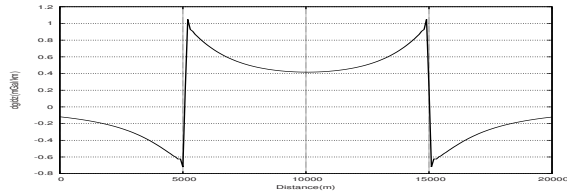
(1) ケース1

図-1のように密度および磁化率の低い地盤に、それらが低い地盤がはさまれている場合を考える。このときの計算結果を図-2に示す。

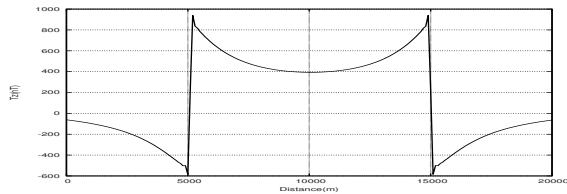
重力異常は真下の物質以外からも影響を受けるため、構造境界付近で徐々に数値が大きくなっており、その微分は鉛直方向の変化が強調されるため境界で急激に大きくなっている。このケースでは密度が大きくなると、磁化率も大きくなるように設定しているため、極磁気も同様に中央付近で数値が大きくなっている。よって、図-2(b)、(c)より重力異常の鉛直一次微分および極磁気異常からの構造境界の検出が可能であるということがわかる。しかし、水平方向に構造が変化する場合だけでなく、鉛直方向に構造が変化する場合であっ



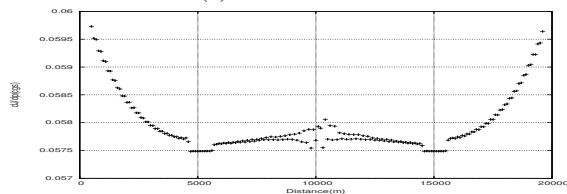
(a) 重力異常図



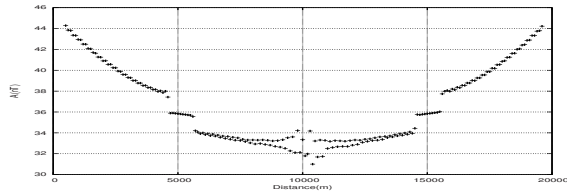
(b) 重力異常の一次微分



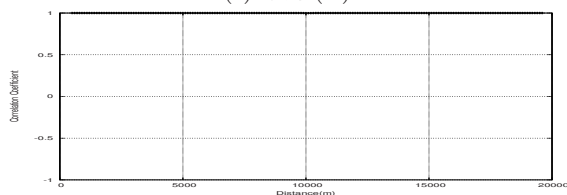
(c) 極磁気異常図



(d) 傾き ($\Delta J/\Delta\rho$)



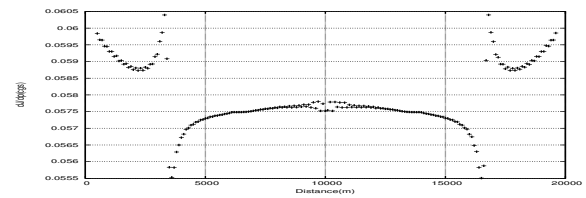
(e) 切片 (A)



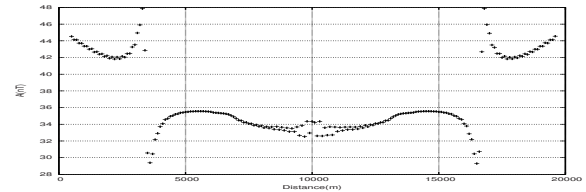
(f) 相関係数

図-2 ケース 1

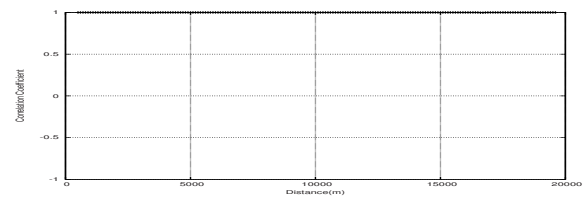
ても重力異常の一次微分や極磁気異常は図- 2 (b), (c) のような変化を示す場合があり、構造の変化があることは分かるがどのような変化であるかを重力異常の一次微分または磁気異常の個々の記録のみから判別することは難しい。傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) や切片 (A) については構造境界で不連続な変化が見られた切片 (A) は理論的には常に 0 とならなければならないに関わらず、5～15km 付近で 34 (nT) となっており、そのため、傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) は 0.057 あたりの値をとっており、理論的に



