

磁気異常のフォワードモデリングによる 海底熱水鉱床の検出可能性について

原田 誠・佐柳敬造・竹内昭洋・後藤忠徳・笠谷貴史・
澤 隆雄・中島崇裕・長尾年恭・楠本成寿

Feasibility test for the detection of seabed resources by using a forward modeling
of magnetic anomaly

Makoto Harada, Keizo Sayanagi, Akihiro Takeuchi, Tadanori Goto, Takafumi Kasaya,
Takao Sawa, Takahiro Nakajima, Toshiyasu Nagao, and Shigekazu Kusumoto

東海大学海洋研究所研究報告
第 30 号 (2009) , 59 - 67 頁別刷
Reprinted from Bull. Inst. Oceanic Res. & Develop.,
Tokai Univ. (2009) 30, 59 - 67

磁気異常のフォワードモデリングによる 海底熱水鉱床の検出可能性について

原田 誠¹⁾・佐柳敬造¹⁾・竹内昭洋¹⁾・後藤忠徳²⁾・笠谷貴史³⁾・
澤 隆雄³⁾・中島崇裕⁴⁾・長尾年恭¹⁾・楠本成寿⁵⁾

Feasibility test for the detection of seabed resources by using a forward modeling of magnetic anomaly

Makoto Harada¹⁾, Keizo Sayanagi¹⁾, Akihiro Takeuchi¹⁾, Tadanori Goto²⁾, Takafumi Kasaya³⁾,
Takao Sawa³⁾, Takahiro Nakajima⁴⁾, Toshiyasu Nagao¹⁾, and Shigekazu Kusumoto⁵⁾

Abstract

Detailed information on structure under seafloor is necessary for the estimation of seabed resources such as the hydrothermal deposits and methane hydrate. Although advantages of geophysical exploration near the seafloor are expected for the seabed resources survey, the efficient method has not been well-established. From this point of view, we started a project to develop exploration tools for seabed resources by electric and magnetic methods with a budget from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology - Japan (MEXT). In this project, we carry out research and development mainly regarding measurement of the magnetic field with high-resolution and high sampling rate and electric exploration devices with accurately controlled active source signals. Developed tools will be mounted existing underwater platforms (deep-tow system, ROV, and AUV). To develop the sensors and well designed analyzing tools, we should investigate

-
- 1) 東海大学海洋研究所 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1
Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, 424-8610 Japan
 - 2) 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-1-113
Department of Civil and Earth Resources Engineering Geophysics, Kyoto University, C1-1-113, Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540 JAPAN
 - 3) 海洋研究開発機構 〒237-0061 横須賀市夏島町2-15
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061 JAPAN
 - 4) 静岡大学理学部地球科学科 〒422-8529 静岡市駿河区大谷836
Department of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, 836, Oya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529 JAPAN
 - 5) 東海大学海洋学部海洋資源学科 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1
Department of Marine Mineral Resources, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, 424-8610 JAPAN

(2009年1月22日受付 / 2009年2月1日受理)

the optimum specification and the feasibility of the detection of seabed resources in advance. In this paper, we studied detectability of underground magnetized prism by using a forward modeling technique. We tested cases of shallow body(depth ~ 20m)with the side length of 4 m, and deep body(depth ~ 100m)with the side length of 20m. We also compared the results of different condition of geomagnetic field. The distribution of anomalies of total magnetic intensity indicates the advantage in near sea bottom surveys. For the estimation of spatial resolution of magnetized body, we will carry out an inverse modeling approach to check whether the initial magnetized body will be reconstructed.

緒 言

日本の排他的経済水域(EEZ)は国土の12倍かつ世界第6位の広さを持ち、資源が限られた日本にとって海洋資源の有効活用が重要な課題となっている。加えて、日本周辺における鉱物資源やエネルギー資源の確保の国際的な競争が激化しており、それらの賦存状況をより効果的・効率的に把握するために探査技術の開発が必要とされている。文部科学省は、日本周辺海域の海洋資源の持続的・積極的活用を目的とした「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」を平成20年8月より開始した(文部科学省, 2008)。研究課題は(1)海底位置・地形の高精度計測技術の開発、(2)海水の化学成分の高精度計測技術の開発、(3)海底熱水鉱床等における海底下の構造の高精度計測技術の開発、コバルトリッチクラストの厚さの高精度計測技術の開発、から構成されている。これらは、観測基盤の構築のためのセンサー開発を主な目的としており、将来的な課題として熱水鉱床域やメタンハイドレート等の生成メカニズムの解明及び賦存量評価を挙げている。

