



Title	Poissonの関係式を用いた北海道北部地域における重力・磁気異常の地下構造解析
Author(s)	梶原, 崇憲; 茂木, 透
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 71, 91-101
Issue Date	2008-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.71.91
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32762
Type	departmental bulletin paper
File Information	71-91.pdf



Poisson の関係式を用いた北海道北部地域における 重力・磁気異常の地下構造解析

梶原 崇憲・茂木 透

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2008 年 1 月 11 日受理)

Subsurface structure analysis of gravity and magnetic anomalies in northern Hokkaido using Poisson's equation

Takanori KAJIWARA and Toru MOGI

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 11, 2008)

The Poisson's equation expresses a linear relationship between the gravity and magnetic potentials arising from a body with uniform density and magnetization contrast. The equation was extended to multi body case by repeatedly applying it within a small uniform body called the moving window. The moving-window Poisson's (MWP) analysis technique was proposed by Chandler et al. (1981) to apply to general complex structures. The correlation coefficient between the total magnetic intensity anomaly reduced to the pole and vertical derivative of the gravity anomaly, and the magnetization-to-density ratio were obtained by the MWP analysis. We investigated the profiles of these parameters for synthetic multi density and magnetic intensity structures and clarified how structure boundaries are delineated. The MWP was applied to the dataset of gravity anomalies and magnetic intensity anomalies collected in Northern Hokkaido. As the result, the MWP analysis put some constraints on density and magnetization structures modeled by a conventional analytical method such as the Talwani method.

I. はじめに

Poisson の関係式は、磁気ポテンシャルと重力ポテンシャルとの関係を表す。この関係式は、重力および地磁気ポテンシャルの変換式として用いられており (e.g., Baranov, 1957), また、岩体の磁化方向を求める手段としても使われてきた (e.g., Bott et al., 1966, Mendoca, 2004)。一方, Garland (1951) は, Poisson の関係式を利用した重力異常および磁気異常を組み合わせた構造解析法を提案し, 均質な密度, 磁化をもつ独立した物体については, その存在している深さや形状に関係なく, 物性 (密度, 磁化強度) の境界が決められることを示した。ところが, この

方法は対象範囲において物性が均一でなければならないという仮定のもとに成立している。Chandler et al. (1981) は、これを実際の複雑な構造に対しても適用するために moving-window Poisson's analysis technique (以下 MWP 法) を提案した。しかし、これまで MWP 法の解析結果と地下構造との関係については、その定性的・定量的な議論はあまり研究されてこなかった。そこで本研究では、MWP 法を用いた構造解析を、単純な密度・磁化強度モデルに適用し、これによる解析結果と構造形状やその境界等との間にどのような関係があるかを検討した。また、北海道北部地域における重力異常データおよび磁気異常データに対して MWP 法による解析を行い、密度および磁化強度構造分布の推定を試みた。

II. Poisson の関係式と MWP 法の概要

物体の体積要素 dv が均一に強度 J で磁化しているとする、 P 点 (観測点) での磁気ポテンシャル U_p は (1) 式のように書き表される。

$$U_p = Jdv \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

ここで、 r は観測点から双極子の中心までの距離、 i は磁化の方向である。一方、物体 dv の密度を σ 、万有引力定数を G とすると、 P 点での重力ポテンシャル V_p は (2) 式のように書き表される。

$$V_p = \frac{G\sigma dv}{r} \quad (2)$$

ゆえに、(1)、(2) 式より、

$$U_p = \frac{1}{G} \frac{J}{\sigma} \frac{\partial}{\partial i} V_p \quad (3)$$

となる。(3) 式は磁気ポテンシャルと重力ポテンシャルの磁化方向微分値との線形関係式であり、Poisson の関係式と呼ばれている。しかし一般には、 U_p 、 $\partial V_p / \partial i$ は直接測定することが困難な量であるため、容易に測定可能な量の関係式に書き換えた方がより実用的である。そこで (3) 式を深さで微分すると、

$$Z = \frac{1}{G} \frac{J}{\sigma} g_i \quad (4)$$

となる。ここで、 Z は P 点における磁気異常の鉛直方向成分、 g_i は P 点における重力異常の物体が磁化している方向への勾配である。ここで、磁化の方位角を α 、伏角を d とし、重力異常の鉛直勾配を g_z 、 α 方向の水平勾配を g_s とすると (4) 式は、

$$Z = \frac{1}{G} \frac{J}{\sigma} (g_z \sin d + g_s \cos d) \quad (5)$$

のように書き換えられる。

この (5) 式を用いて測定された g_z 、 g_s により Z を推定することができる (重力異常分布から

磁気異常分布を推定). 均一であれば, この推定された磁気異常分布と実際に測定された磁気異常分布とは一致する. 磁気異常分布が異なる周辺の岩体と J/σ の値を比較したとき, J/σ の値が周辺地域とほぼ等しい値を示せば, 岩体に起伏があると推定され, J/σ の値が周辺地域の値と異なる値を示せば, 物性の異なる岩体が存在していると推定される.