(a) 傾き ($\Delta J/\Delta\rho$)



(b) 切片 (A)



(c) 相関係数

図-3 ケース 2

予想される 0.092 よりも小さく求められている。また、相関係数についてはほとんど変化は見られず位置によらず、ほぼ 1 となった。

(2) ケース 2

ケース 2 では構造境界が傾いている場合を考えた。密度および磁化率についてはケース 1 と同様のものを与えている。このときに得られた MWP 法の結果を図-3 に示す。

ケース 2 では境界が傾いているため、ケース 1 と比較して重力や極磁気の変化は境界付近で緩やかになった。図-3 (a), (b) より、傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) や切片 (A) は媒質 2 が媒質 1 の下に潜り込んでいる先端付近 (4km および 16km 付近) で大きく変動している。地表面に現れている境界の位置 (6km および 14km 付近) では特に大きな値の変動は見られない。また、中央付近での傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) や切片 (A) の値はケース 1 とほぼ同じであった。相関係数についてもケース 1 と同様に変化がほとんど見られなかった。

(3) ケース 3

ケース 3 では密度が同じで磁化率のみ異なる場合を考えた。地盤構造の境界の形状はケース 2 と同じである。このときに得られた結果を図-4 に示す。図-4 (a), (b) の縦軸のスケールは図-2, 3 の対応する図と比較して大きく異なることに注意されたい。

図-4 より傾き ($\Delta J/\Delta\rho$)、切片 (A) および相関係数はケース 1, 2 と異なり構造境界付近で大きく変化していることが分かる。特に切片 (A) は構造境界付近で約 11×10^5 (nT) 変動している。ケース 1, 2 では約 20

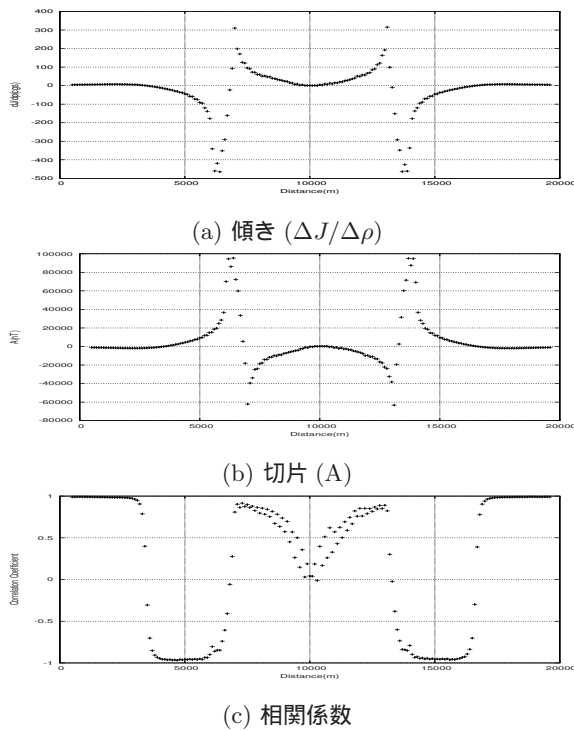


図-4 ケース 3

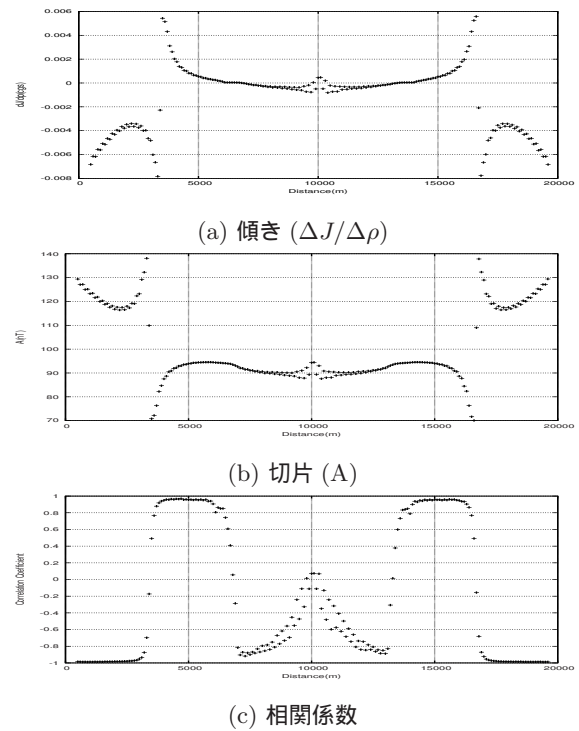


図-5 ケース 4

(nT) 程度の変動しか見られず、それに比べて非常に大きな変動である。本来 0 となるべき切片 (A) がこのように大きな変動をしているため、傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) も設定したモデルの値とは異なる値が得られている。また、相関係数は媒質 1 の領域でほぼ 1、地盤構造が斜めに傾いている範囲において -1 となっており、媒質 2 の領域では 0 ~ 1 の間で乱れている。

