

表面積分を用いた三次元六面体モデルによる磁気異常解析の研究

Study of magnetic anomalies computed by 3-D hexahedral model using surface integral

丸山純也*, 坂中伸也 (秋田大学大学院国際資源学研究所)

Junya Maruyama*, Shin'ya Sakanaka (Graduate School of International Resource Sciences, Akita University)

Abstract

In various papers on magnetic exploration, a number of the analytical and numerical methods for modeling magnetic bodies by forward modeling have published so far. Especially, numerical analysis presented by Talwani (1965) is widely used when we estimate the underground structures such as dykes, mineral deposits, faults and so on. Although this method can calculate the arbitrary shapes by dividing them into laminae, the calculation is solved by using numerical integration, not analytical integration. The purpose of this paper is to develop new method for calculating magnetic anomalies due to complicated shapes of magnetic bodies by analytical calculation. Therefore, we developed a calculation for the arbitrary hexahedral model which can handle various shapes of magnetic bodies by using Gauss divergence theorem and coordinate transformation. This hexahedral model is effectively used for estimating the underground structure better than rectangular model. Moreover, we made the forward modeling program of 3-D hexahedral model. We also performed the modeling of geological structure to compare the theoretical values with the observed values. As an example to model the geological structure, we focused on the intrusive rock at a quarry site in Daisen city, Akita prefecture. The theoretical values showed a good correlation with the observed values, which confirmed validity of our newly developed computation.

1. はじめに

磁気異常解析に用いられる3次元モデル計算にはこれまで数多くの計算方法が提言されてきたが、解析的な方法として Bhattacharyya (1964)による直方体モデルや、Barnett (1976)による多面体を三角面の集まりとして計算する方法などがある。

本研究ではこれまでとは異なる新たな解析的アプローチによるモデル計算法の確立を目指し、表面積分を用いた三次元六面体モデルと呼ばれるモデル計算法を開発した。導出した理論式を用いれば多面体モデルも導くことはできるが、今回は六面体に限定して説明していく。本研究は Talwani and Heirtzler (1964)および Talwani (1965)によるモデル計算法を応用しているため、各頂点の座標値さえわかれば六面体モデルを作り出すことができる。このほか、極座標に変換をしたり、回転行列を利用して座標変換を行ってはいけるものの、比較的単純な方法で計算式を導出することができている。さらに、六面体モデルの順解析プログラムも作成し、このプログラムを使い秋田県大仙市土川杉沢の採石場跡地に分布する貫入岩をモデル化する解析も行い、その解析結果の検討も行った。

2. 三次元六面体モデルについて

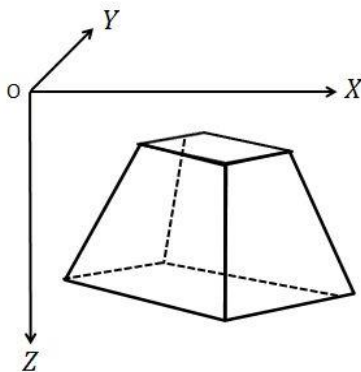
三次元六面体モデルとは、任意形状の六面体で生じる磁気異常 3 成分を解析的に求める事ができるモデル計算法である。モデルは六面体を構成する 8 頂点がわかれば理論値を導出する事が可能であり、任意の方向に回転する事もできる。また、解析的に計算されているので、精度の高い値も求める事が可能となる。第 1 図に、六面体モデルの概略図を示す。

本研究で導出した三次元六面体モデルの磁気異常計算式は、体積積分として表現している磁気ポテンシャルをガウスの発散定理により表面積分へ書き改めて計算を進めている。よって、ポテンシャル論から磁気異常 3 成分は (1) 式で表現できる。

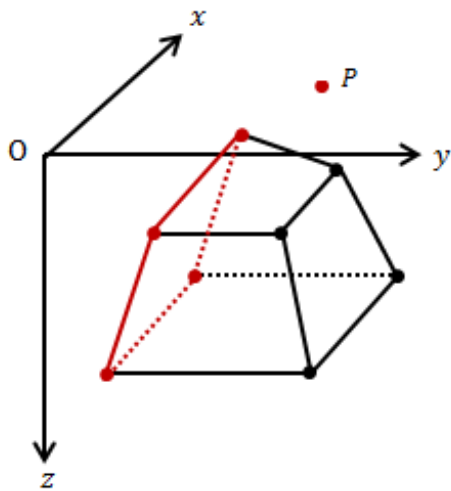
$$\begin{aligned}\Delta X &= \iint_S \frac{x - x_0}{R^3} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \\ \Delta Y &= \iint_S \frac{y - y_0}{R^3} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \\ \Delta Z &= \iint_S \frac{z - z_0}{R^3} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS\end{aligned}\tag{1}$$