以上が, Garland (1951) により提案された Poisson の関係式を利用した構造解析法である. この方法の利点は, 物体の存在している深さ, 物体の形状に関係なく, 物性 (密度, 磁化強度) の境界を判断できることである. ところが, この方法は解析範囲において物性が均一でなければならないという仮定のもとに成立している. これを実際の複雑な構造に対しても, 適用することができるよう工夫した方法が Chandler et al. (1981) により moving-window Poisson's analysis technique (以下, MWP 法) として提案された.

(3) 式を極磁気異常値 T_z と重力異常値 g との関係式に書き換えると,

$$T_z = \frac{1}{G} \left(\frac{\Delta J}{\Delta \sigma} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \quad (6)$$

のようになる. ここで, ΔJ は磁化異常値, $\Delta \sigma$ は密度異常値である. いま, 対象地域の長波長の地域的な異常を A とすると, (6) 式は,

$$T_z = A + \frac{1}{G} \left(\frac{\Delta J}{\Delta \sigma} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \quad (7)$$

のように書き換えられる. MWP 法は (7) 式を用いて行う.

Ⅲ. MWP 法で得られる構造変化の特徴

MWP 法は, 解析対象地域を多数のグリッド (Window と呼ぶ) に分け, そのグリッド毎にその範囲に含まれる重力異常の鉛直方向微分値 ($\partial g/\partial z$) と極磁気異常値 (T_z) とに対して Poisson の関係式を適用する. このとき, (7) 式をそれらの間の線形回帰式を考えると, その傾きは $(1/G) (\Delta J/\Delta \sigma)$ を与え, 切片は A を与える. また, $\partial g/\partial z$ と (T_z) との間の相関係数も構造に関係した値となる. この計算を一つの Window に対して行い, 次に計算する Window をずらし, 最終的に解析範囲全体に対して Poisson の関係式を適用し, これらの値の分布を求める. それぞれの Window について, 上記のような線形回帰や相関係数を決めるためには, その中に観測値がそれに十分な数含まれている必要がある.

Fig. 1 は, 密度, 磁化強度ともに一樣な矩形構造に対して MWP 法解析を行った結果を示す. 左図の構造の上にそれによる重力異常, 磁気異常分布を示した. Window の幅により範囲は異なるが矩形構造上では相関係数の値は 1, $\Delta J/\Delta \sigma$ も一定値となる. 切片は window と構造の大きさとの相対的關係で異なる. また, 水平方向の構造境界と相関係数との関係は, 相関係数の急変位置を Window の大きさの半分だけ矩形構造の方向にずらした位置が, 水平方向の構造境界とほぼ一致する. このことは, 水平方向の構造境界を推定する指針となる.