(4) ケース 4

ケース 4 では磁化率が同じで密度のみ異なる場合を考えた。地盤構造の境界の形状はケース 2 と同じである。このときに得られた結果を図-5 に示す。

ケース 3 と同様に、構造境界周辺で傾き ($\Delta J/\Delta\rho$)、切片 (A)、相関係数共にはっきりとした変動が見られた。ケース 4 では媒質 2 が周辺に位置する媒質 1 よりも密度が小さいため、傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) や相関係数はケース 3 とは逆に負値の領域が多い。また、構造の境界付近のパラメータの値の変動の仕方はケース 3 と似ているが正負が異なっている。

(5) モデルスタディのまとめ

以上のモデルスタディから次のようなことが明らかになった。構造境界において磁化率、密度が共に変化する場合は傾き ($\Delta J/\Delta\rho$) や切片 (A) の変化は非常に小さく、MWP 法によって境界を検出することは困難であると考えられる。

一方、磁化率もしくは密度のどちらかが一定で他方が変化する場合、構造境界付近でパラメータが大きく乱れるため、構造境界を検出することが可能であると期待される。これらのことより、水平方向に変化する構造の境界であり得る領域においていくつかのパラメー

タの値の変動形状として考えられる特徴をまとめると以下ようになる。

- 重力の鉛直一次微分が負の値をはさんで急変する。
- 極磁気異常が負の値をはさんで急変する。
- 式 (3) に線形回帰したときの相関係数が -1 ~ 1 で変動する。
- 式 (3) の $\Delta J/\Delta\rho$ または A が大きく変動する。

4. 実記録への適用

前節において水平方向の構造境界を抽出するために必要なパラメータの特徴が明らかとなったため、実記録に本手法を適用する。対象とする地域は比較的密な重力探査が行われていて、かつ、空中磁気データが得られている新潟県中越地方とした。対象地域は長岡市北部から小千谷市南部 (北緯 $37^{\circ}12'$ ~ 北緯 $37^{\circ}33'$ 、東経 $138^{\circ}42'$ ~ 東経 $139^{\circ}00'$ 、約 南北 39 × 東西 26 km) を設定した。

重力探査記録は Takahashi et al.⁸⁾ による結果を用いた。仮定密度 2.4 t/m^3 のブーゲー異常図を図-6(a) に、このブーゲー異常より求められた重力異常の鉛直一次微分を図-6(b) に示す。

また磁気探査記録については日本空中磁気データベース⁹⁾の全磁力異常の結果と理科年表¹⁰⁾に記載されている偏角、伏角の式を用いて、極磁気異常を算出した。この結果を図-6(c) に示す。これらの図はいずれもランダムに配置された観測点における記録を 2 次曲面で平滑化および補間したうえで図化したものである。MWP 法の適用に際しては、補間曲面を 100m メッシュのデータに再構成して用いている。