海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の賦存量を正確に見積もるためには、海底下の詳細な構造を知る必要がある。それには海底近傍における物理探査が有効であるが、その手法は確立されているとは言い難い。磁気探査や電気探査などの物理探査手法は、陸上の金属資源の探査・開発の進展の中で重要性を増すと共にその技術も高度化してきており、電気探査はメタンハイドレート探査においても注目され始めている。

著者らは、上記のプログラム(3)において「電磁気学的手法を用いた高精度海底地質構造探査ツールの開発」(研究代表者: 佐柳敬造・東海大学海洋研究所)という課題を設定して、深海底の資源探査を目的とした探査ツールの開発を開始した。本プログラムにおいて探査ツールが満たすべき要件は下記の通りである。

- 1) 金属鉱床の検出精度を次のように定める
 - i) 海底下100m程度までは20~30mより高精度
 - ii) 海底下20m程度までは4~5mより高精度
 - 2) 音響的手法と組み合わせた総合的なアプローチであること
 - 3) 耐水深は3,000m以上であること
 - 4) 海底資源開発における実用性を重視する
 - 5) 新たな開発要素と世界水準の開発要素を含むこと
- これに対し、著者らは海底における電気探査および磁気探査を中心として、陸上の物理探査技術を取り入れながら深海における物理探査技術の高度化を図り、各種の物理探査データ(音波・熱・温度等)を統合した探査システムの開発を目指す(佐柳ほか, 2008)。

電気探査および磁気探査装置を開発するにあたり、測定機器類の性能やそれらの運用方法、測定データの処理手法等において、上記の要件の実現可能性を十分に検討しなければならない。本論文では、磁気探査装置を取り上げ、簡単なシミュレーション・テストによって海底下の磁化構造体の検出可能性について検証する。

解析アルゴリズム

体積 V の磁化物体(磁化強度を \mathbf{M} とする)は、磁化物体を構成する磁気モーメント \mathbf{m}_i のベクトル和として定義される(e.g. Blakery, 1995)。

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_i \mathbf{m}_i. \quad (1)$$

磁化強度 \mathbf{M} の磁化物体の微小要素は、個々の磁気ダイポール $\mathbf{M} dv = \mathbf{m}$ と見なせる。このとき、地点 P における磁気ポテンシャルは、下式で表される。

$$V(P) = -C_m \mathbf{M} \cdot \nabla_P \frac{1}{r} dv, \quad (2)$$

ここで、 r はダイポールから P までの距離である。定数 C_m は単位系に依存し、SI 単位系では

$C_m = \mu_0 / 4\pi = 10^{-7}$ (H/m)である。ただし、 μ_0 は真空中における透磁率である。一般に、 \mathbf{M} は位置の関数であり、方向と強度は場所ごとに異なる。すなわち、 Q を dv の位置とした場合、 $\mathbf{M} = \mathbf{M}(Q)$ で表される。磁化物体の全ての要素について積分すると、磁化物体が作る磁気ポテンシャルとなる。

$$V(P) = \int_R \mathbf{M}(Q) \cdot \nabla_Q \frac{1}{r} dv. \quad (3)$$

地点Pにおける磁場は下式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= -\nabla_P V(P) \\ &= -C_m \nabla_P \int_R \mathbf{M}(Q) \cdot \nabla_Q \frac{1}{r} dv, \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{M} は磁化強度、 r は測定点Pから磁化物体の要素 dv までの距離である。 Q は磁化物体中の位置を表す。

このとき、全磁力異常は次式で与えられる。

$$\Delta T = -C_m \hat{\mathbf{F}} \cdot \nabla_P \int_R \mathbf{M} \cdot \nabla_Q \frac{1}{r} dv. \quad (5)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{F}}$ は測定地点における磁力線の全磁力方向の単位ベクトルである。

次に、3次元的に分布する磁化物体による磁場を求める。モデルとして、ここでは(6)式の磁化強度を持つ直方体を仮定し、各辺は x 、 y 、 z 軸に平行であるとする。

$$\mathbf{M} = M(\hat{\mathbf{i}}\hat{M}_x + \hat{\mathbf{j}}\hat{M}_y + \hat{\mathbf{k}}\hat{M}_z), \quad (6)$$

x 、 y 、 z はそれぞれ $x_1 \leq x \leq x_2$ 、 $y_1 \leq y \leq y_2$ 、 $z_1 \leq z < \infty$ を満たすものとする。直方体による地磁気異常が広域的な磁場 $\hat{\mathbf{F}} = (\hat{F}_x, \hat{F}_y, \hat{F}_z)$ の中で測定される場合、原点における地磁気全磁力異常は次式で与えられる (Bhattacharyya, 1964)。