地球電磁気学で用いられる z 軸を鉛直下向きにとる右手座標系では、x 軸を北成分、y 軸を東成分、z 軸を鉛直成分とすることが多いので、今回もそれに従い、(1) 式の ΔX は磁気異常の北成分、 ΔY は東成分、 ΔZ は鉛直成分としている。

六面体モデルでは各平面 (x-y 平面, y-z 平面, x-z 平面) に平行な四角面モデルを、それぞれ二面(合計六面)表面積分で計算しなければならない。計算手段としては Talwani and Heirtzler (1964) と Talwani (1965) で行われている方法を用いることで、各平面に平行な四角面モデルを導出した。しかし、任意形状の六面体モデルでは、六面それぞれが各平面に平行な形をとらない場合も出てくる。たとえば、第 2 図 (a) の六面体モデルの六面は各平面に平行ではない。そこで、回転行列を利用して六面それぞれが各平面に平行となるように、六面体モデルの各頂点および観測点、磁化成分、地球磁場成分を回転移動させることが必要となる(第 2 図 (b))。こうすることで、第 2 図 (a) と同じ磁気異常値を見かけ上求めることが可能となる。我々はこのような計算法を元に順解析プログラムを作成し、本研究の目的でもある地下構造を解析する際には、このプログラムを使用して解析を行うことにした。

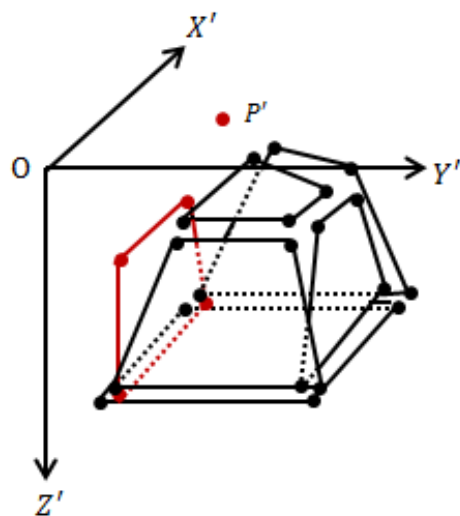


第 1 図 三次元六面体モデルの概略図.
Fig.1 Schematic of 3-D hexahedral model.



第2図 (a) 三次元空間 $O-xyz$ 内に存在する六面体モデル. 赤色は六面体モデルを構成する四角面モデルとその観測点を表している.

Fig.2 (a) Hexahedral model in $O-xyz$, 3-D space. Red color represents the quadrangular facet model and observed point.



(b) 回転行列を利用した六面体モデルの概略図. 赤色の四角面モデルと観測点は(a)と位置関係が同じであるため, 生じる磁気異常値は同じとなる.

(b) Schematic of hexahedral model using rotation matrix. Since the quadrangular facet model and observed point of red color are same relative positional relation with (a), magnetic anomalies due to (b) are the same as those of (a).