Fig. 2 は, 密度, 磁化強度一樣で底辺の深さが異なる矩形構造について, window size を 4km

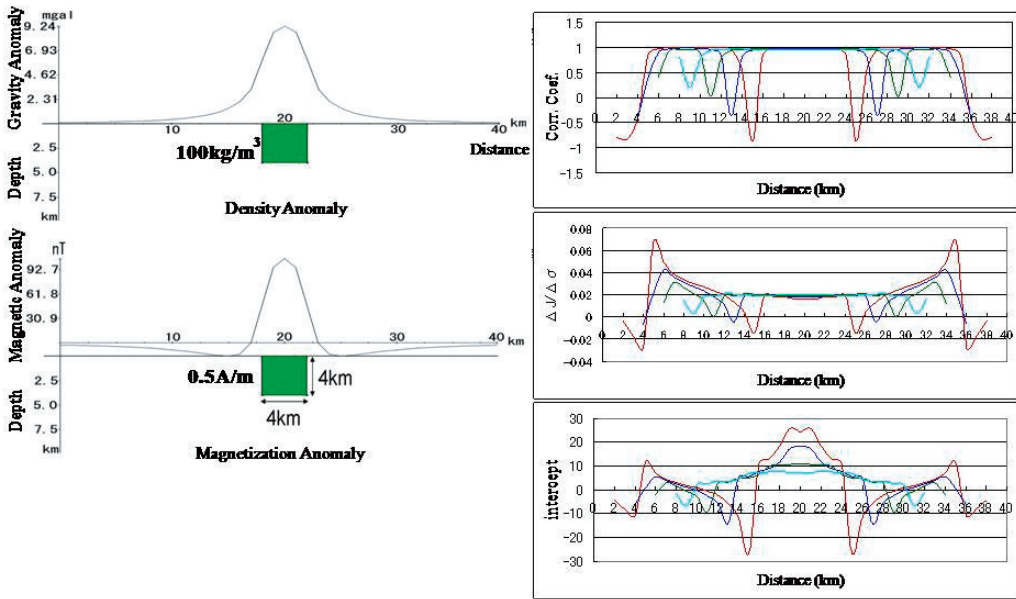


Fig. 1. MWP analysis results of the single rectangular anomaly structure for various window sizes. The left figure shows the gravity and magnetic anomalies and the right figure shows MWP analysis for the single rectangular structure. The color lines represent window sizes; Red: 4km, Blue: 8km, Green: 12km, Light blue: 16km. The "Corr. Coef" shown in the right figure represents correlation coefficient between total magnetic intensity anomaly reduced to the pole (T_z in equation (7)) and vertical derivative of the gravity anomaly ($\partial g / \partial z$). The " $\Delta J / \Delta \sigma$ " and the "intercept" represent slope and " A " in equation (7) respectively.

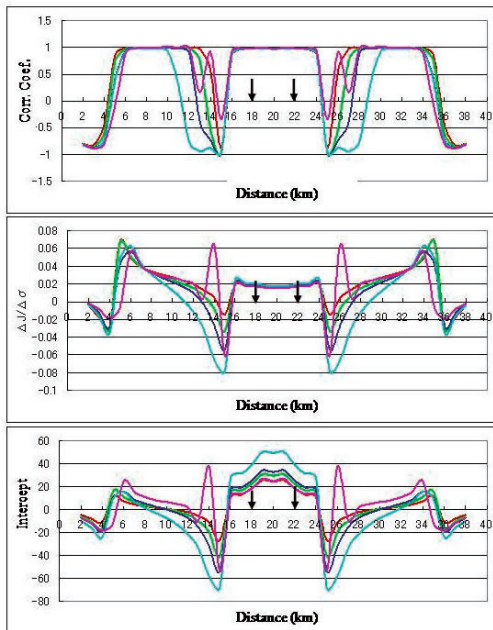


Fig. 2. MWP analysis results of single rectangular anomaly structures for various base depths and combined structures with different density or magnetization anomaly (Width of rectangular structure: 4km, density anomaly; 100kg/m³, magnetization anomaly; 0.5A/m, windows size is 4km. Symbols are same as Fig. 1.). The color lines represent base depth of rectangular structures; Red: 4km, Green: 6km, Blue: 8km. The blue-green line represents the result for single density and combined different magnetization anomaly structures; upper 4km: 0.5A/m, lower 4km: 1.0A/m. The pink line represents the result for single magnetization and combined different density anomaly structures; upper 4km: 100kg/m³, lower 4km: 200kg/m³.