$$\begin{aligned} \Delta T &= C_m M \left[\frac{\alpha_{23}}{2} \log \left(\frac{r-x'}{r+x'} \right) + \frac{\alpha_{13}}{2} \log \left(\frac{r-y'}{r+y'} \right) - \alpha_{12} \log(r+z_1) \right. \\ &\quad - \hat{M}_x \hat{F}_x \arctan \left(\frac{x'y'}{x'^2 + r_{z_1}^2 + z_1^2} \right) - \hat{M}_y \hat{F}_y \arctan \left(\frac{x'y'}{r^2 + r_{z_1}^2 - x'^2} \right) \\ &\quad \left. + \hat{M}_z \hat{F}_z \arctan \left(\frac{x'y'}{r_{z_1}^2} \right) \right] \Bigg|_{x_1}^{x_2} \Bigg|_{y_1}^{y_2} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで α_{12} 、 α_{13} 、 α_{23} 、 r はそれぞれ下式で与えられる。

$$\begin{aligned} \alpha_{12} &= \hat{M}_x \hat{F}_y + \hat{M}_y \hat{F}_x, \\ \alpha_{13} &= \hat{M}_x \hat{F}_z + \hat{M}_z \hat{F}_x, \\ \alpha_{23} &= \hat{M}_y \hat{F}_z + \hat{M}_z \hat{F}_y, \\ r^2 &= x'^2 + y'^2 + z_1^2. \end{aligned}$$

(7)式は、直方体の磁化物体の上面を z_1 、下面を半無限下方とした場合の全磁力異常である。この式について次の2通りの計算、すなわち [1] $z_1 = z_l$ 、 $M = M_0$ 、とした場合と、[2] $z_1 = z_b$ 、 $M = -M_0$ とした場合、の和を求めることで、磁化強度 M_0 で直方体の上面を z_l 、下面 z_b とした場合の磁化物体が作る磁気異常が求められる。

モデル計算方法

緒言に記したように、本プログラムでは、海底下100m程度までは20~30mの精度で、海底下20m程度までは4~5mの精度で海底下の鉱床を検出することが求められる。本論文では、便宜上前者を「浅部構造体」、後者を「深部構造体」と呼ぶことにする。

ここでは、上記の要件を満たすためには海底面近傍での磁気探査が重要であることを示すために、フォワードモデリングにより磁化構造による地磁気全磁力分布を推定する。地磁気全磁力異常の計算方法として、本研究では Bhattacharyya (1964) を基礎とする地磁気異常解析コード (Blakely, 1995) を使用した。この方法では、磁化強度 (M_m) の直方体の磁化物体 ($x_1 \leq x \leq x_2$ 、 $y_1 \leq y \leq y_2$ 、 $z_b \leq z \leq z_l$ 、ただし、各辺は軸に平行であるとする) が任意の地球磁場 (偏角 D_f 、伏角 I_f 、全磁力 F_f) のもとに置かれるものとする。Table 1 に解析に使用するパラメータをまとめる。

Table 1 Parameters for the forward modeling of magnetic anomalies caused by magnetized prism.

磁化ブロックの大きさ	4m 立方 (浅部構造体) 20m 立方 (深部構造体)
磁化ブロックの位置 (z_l)	16m (浅部構造体) 80m (深部構造体)
磁化ブロックの磁化強度 (M_m)	1, 5, 10 A/m
磁化ブロックの磁化方位	地球磁場 (下記) と同じ
地球磁場 (D_f , I_f)	① 偏角 0 度, 伏角 90 度 ② 偏角 +4.5 度, 伏角 39 度
測定点の高度 (z_0)	0, 5, 10, 30, 50m (ただし、海底面からの高さ)

本解析では、磁化物体の形状を簡単のため立方体とする。立方体の大きさは、浅部構造体 (深さ 20m まで) については 4m 立方、深部構造体 (深さ 100m まで) は 20m 立方として、上面までの深さ (z_l) をそれぞれ 16m、80m とする。磁化物体を取り巻く構造の磁化は一樣であるとして、磁化強度の差を 1A/m、5A/m、

および 10 A/m と変える。

また、地球磁場の方向として、二通りについて検証する。一つは、モデル計算の単純化のため、地球磁場の方向を偏角 0 度、伏角 90 度とした場合である。一方は、実際の地球磁場環境下での磁場空間分布を求めるため、偏角 - 4.5 度、伏角 39 度とした場合である。これは、伊豆小笠原弧の火山フロント上に位置する水曜海山(北緯 28 度 34 分、東経 140 度 39 分)近傍の磁気探査を想定した。