3. フィールドへの応用

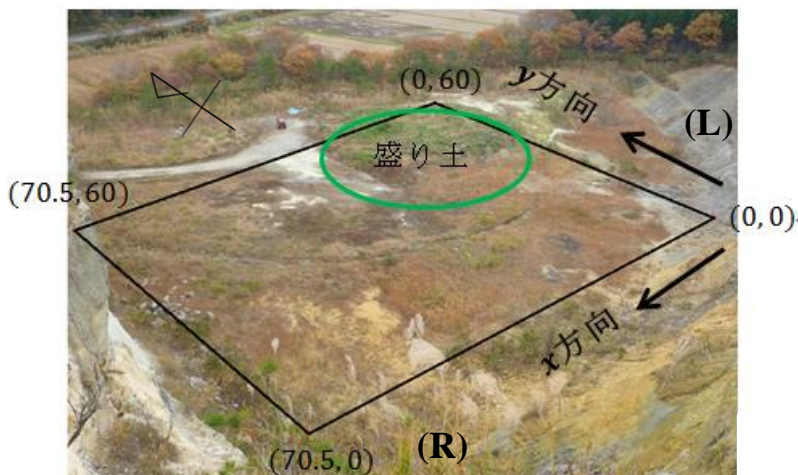
六面体モデルをフィールドへ応用するため, 秋田県大仙市土川杉沢に分布するデイサイト質の貫入岩をターゲットに選びモデル化を行った. 本調査地域に赴くと酸性火砕岩を斜めに貫く貫入岩が観察でき, 上部では溶岩が横方向に広がっている(第3図). また, 周辺には風化されずに残った岩脈状の岩体もいくつか確認できる. 土谷(1994)によると, この岩脈は中期中新世に貫入したデイサイト質溶岩によるものと言われており, 砂小淵層の諏訪山デイサイトに相当していると考えられている. 露頭表面は変質が激しく, 酸性火砕岩は黄土色となっているが, 新鮮な露頭では灰白色を呈している. また, 貫入岩のサンプルを採取し顕微鏡観察を行うと, 組織は主として斜長石の斑晶から成り, 苦鉄質鉱物に乏しいことが確認できた.



第3図 デイサイト質溶岩が貫入した露頭. 貫入方向は西北西～東南東方向である.

Fig.3 The outcrop intruded by dacitic lava. Intrusive rock is toward the direction of West North West-East South East.

第4図に測定範囲を示す. 第4図中の(R), (L)は, 第3図中の(R), (L)の位置に対応している. 測定範囲はx方向に70.5m, y方向に60mとり, その囲まれた範囲内で磁気探査が行われた. 磁気探査は2009年8月8日と8月24日の2回にわたって行われ, 1.5m間隔の繰り返し測定が実行されている. また, 使用したオーバーハウザープロトン磁力計の高さは234cmに調節した. 測定範囲の $x = 0 \sim 26\text{m}$, $y = 40 \sim 60\text{m}$ の範囲には盛り土があり, 周囲より地形が高くなっている. しかし, 詳細な地形測量が行われていないため, 正確な高さを推定することはできていない. 加えて, 地磁気日変化などの磁場の時間変化補正を行うため, 原点から約30m東にプロトン磁力計を置き, 全磁力値を連続的に記録した.

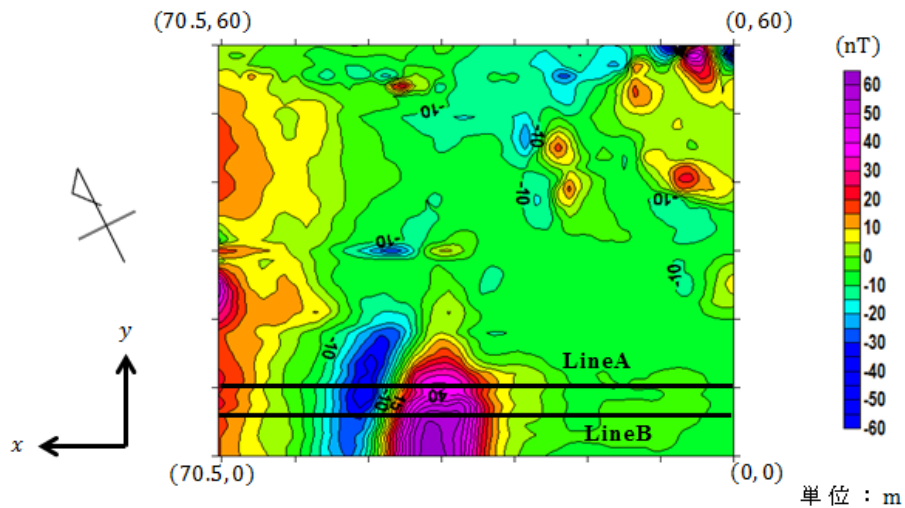


第4図 測定範囲の概略図.

Fig.4 Schematic of survey area.

4. 測定結果

磁気探査の測定結果を第5図に示す. ただし, 第5図は日変化補正済みである. 測定範囲の左側には縦に連続した高磁気異常が確認できるが, これは風化されずに残った岩脈状岩体からの異常であることが周囲の地形から判断して推定することができた. また, 右上には局所的な磁気異常が散布しているが, これは盛り土による影響であることが考えられる. 貫入岩からの磁気異常は明確に確認ができ, 明瞭な正負の異常が認められる.