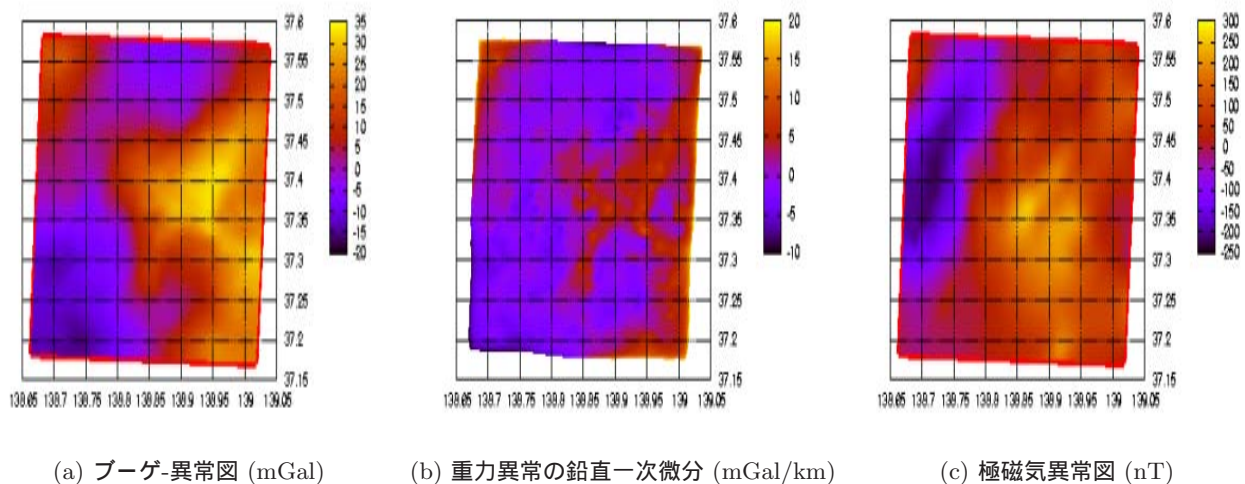


図-6 新潟県中越地方における物理探査データ

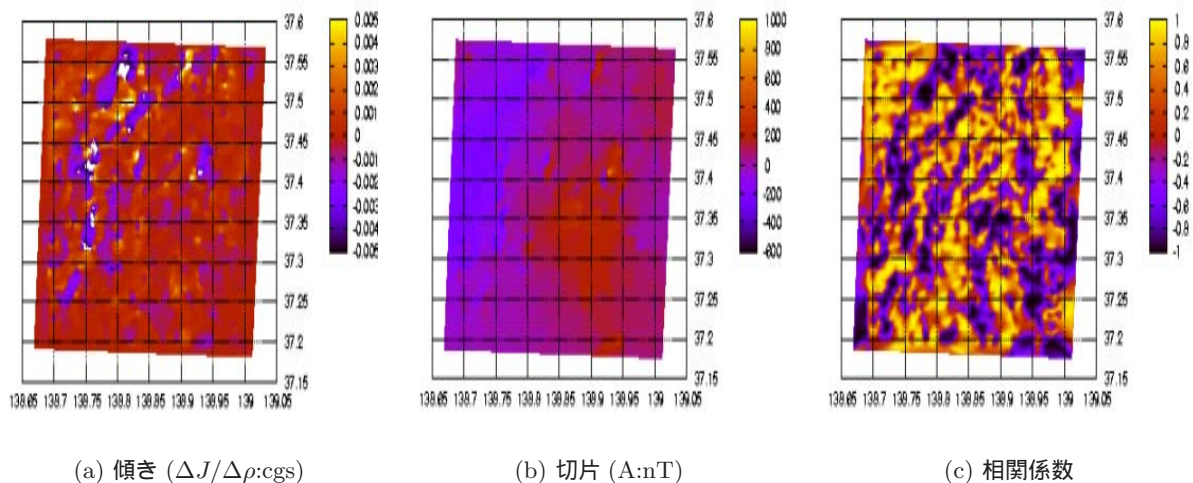


図-7 新潟県中越地方における MWP 法適用結果

上記のようにして得られた重力異常の鉛直一次微分と磁気異常に MWP 法を適用する。Moving-window の大きさは 900m 四方として、100 組の記録から式 (3) で回帰してパラメータを求めた。各々の Moving-window において得られたパラメータの値を window の中心位置において図化したものを図-7 に示す。

対象地域の北西に相関係数が帯状に負となっている領域があり、そこを境にして $\Delta J/\Delta \rho$ の値が北西側でやや大きくなっている。モデルスタディよりこの帯状の負の領域は構造境界である可能性が高い。この領域のすぐ北西側には重力異常の一次微分と極磁気異常の急変部があり、かつその部分では相関係数がほとんど 1 である。従って、この領域に何らかの形で構造境界が存在する可能性もある。相関計数が -1 と成っている帯状の領域または重力異常の鉛直一次微分と極磁気異常の急変域のいずれかまたは両方が構造の境界となっていることが考えられる。しかし、現時点では密度構造のみが変化するのか、磁気構造のみが変化するのか、あるいは両方が変化するのか確定的に述べることは難しい。

相関係数が 1 に近く、また傾き ($\Delta J/\Delta \rho$)、切片 (A)

共に変化の少ない地域は主に平野のあたりであり、また逆に相関係数が 0 に近く、傾き ($\Delta J/\Delta \rho$) や切片 (A) の変化が大きい地域は山間部に多い。これらは山間部にある磁化率の高い岩盤などが影響しているものと考えられる。特に平野部はほぼ一様な媒質で構成される堆積層をもつもの予想される。平野部が信濃川によってもたらされた堆積物であることを考えあわせるとこのことは地質環境から予想される地盤条件と調和的であるといえる。