なお、モデル計算の範囲として、Fig. 1 に示すように磁化構造体の中心上の $z=0$ 地点を原点として、浅部構造体のモデル計算では ± 50 m、深部構造体のモデル計算では ± 200 m とした。グリッド間隔を 1 m とし、各グリッド $P(x_0, y_0, z_0)$ における磁場を計算する。

本解析では、磁化構造体を作る全磁力異常を海底面 ($z=0$) から高さ 5 m, 10 m, 30 m, 50 m と変えた場合について計算し、高さ 5 m については平面分布を示す。

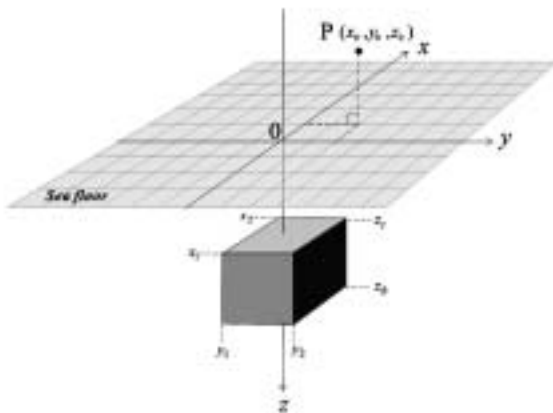


Fig. 1 Field at point $P(x_0, y_0, z_0)$ caused by a uniformly magnetized body of prism shape.

モデル計算結果

(1) 鉛直磁場による磁場分布

i) 浅部構造体

Fig. 2 は、磁化物体の大きさを 4m 立方、磁化強度を (a) 1 A/m (b) 5 A/m (c) 10 A/m と変えたときの y 軸 ($x=0$) に沿う磁場分布のプロファイルである。磁化物体の上面の深さを 16 m とした。いずれの磁化強度においても、海底面 ($z=0$) において最も全磁力異常が大きく、立方体の中心部でピークを示す。磁化

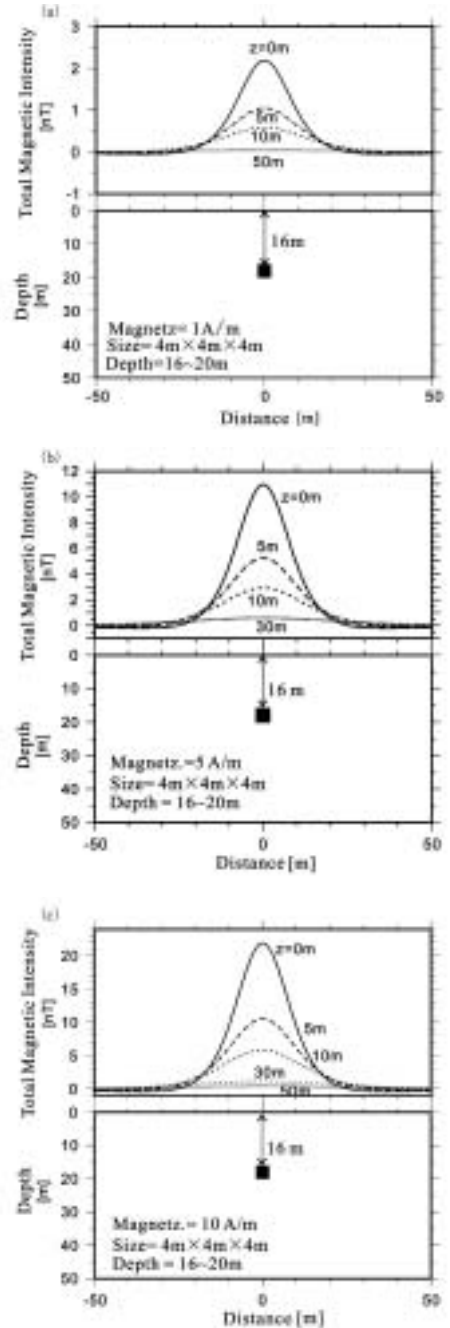


Fig. 2 Calculated magnetic anomalies caused by a magnetized prism for shallow case, of which magnetization are set as (a) 1 A/m, (b) 5 A/m, and (c) 10 A/m. The length of side is 4m, and the depth to the top of prism is set as 16m. The height of field point P are set as 0m, 5m, 10m, 30m, and 50m, respectively. The inclination and declination of geomagnetic field are set as 90 and 0 degrees, respectively. The magnetization of prism is same as geomagnetic field.