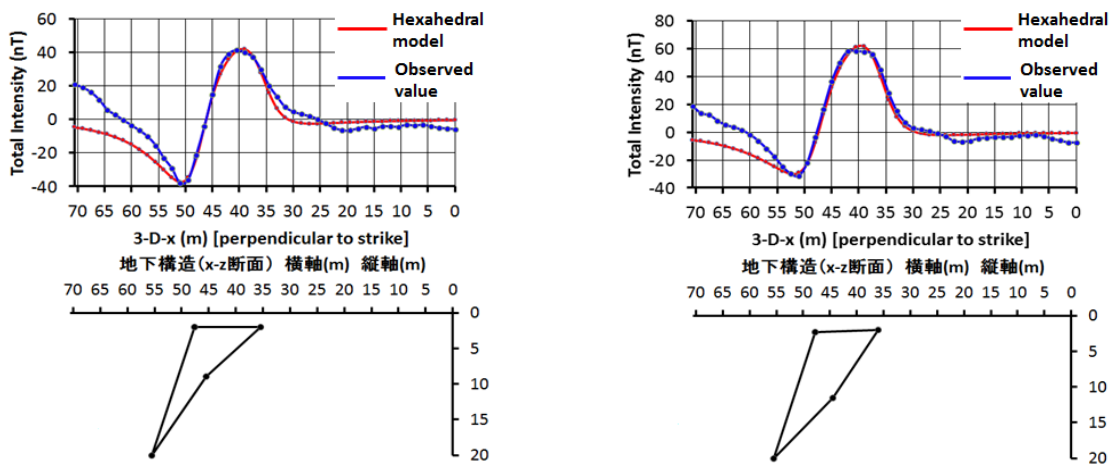


第5図 測定範囲内で得られた磁気異常分布図. コンターインターバルは5nTである.

Fig.5 Distribution map of magnetic anomalies obtained in survey area. Contour interval is 5nT.

5. 解析結果

測定範囲内に存在する貫入岩の構造を推定するために、開発したプログラムを用いて順解析を行った。解析を行った測線は第5図中のLineA ($y = 10.5\text{m}$)とLineB ($y = 6\text{m}$)である。その解析結果を第6図の(a), (b)に示す。赤色の曲線が理論値であり、青色の曲線が測定値である。また、下図には与えたモデルの概形を表示している。ただし、モデルは $x - z$ 断面から見ている図である。



第6図 (a) 上図:LineAにおける測定値と理論値の比較結果. 下図:貫入岩モデル.

(b) 上図:LineBにおける測定値と理論値比較結果. 下図:貫入岩モデル.

Fig.6 (a) Upper figure: Calculation result compared theoretical values and observed ones on LineA. Lower figure: Intrusive rock model.

(b) Upper figure: Calculation result compared theoretical values and observed ones on LineB. Lower figure: Intrusive rock model.

LineA で与えたパラメータは、方位角 315.3° 、偏角 24° 、伏角 40.9° 、磁化 3A/m であり、8 頂点の座標値は(47.6, 4.3, 1.98), (55.5, 4.3, 20), (45.5, 4.3, 8.9), (35.5, 4.3, 1.98), (47.6, 7.7, 1.98), (55.5, 7.7, 20), (45.5, 7.7, 8.9), (35.5, 7.7, 1.98)である。LineB で与えたパラメータは、方位角 315.3° 、偏角 24° 、伏角 43.8° 、磁化 3A/m であり、8 頂点の座標値は(47.8, 4.4, 2.25), (55.5, 4.4, 20), (45.5, 4.4, 11.5), (36, 4.4, 1.98), (47.8, 7.6, 2.25), (55.5, 7.6, 20), (45.5, 7.6, 11.5), (36, 7.6, 1.98)となっている。以上の解析結果から貫入岩は多角柱でモデル化することが可能とわかり、モデルのy方向の厚みは LineA で 3.4m 、LineB で 3.2m となった。ただし、方位角を除いた各パラメータはグリッドサーチで決定している。