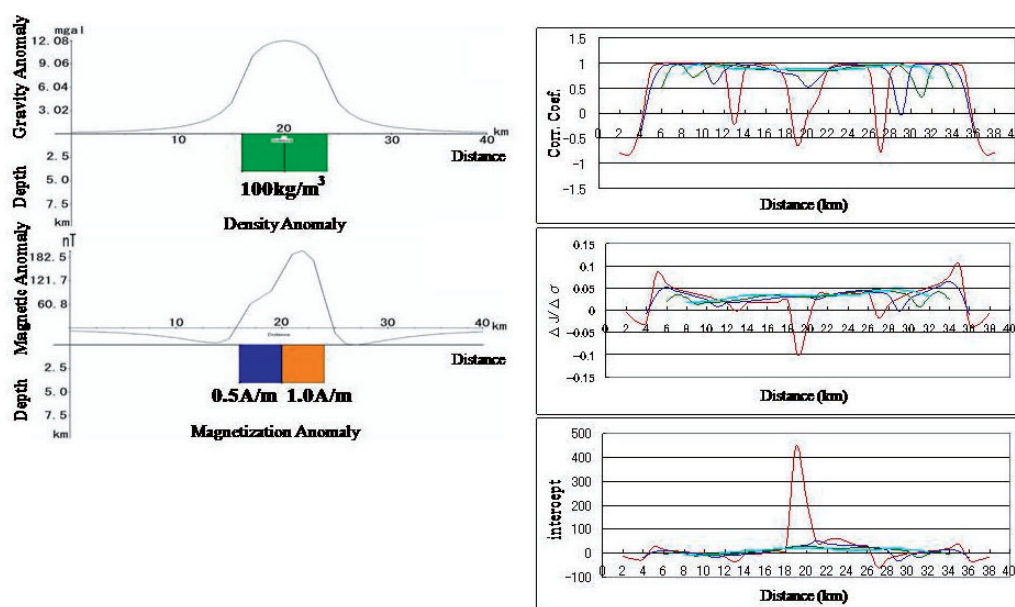


Fig. 3. MWP analysis results for single density anomaly and combined different magnetization anomaly structures. The left figure shows the gravity and magnetic anomalies due to the single density anomaly and combined magnetization structure. The right figure shows the result of MWP analysis for the combined structure (Symbols are same as Fig. 1.). The color lines represent window sizes: Red: 4km, Blue: 8km, Green: 12km, Light blue: 16km.

とした時の MWP 法解析結果である。また、底辺の深さが 8km の矩形構造の下半分を上半分の 2 倍の密度（水色線）または磁化強度（桃色線）の構造に置き換えた複合構造に対する解析結果も示した。図によると、矩形構造の底辺の深さが変わっても、また、物性の異なる矩形構造を下半分に置き換えた複合構造の場合においても、MWP 法によって計算される相関係数や $\Delta J / \Delta \sigma$ の急変位置は、均質な矩形構造が地下に存在する場合と同じ位置である。従って、これらの値の急変位置により鉛直方向の構造の違いによらず水平方向の構造境界を推定することができる。一方、これらの値の急変点より外側の変化は、鉛直方向における構造の違いにより異なる。構造が深くまである方が変化は緩く、広い範囲に及ぶ。特に、異なる物性の構造がある場合は、その変化には不規則な変動がみられる。また、構造上でも $\Delta J / \Delta \sigma$ や切片の値に変化が見られる。

次に、物性の異なる矩形構造が水平方向に隣接している場合に MWP 法解析を行った結果を示す。Fig. 3 に、密度異常は一律で 100 kg/m^3 、磁化強度異常は青色の方が 0.5 A/m 、橙色の方が 1.0 A/m とした構造（左図）に対して MWP 法解析を行った結果（右図）を示した。また、Fig. 4 には、Fig. 3 の場合と同様の磁化強度の異なる 2 つの岩体の境界が 45 度傾いている場合について、Window の大きさを 4km として解析を行った結果と構造境界が鉛直な場合の結果とを重ね合わせて示した。この図によると、磁化強度異常と密度異常との比の値が 2 倍となるような構造を考えると、MWP 法解析によって計算される $\Delta J / \Delta \sigma$ の値も 2 倍の値となり、磁化強度の違いは明らかにみられる。また、傾斜境界の場合の方が構造境界付近における相関係数が

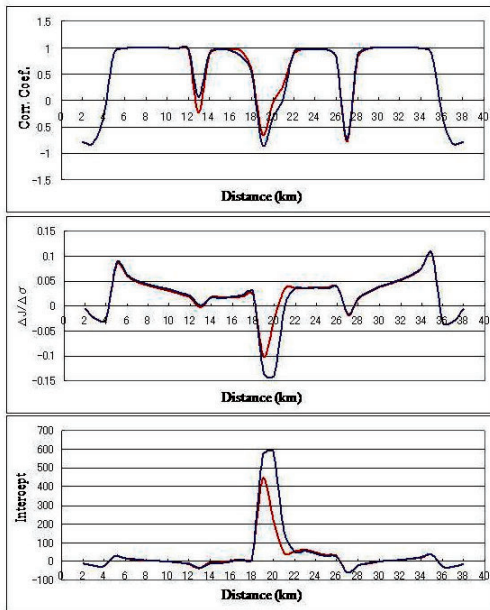


Fig. 4. Comparison of the MWP analysis results between vertical boundary and inclined boundary. (Symbols are same as Fig. 1.) The red line represents vertical boundary and the blue line represents inclined boundary case.