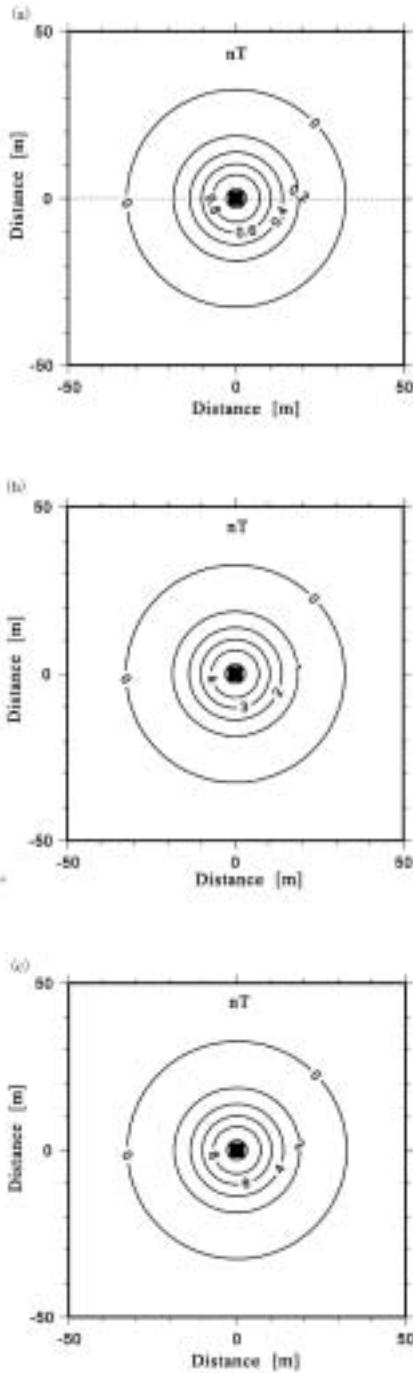


Fig. 3 Two-dimensional distribution of magnetic anomalies at the height of 5 meters from the sea bottom. The size and position of magnetized body are same as the case in Fig. 2. The magnetization are set as (a) 1 A/m, (b) 5 A/m, and (c) 10 A/m, respectively.

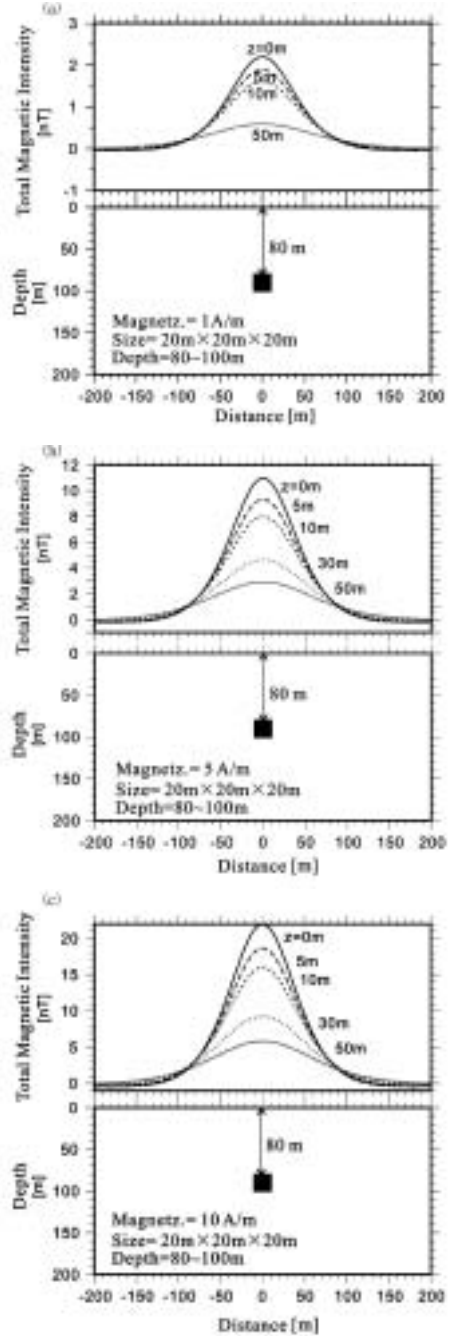


Fig. 4 Calculated magnetic anomalies caused by a magnetized prism for deep case, of which magnetization are set as (a) 1 A/m, (b) 5 A/m, and (c) 10 A/m. The length of side is 20m, and the depth to the top of prism is set as 80m. The height of field point P are set as 0m, 5m, 10m, 30m, and 50m. The inclination and declination of geomagnetic field are set as 90 and 0 degrees, respectively. The magnetization of prism is same as geomagnetic field.