対象地域の南東にある相関係数が負になっている領域は構造境界付近に見られる相関係数の乱れである可能性が考えられる。しかし、負の相関になっている領域がやや広いことを考慮すると、モデルスタディのケース 4 における媒質 2 の領域に対応することが考えられる。この相関係数 -1 の領域は相関係数が 1 の領域によって囲まれているようにも見えるが、これがケース 4 の媒質 1 と 2 の境界部分に見られる相関係数 1 の領域に対応しているとも考えられる。このことは南東部においては磁気の変化に対して大きな密度の変化がある可能性を示唆している。しかしながら対象地域の東側の観測記録をあわせて考察する必要がある。

5 . まとめ

本研究ではこれまで検討されていなかった形状の地盤モデルを用いた MWP 法のモデルスタディを行い、水平方向の境界を抽出し得る条件を整理した。あわせて、MWP 法によって、構造境界を検出することが可能なケースと、困難が予想されるケースがあることを示した。

さらに、MWP 法を新潟県中越地方における重力および磁気データに適用することにより、構造境界となりうる領域を示した。今後はより多くのモデルスタディを通して、構造境界となりうる領域の抽出条件を検討する。さらに密度等の地盤パラメータの値の同定法についても検討を加え、より現実に即した地盤構造のモデル化の手法を確立していく予定である。

参考文献

- 1) Chandler, V.W., Koski, J.S., Hinze W.J., and Braile, L.W.: Analysis of multisource gravity and magnetic anomaly data sets by moving-window application of Poisson's theorem, *Geophysics*, Vol.46, No.1 pp.30–39, 1981.
- 2) 狐崎長琅：応用地球物理学の基礎，古今書院，pp.5–15, pp81–84, 2001.
- 3) Goto, H., Sawada, S., Kiku, H., and Ozalaybey, S.: Modeling of 3D Subsurface Structure and Numerical Simulation of Strong Ground Motion in the Adapazari Basin during the 1999 Kocaeli Earthquake, Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.95, No.6, pp.2197–2215, 2005.
- 4) 駒澤正夫：物理探査ハンドブック，物理探査学会，pp.455–457, 1998.
- 5) Chandler, V.W. and Malek, K.C.: Moving-window Poisson analysis of gravity and magnetic data from the Penokean orogen, east-central Minnesota, *Geophysics*, Vol.56, No.1, pp123–132, 1991.
- 6) 梶原崇憲・茂木透・山本明彦・大熊茂雄・中塚正：北海道北部地域の重力・地磁気異常に関する Moving-window Poisson's analysis の適用，日本地震学会講演予稿集，秋季大会，p.55, 2005.
- 7) Talwani, M., Worzel, J.L., and Landisman, M.: Rapid computation for two dimensional Bodies with application to Mendocino Submarine Fracture Zone, *Journal of Geophysical Research*, Vol.64, No.1, pp.49–59, 1959.
- 8) Takahashi, C., Morikawa, H., Sekiguchi, H., Komazawa, M., and Sawada, S.: Estimation of subsurface structure around damaged area by the Niigata-ken Chuetsu Earthquake using gravity survey, Proc. of ESG 2006 (3rd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion; edited by P.-Y. Bard et al.), Grenoble France, pp.389–396, 2006.
- 9) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：日本空中磁気データベース，2005.
- 10) 国立天文台：理科年表 平成 12 年，pp.756–758, 2000.

(2007.06.29 受付)

A STUDY ON APPLICABILITY OF MOVING-WINDOW POISSON ANALYSIS TO OBSERVED DATA

Chika TAKAHASHI, Hitoshi MORIKAWA, and Sumio SAWADA

Chandler et al. proposed Moving-window Poisson (MWP) analysis method to examine a structural boundary using the observed gravity and magnetic data. They calculated the statistical correlation between the vertical derivative of gravity anomaly and the total magnetic anomaly reduced to the pole in areas limited a spatial window function. they discussed quantitatively the relationships between the structural boundary and the above correlation through some model studies. To consider more realistic models of ground structure, we examine some different analytical studies from models by Chandler et al. From this, we listed some properties to determine the structural boundaries: that is, we can find them easily under some specific conditions. In addition, we applied the MWP method to the gravity and magnetic data observed around Niigata-ken Chuetsu region and presented some possible boundaries in this area.