より 1 から離れた値を取る（極小値が小さい）。また、鉛直境界の方が $\Delta J/\Delta\sigma$ の極小値がより尖っているように見える。さらに、構造境界の位置を境にして相関係数の変化のようすが変わっており、磁化強度異常値と密度異常値との比が小さい構造の方で極小値を取る。例えば、Fig. 4 において、19km から 20km にかけては相関係数の値が急激に増加しているが、20km から 21km にかけては幾分緩やかに増加しているようすが見られる。これらのことをまとめると、相関係数が変化している位置において、 $\Delta J/\Delta\sigma$ の値を見ることにより境界が傾斜している可能性を示唆することができると考えられる。また、構造の境界が存在する場合に、相関係数は $\Delta J/\Delta\sigma$ が小さい構造の方で極小値を取ることから、実際に観測された重力・地磁気異常データに対して MWP 法解析を行い、水平方向の構造境界の位置を判断する場合、相関係数の急変位置から左右どちらの方向に動かせばよいかを極小値の位置から推定することができる。

IV. 北海道北部地域への適用

北海道北部地域は、中軸部を通る変成帯の西側より日本海側にかけては数多くの微小地震が観測されているが、変成帯の東側の北見山地周辺では紋別付近を除き、ほとんど地震が発生していない地域である（高橋・笠原，2005）。また、この地域の日本海側にはほぼ南北方向の走向を持つ褶曲構造が卓越しており（岡村，2002）、さらに長期的な測地測量結果（国土地理院 WEB サイト）や最近の GPS 観測による地殻歪の分布（高橋・笠原，2005）から、アムールプレートとオホーツクプレートとの境界に形成された歪み集中帯であると考えられている。

Fig. 5 に北海道北部地域の重力異常および極磁気変換した磁気異常分布図を示す。重力異常

値としては、山本明彦愛媛大学教授のコンパイルした仮定密度を 2670kg/m^3 としたときブーゲー異常データを用い、磁気異常値については、地質調査所による広域空中磁気探査データのうち、天北地域（1974 年観測）、北見（2. 紋別）地域（1978 年観測）、宗谷－網走海域（1971 年観測）、稚内－札幌海域（1970 年観測）の 4 地域のデータセットを使用した。磁気異常データについては、以上のデータセットに対して以下の処理を行った。

- ①UTM 座標系から重力と同じ GRS80 座標系への座標換算（GIS ソフトウェアの GRASS を利用）。
- ②同一高度（5000 feet）のデータへそろえるための上方接続（GMT コマンドの `grdfft` を利用）。
- ③データセットの統合（GMT コマンドの `grdmath` を利用）。
- ④周波数フィルタの方法（加藤，1987）による極磁気変換。

Fig. 5 によると、重力異常は、概ね西側で低重力、東側で高重力を示す。また、天塩川河口～サロベツ原野付近も低重力異常地域である。一方、磁気異常は、中軸部変成帯や天塩川河口に高磁気異常が見られるが、北部や東部は相対的に低磁気異常地域である。中軸部変成帯付近は、高磁気異常帯であるが重力異常では高重力異常と低重力異常地域の境界にあたり値の急変帯である。また、宗谷岬付近は高重力異常であるが低磁気異常であり、天塩川河口付近は低重力異常であるが高磁気異常である地域である。

北緯 45 度線に沿う測線について、これらの異常分布に MWP 法を適用した結果を Fig. 6 に示す。Window の幅は 8km とした。この結果を地質図と比較し、MWP 法による境界と地質境界とが一致する境界を赤矢印、地質境界が見られない境界を黒矢印で示した。赤の点線で囲った 28-36km の範囲は、相関係数がほぼ一定であるのに対し、 $\Delta J/\Delta\sigma$ の値が 32km 付近で変化していることから、岩体の深さ方向の大きさが変化していると推定される。地質境界と MWP 法によって推定された構造境界が一致しない理由としては、（1）深部に物性の異なる構造が存在し

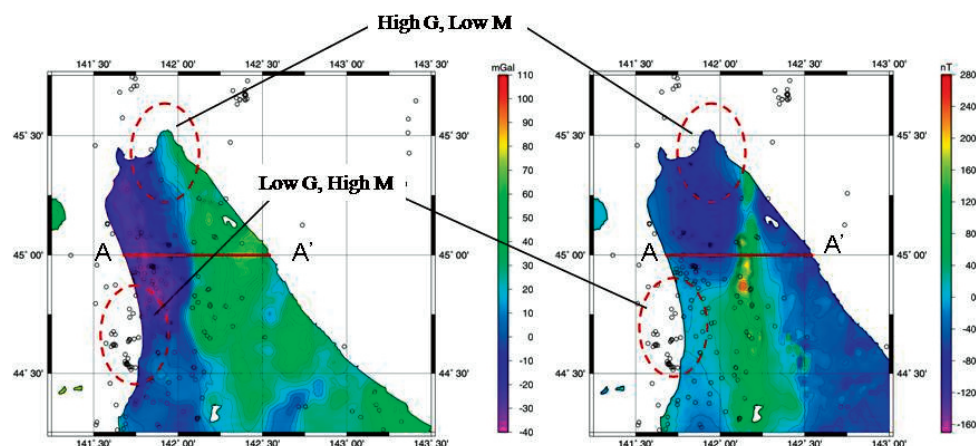


Fig. 5. Gravity and magnetic anomaly map of Northern Hokkaido. "High G Low M": high gravity anomaly and low magnetic anomaly. "Low G High M": Low gravity anomaly and high magnetic anomaly. The A-A' represent the line applying the MWP analysis in Fig. 6, and the Talwani method in Fig. 7.