第 6 図より両モデルの最深部の値は 20m であるが、形状を保たせたまま 20m 以深にパラメータを設定したとしても磁気異常値はそれほど変化しないため、貫入岩は 20m 以深に続いている可能性がある。しかし、これだと深さは際限なく続かせることができってしまうため、深さ方向の値を変えても磁気異常の感度にそれほど影響を与えない最低限の深さである 20m を採用した。

6. 解析結果からの考察

解析結果から、最適な磁化強度の値は 3A/m となった。これは玄武岩質火山岩からなる伊豆大島火山の平均磁化 7.0A/m (牧野・他, 1988)や、安山岩-デイサイト質火山岩からなる雲仙普賢岳の平均磁化 5.1A/m (茂木・他, 1995)に比べて低い数値である。この原因としては、対象となる貫入岩はガラス質に加え斑晶は主に斜長石から構成されており、苦鉄質鉱物に乏しいためと考えられる。また、風化の進行も大きいということから、 3A/m は妥当であることがいえる。しかし、貫入岩体の鉱物同定は行ったものの、実際に磁化強度等を測定する古地磁気学的手法は行われていない。そのため、 3A/m は懐疑的な値であることも否定はできない。このことは磁化の方向にも言えることで、今回の解析結果からは LineA で偏角 24° 、伏角 40.9° 、LineB で偏角 24° 、伏角 43.8° という解析結果が得られた。偏角や伏角についても精密な測定を行っていないため信憑性には欠けるものの、LineA、LineB はおおよそ同じ値であるため、信頼性は高いことがいえる。

次に貫入岩モデルについてであるが、第 6 図より LineA、LineB は多少の違いはあるものの、ほとんど同じ方向に貫入し、形状も一致していることがわかる。両モデルは西北西～東南東方向に貫入している結果となり、第 3 図の地表に見える貫入岩も同様の方向に貫入している。地形測量を行っていないので定量的には議論できないが、整合性のとれる解析結果となったことがいえる。

深さ方向についてはモデルの長さを 20m までとしているが、解析から 20m 以深に続いている可能性も考えられる結果となった。これは未知パラメータが多い所以のところがあるので、先に述べた古地磁気学的手法を取り入れることにより解消することが求められる。

本研究の解析では貫入岩の上部に存在する堆積層や、側方に分布する酸性火砕岩などのモデル化は行っていない。堆積層は主に酸性火砕岩からなるものと考えられ、風化も強く、磁化強度は相対的に小さな値を持つことが推定されるため今回は無視をしたが、磁気異常

値にはある程度の寄与が予想される。そのためにも、サンプルを回収し、詳細な物性値の測定が必要となる。

7. 結論

本研究では複雑な地質構造解析にも対応することができる三次元六面体モデルを開発した。このモデル計算法は解析的に解かれており、Talwani and Heirtzler (1964)と Talwani (1965)の計算法を応用したものであるため、六面体を構成する 8 頂点の座標値さえわかれば磁気異常が計算可能となる。その際に必要となるのが回転行列の利用であり、8 頂点に加えて観測点、磁化成分、地球磁場成分を回転移動させることで、自動解析が実行できるようになっている。また、六面体モデルをフィールドへ適用することも可能であることがわかり、本研究で開発したモデル計算法は有用であることが確認できた。

参考文献

- 土谷信之, 吉川敏之 (1994): 刈和野地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 16-22.
- 牧野雅彦・中塚正・大熊茂雄・金子力 (1987): 伊豆大島火山の空中磁気異常, 火山, **33**, p217-223.
- 茂木透・田中良和・森川剛夫・日下部和宏・棚橋道郎・中塚正・田中耕平・歌田久司 (1995): 空中電磁法・全磁力測定による雲仙普賢岳及び眉山の地下構造, 火山, **40**, 263-276.
- BARNETT, C.T. (1976): THEORETICAL MODELING OF THE MAGNETIC AND GRAVITATIONAL FIELDS OF AN ARBITRARILY SHAPED THREE-DIMENSIONAL BODY, *Geophysics*, **41**, 1353-1364.
- Bhattacharyya, B.K. (1964): Magnetic anomalies due to prism shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics*, **29**, 517-531.
- Talwani, M. and L.R. Heirtzler. (1964): Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structure of arbitrary shape, in computer in the mineral industries, Part I, Stanford University publication, **9**, 464-480.
- Talwani, M. (1965): Computation with help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, **30**, 797-817.