強度が大きいほどピークの値が大きく、海底面からの高さを増すほど全磁力異常は小さくなる。例えば、磁化強度が5 A/mの場合、海底面における全磁力異常のピーク値は約11 nTであるが、高度5mでは約5 A/m、高度10mでは3 A/mと急速に小さくなる。また、磁化物体からの水平距離を見ると、いずれの磁化強度においても、 $\pm 30\text{m}$ 以内において正の地磁気異常分布を示す。

Fig. 3は、海底面からの高さ5mにおける全磁力異常の2次元分布である。磁化強度はFig. 2と同じである。地球磁場の伏角を90度として磁化方向を地球磁場と同一にした場合、立方体の磁化構造体を中心とする同心円を描く。Fig. 2から見いだされたように、 $\pm 30\text{m}$ 以内において全磁力異常が正の値を示す。また、磁化強度が大きいほど磁場勾配が大きくなる。

ii) 深部構造体

Fig. 4は、磁化物体の大きさを20m立方、磁化強度を(a)1 A/m、(b)5 A/m、(c)10 A/mと変えたときのy軸($x=0$)に沿う磁場分布のプロファイルである。磁化物体の上面の深さを80mとした。浅部構造体と同様に、海底面($z=0$)において最も全磁力異常が大きく、立方体の中心部でピークを示す。磁化強度を1A/mとした場合、海底面の全磁力異常は約2.2 nTであるのに対し、5 A/m、10 A/mと磁化強度が大きくなると、それぞれ約11 nT、22 nTとなる。

Fig. 5は、海底面からの高さ5mにおける全磁力異常の2次元分布である。浅部構造体と同様に、立方体の磁化構造体を中心とする同心円を描く。この条件下では、磁化強度によらず $\pm 140\text{m}$ 以内において全磁力異常が正の値をとる。

(2) 地磁気中緯度における磁場分布

Fig. 6は、磁化強度5A/mの浅部構造体について、地球磁場の偏角を -4.5 度、伏角を 39 度とした場合の全磁力異常分布である。磁化の方向は地球磁場と同じである。(a),(b)は磁化物体の中心を通る南北・東西断面を表す。いずれも、海底面($z=0$)から高度5m、10m、30m、50mの磁場を表示している。南北断面では、磁化物体の南側で海底面において約6nTの正異常、北側では -3nT の負異常となる。他方の東西断面では、海底面において最大約2nTの正異常が見込まれるものの、高度が増加すると急激に減少する。Fig. 6(d)は、上記の磁場方向の条件の下で、海底高度が5mのときの全磁力異常の平面分布である。ピー

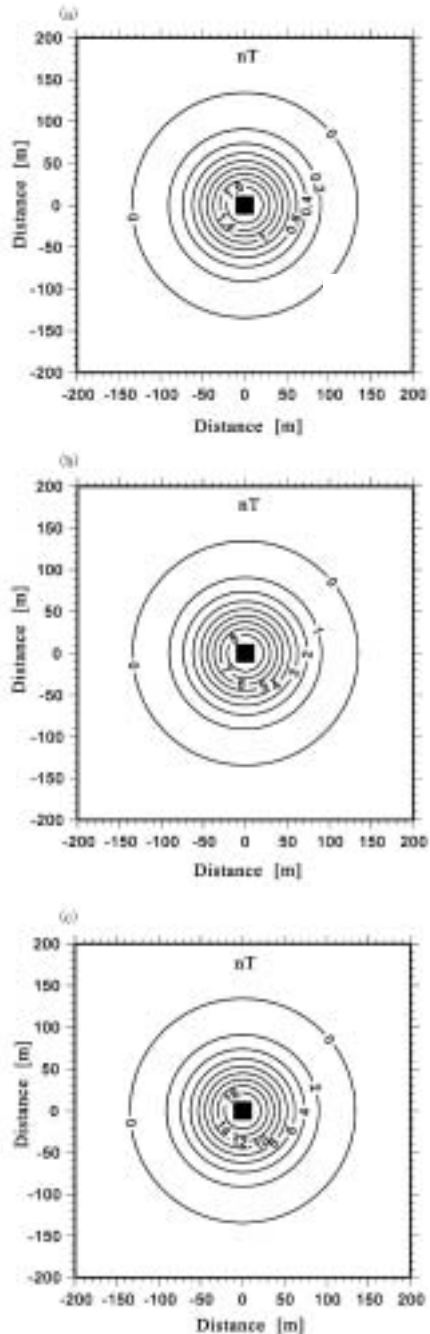


Fig. 5 Two-dimensional distribution of magnetic anomalies at the height of 5 meters. The size and position of magnetized body are same as the case in Fig. 4. The magnetization are set as (a) 1 A/m, (b) 5 A/m, and (c) 10 A/m, respectively.