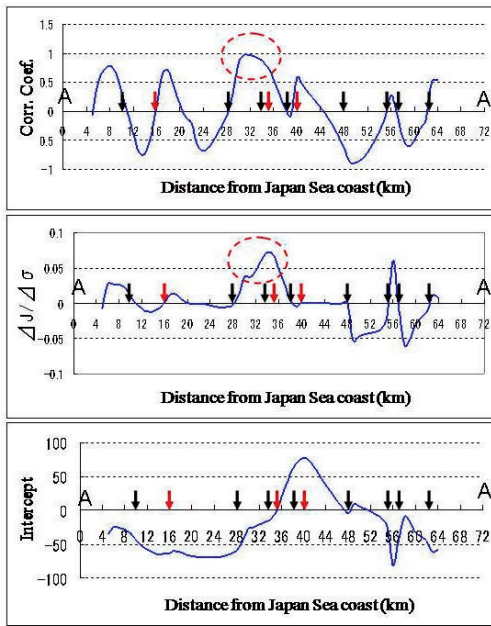


Fig. 6. Density and magnetization boundaries inferred from the MWP analysis along 45° N (A-A' line in Fig. 5. Window size: 8km. Symbols are same as Fig. 1.). The Red arrows represent structure boundaries recognized by the MWP analysis and the geological map. The Black arrows represent structure boundaries recognized by the MWP analysis alone.

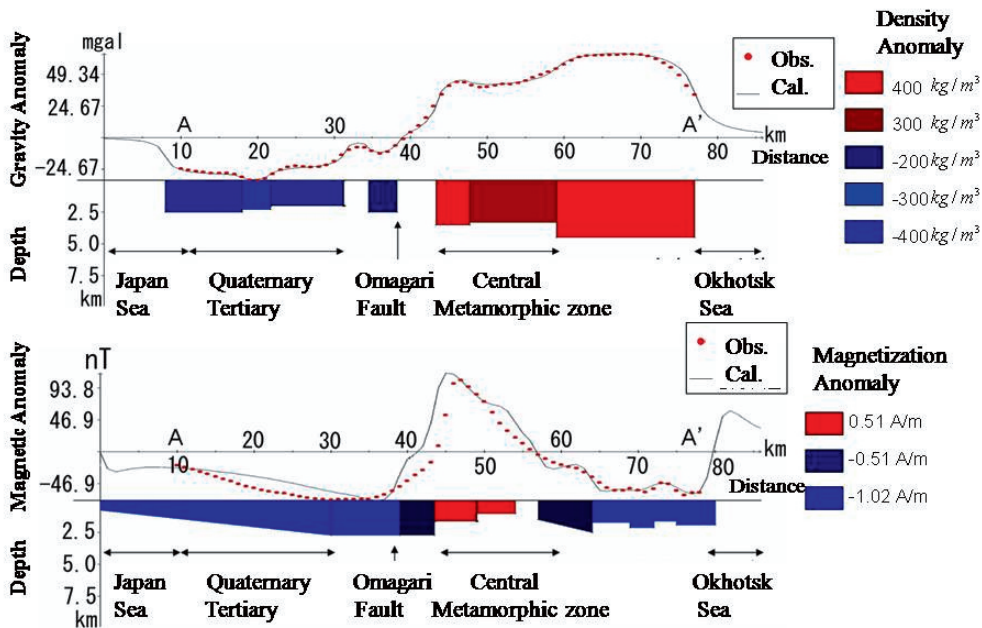


Fig. 7. Density and magnetization anomaly structures along 45° N (A-A' line shown in Fig. 5) based on the Talwani method.