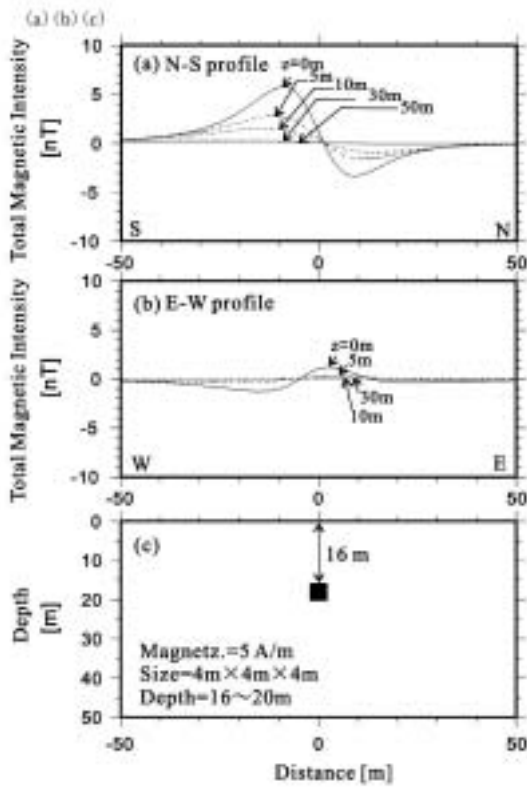


Fig. 6 (a) N-S and (b) E-W profiles of magnetic anomalies caused by a magnetized prism for shallow case. The inclination and declination of geomagnetic field are set as -4.5 and 39 degrees, respectively. The magnetization is set as 5 A/m, and its direction is same as the geomagnetic field. (d) illustrates the two-dimensional distribution of magnetic anomalies at a height of 5 m.

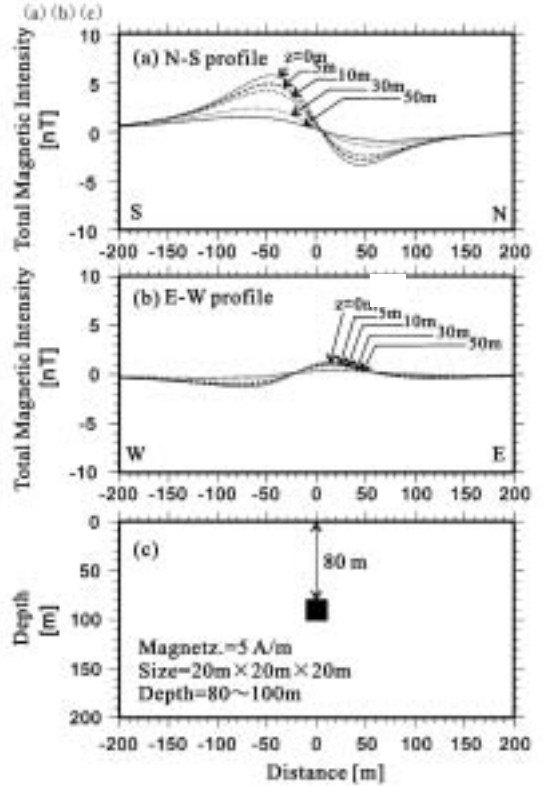


Fig. 7 (a) N-S and (b) E-W profiles of magnetic anomalies caused by a magnetized prism for deep case. The inclination and declination of geomagnetic field are set as -4.5 and 39 degrees, respectively. The magnetization is set as 5 A/m, and its direction is same as the geomagnetic field. (d) illustrates the two-dimensional distribution of magnetic anomalies at a height of 5 m.

クの位置は磁化物体の北側と南側方向にいずれも約10mの地点となり、偏角-4.5度を反映して反時計回りに4.5度ずれる。0.5nT以上あるいは-0.5nT以下となるエリアは南北・東西方向のそれぞれで対称とならず、磁化物体の南側では約40m、北側では30m程度となる。

Fig. 7は、磁化強度5 A/mの深部構造体について、地球磁場の偏角を-4.5度、伏角を39度とした場合の全磁力異常である。磁化の方向は地球磁場と同じである。(a)(b), および(d)の描画は浅部構造体の場合と同様である。南北断面では、磁化物体の南側で海底面において約6nTの正異常、北側で約3nTの負異常を示す一方、東西断面では、磁化物体の東側で最大約2nTの正異常を示すに過ぎない。Fig. 7(d)は海底高度が5mのときの全磁力異常の平面分布である。ピークの位置は磁化物体の南・北側50mの地点で、それぞれ正・負のピークを示す。0.5 nT以上あるいは-0.5nT以下をとるエリアは磁化物体の南側では200mを超え、北側・東側・西側ではおよそ150mとなり、浅部構造体に比べて地磁気異常分布のエリアが拡大する。