ている, (2) 構造境界が傾斜している, (3) 密度・磁化強度の構造境界と地質境界は必ずしも一致するというわけではない, 等が考えられる. さらに, Fig. 6 において 22km と 48km および 61km の位置では, 相関係数の変化量が変っていることが見て取れる. そこで, 22km お

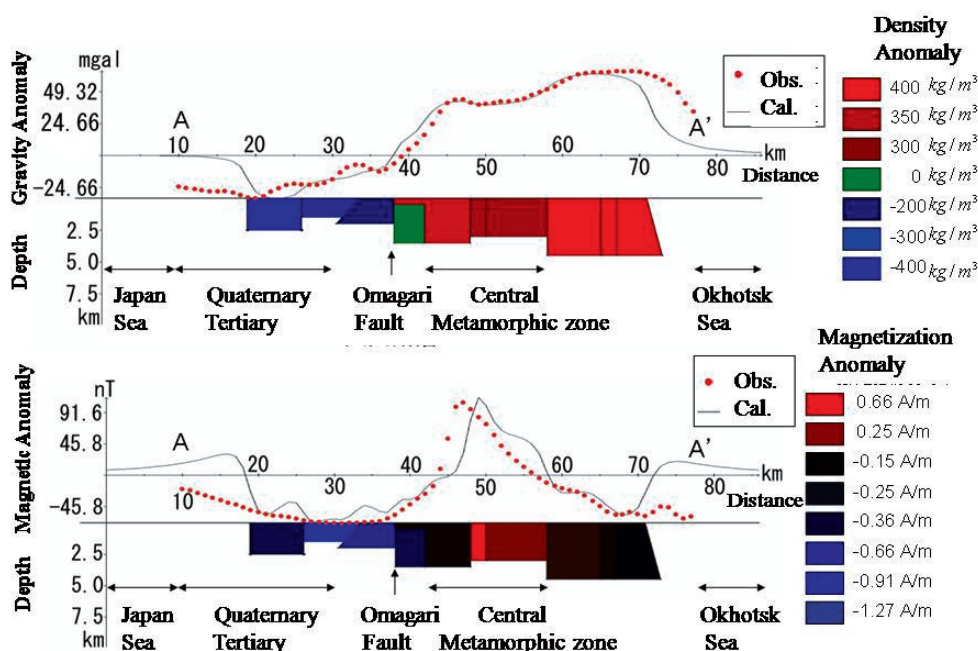


Fig. 8. Density and magnetization anomaly structure along 45° N (A-A' line shown in Fig. 5) modified by using the MWP analysis result based on the structure shown in Fig. 7.

よび 61km の位置における $\Delta J/\Delta\sigma$ の値に注目すると、 $\Delta J/\Delta\sigma$ の値はその位置において緩やかに変化しており、その構造境界は傾斜している可能性があると考えられる。一方、48km の位置では $\Delta J/\Delta\sigma$ の値が大きく変化しており、その構造境界はほとんど傾斜していないと思われる。

以上、MWP 法による構造推定について述べてきたが、それだけでは、構造の形状や境界の位置を推定できても、密度や磁化強度異常値、鉛直方向の構造の大きさ等を定量的に求めることは難しい。そこで、実際に MWP 法を地下構造解析に適用するには、まず、Talwani (1959, 1965) の方法により重力異常、磁気異常に対応する構造を求め、その構造を MWP 法から予測される構造境界の形状、深度方向の変化などを考慮して修正する方法が考えられる。Talwani 法による得られた密度構造および磁化構造を Fig. 7 に示す。磁気異常は IGRF2005 を参照して 50761nT を基準とした。また、ここでは構造境界を地質分布を基に決めた。それを基に MWP 法の結果を考慮し、修正した結果を Fig. 8 に示す。MWP 法の結果を合わせることで、地下構造にいくつかの拘束条件を付け加えることができる。

V. 考 察

Talwani の方法等により密度構造や磁化構造を推定する際には、地質図および地質調査結果を参照して構造境界を決めることが多い。一般には、重力異常をよく説明できる密度異常構造と磁気異常をよく説明できる磁化強度異常構造とはそれぞれが一致しないこともあり、重力、磁気

を別々に解析すれば求められる構造の任意性が大きい。しかし、MWP 解析により予め密度構造や磁化構造の構造境界の位置や形状が推定されれば、Talwani の方法による構造解析の際に重力異常や磁気異常を同時に満たすような構造は、求めやすくなると考えられる。Fig. 7 の地質分布を基にした Talwani の方法による構造解析結果は、密度構造境界と磁化構造境界が一致しないが、Fig. 8 の MWP 法解析結果を踏まえた構造解析結果は、密度異常構造と磁化強度異常構造の形状が一致している。このことから、MWP 法解析結果は Talwani の方法による構造解析の拘束条件として有用であると言える。

Fig. 8 の構造解析結果によると、中軸部変成帯より西側では、低密度・低磁化強度の構造が薄く分布しており、層厚はほぼ一定である。これは第四紀・新第三紀の堆積層であると思われる。一方、中軸部変成帯より東側では、高密度・低磁化強度の構造が分布している。Fig. 7 の地質分布による構造解析結果では、密度異常構造では層厚が厚く推定されているのに対し、磁化強度異常構造では層厚が薄く推定されている。一般に、密度異常構造境界と磁化強度異常構造境界は必ずしも一致するというものではないので、地質分布を考慮した構造解析結果では、深さ方向の議論をするのは困難である。しかし、Fig. 8 の MWP 法解析結果を踏まえた構造解析では、密度異常構造と磁化強度異常構造の形状に一定の条件が与えられるので、深さ方向の議論が可能となる。Fig. 8 によると、中軸部変成帯より東側の高密度・低磁化強度構造は層厚が 4.5km と推定されており、ほぼ一定である。中軸部変成帯では、高密度・高磁化強度の構造が分布している。

微小地震の観測結果（高橋，笠原，2005）によると、北海道北部地域では中軸部変成帯や大曲断層を境として、地震の発生頻度や震源分布に明瞭な違いが見られるが、Fig. 8 の結果では微小地震の発生頻度が異なる地域の境界（58km 付近の位置）において、明瞭な密度および磁化強度構造の境界が見られる。また、38km 付近には大曲断層があり、反射法地震波探査（核燃料サイクル開発機構，2003）でもその位置が推定されている。Fig. 8 ではその位置に構造境界が認められ、特に密度異常構造では断層を境にその東側と西側では明瞭な密度差が見られる。

VI. ま と め

以上、Poisson の関係式を用いた北海道北部地域における重力・磁気異常の地下構造解析結果について述べた。Poisson の関係式は、磁気ポテンシャルと重力ポテンシャルとの関係式であり、重力および磁気両方のデータがある場合にいろいろな利用方法が考えられてきた。地下構造解析に用いる場合、対象範囲において物性が均一でなければならないという仮定のもとに成立しているため、そのまま使用することは困難である。そこで本研究では、対象領域を分割し、その中を一様として扱う MWP 法（Chandler et al., 1981）が、実際の複雑な地下構造を推定する手段として使える可能性を検討した。その結果、MWP 法が構造境界の位置や形状を推定するために役立つことを示した。その際に window size を適切に選択する必要があるが、それは結局データの測点間隔に応じて選択しなければならないであろう。また、MWP 法解析による構造の推定では、密度や磁化強度構造境界の位置や形状を推定することは可能であるが、それだけで密度や磁

化強度構造を定量的に求めることは難しい。そのためには、従来からある Talwani の方法等によって構造解析を行い、その中で構造境界に関する拘束条件として MWP 法の結果を用いる方法が考えられる。今後、地下構造を求めるインバージョンの中に MWP 法が組み込まれることが望まれる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、愛媛大学理学部山本明彦教授には、コンパイルされた重力異常データを提供していただいた。また、産業技術総合研究所地質調査総合センター・大熊茂雄地球物理情報研究グループリーダーと中塚正主任研究員には、空中磁気データベースの磁気異常データを提供していただき、その処理プログラムの使用に関してアドバイスをいただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aero-magnetic maps: Pseudo gravity anomalies, *Geophysics*, **22**, 359-382.
- Bott, M.H.P., R.A. Smith and R.A. Stacey, 1966. Estimation of the direction of magnetization of a body causing a magnetic anomaly using a pseudo-gravity transformation, *Geophysics*, **31**, 803-811.
- Chandler, V. W., J. S. Koski, W. J. Hinze and L.W. Braile, 1981. Analysis of multi-source gravity and magnetic anomaly data sets by moving-window application of Poisson's theorem, *Geophysics*, **46**, 30-39.
- Garland, G. D., 1951. Combined analysis of gravity and magnetic anomalies, *Geophysics*, **16**, 51-62.
- 核燃料サイクル開発機構, 2003. 幌延深地層研究計画平成 14 年度調査研究成果報告, 52pp.
- 加藤元彦, 1987. 2 次元フィルターの理論と重力・磁力分布の解析, ラティス, 262pp.
- Mendoca, C.A., 2004. Automatic determination of the magnetization-density ratio and magnetization inclination from the joint interpretation of 2D gravity and magnetic anomalies, *Geophysics*, **69**, 938-948.
- 岡村行信, 2002, 第 3 期以降の歪集中帯, 大竹政和, 平朝彦, 太田陽子編, 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会, 111-121.
- 高橋浩晃・笠原稔, 2005. 留萌支庁沿岸部の地震活動と北海道北部のテクトニクス, 北海道大学地球物理学研究報告, **68**, 199-218.
- Talwani, M., 1965. Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, **30**, 797-817.
- Talwani, M.J., L. Worzel and M. Landisman, 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, *J. Geophys. Res.*, **64**, 49-59.