考察とまとめ

本論文では、海底下の磁化物体が海底付近の磁気探査によって検出されるかどうか、簡単なフォワード・モデリングによって見積もった。本プログラムの要件である浅部構造体(深さ20mまで)と深部構造体(深さ100mまで)の検出可能性について、立方体の磁化物体と仮定した。磁化の大きさは1A/m, 5A/m, 10A/mと設定し、磁化方位は地球磁場と同じとした。ただし、地球磁場の方位については、鉛直下向き方向(偏角0度、伏角90度)と地磁気中緯度地方における地球磁場(偏角-4.5度、伏角39度)の2通りを計算した。

解析の結果、磁化強度によらず海底面(海底面からの高度0m)で最も地磁気異常が大きく、高度の増加とともに急激に減少することが確かめられた。とりわけ、海底高度10mまでに振幅が3分の1程度に減少するため、いかに磁力計を搭載した海底探査ロボットを海底面に近づけて航行するかが鍵となる。広域の地磁気異常を測定する深海曳航式磁気探査(Deep-tow)では、海底地形の起伏の著しいエリアでは海底付近まで接近できないので、数十メートル以上の高度を

維持することが多い(e.g. Heirzler, 1964; Sayanagi et al., 1994; 佐柳ほか, 1999; Sayanagi et al., 2001)。有索式水中探査装置(ROV)や自立型潜水艇(AUV)へ搭載することで海底面近傍を航行することが可能になるが、海底探査ロボットが生じるノイズの影響も大きいことが予想されるため、適切なノイズの除去法の開発も課題となるであろう。

さらに、磁化物体が海底付近に作る^{3D}磁気異常の空間範囲は磁化強度や海底高度によらず、磁化物体の大きさに依存することがわかった。したがって、地磁気異常の平面分布やその鉛直方向の減衰特性から構造体の大きさ及び磁化強度を推定することは可能である。

磁化物体の検出分解能を見積もるためには、本研究で得られた地磁気異常分布をインバージョン解析することで元の磁化物体の形状および磁化強度を再現できるかテストを行う必要がある。地磁気異常を計算するメッシュ点の2次元空間および3次元空間での密度を変えることで、検出される磁化物体の分解能が変わると考えられる。このことは、磁場のサンプル周波数や海底探査ロボットの移動速度や海底高度に対応する。希望する分解能で磁化物体を検出するために、磁気探査装置の仕様や運用方法において最適な条件を推定することが期待される。

本解析では全磁力異常のモデリングを行ったが、本来、磁場はベクトル量であるので、スカラーとして測る全磁力異常には原理的に誤差が含まれる。磁場3成分を測定することで、原理的な誤差を考慮しなくてもよくなるので(伊勢崎, 2005; 伊勢崎・松尾, 2008; Matsuo and Isezaki, 2009)、今後は3成分の地磁気異常解析を行うことも課題としたい。

本研究でターゲットとする海底熱水鉱床は、海底面から噴出する熱水が海水によって冷却されることで銅、鉛、亜鉛等のベースメタルや金や銀等の貴金属が析出・沈殿してできたものである(物理探査学会編, 1999)。熱水鉱床中の鉱物資源の確認と採取する技術は確立されているとされるが(物理探査学会編, 1999)、金属鉱床の磁気的性質は、鉱物の種類や岩石中の含有量、地熱による熱消常磁等の条件によって変化するので、それらの鉱量を正確に効率よく把握する方法及び鉱床評価のための手法についても考えてゆきたい。

謝 辞

本論文の執筆にあたり，多くの有益なコメントをいただいた東海大学海洋研究所の馬場久紀博士に感謝いたします．

参 考 文 献

- Bhattacharyya, B. K. (1964) Magnetic anomalies due to prism - shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29, 517-531.
- Blakely, R. J. (1995) *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, New York, 441p.
- 物理探査学会編 (1999) 物理探査ハンドブック . 1408p .
- Heirtzler, J. R. (1964) Magnetic measurements near the deep ocean floor. *Deep - Sea Res.*, 11, 891-898.
- 伊勢崎修弘 (2005) 地磁気ポテンシャルによる磁化構造解析 - 地磁気3成分異常の応用 - . 月刊地球 , 号外 , 51 , 231-235 .
- 伊勢崎修弘・松尾淳 (2008) 地磁気全磁力(異常)の物理的解析の限界 . 地球電磁気・地球惑星圏学会 , 第24回総会及び講演会予稿集 , A004 - 04 .
- Matsuo J. and N. Isezaki (2009) Magnetization structure of Aogashima Island using vector magnetic anomalies obtained by helicopter - borne magnetometer. *Butsuri - Tansa*, 印刷中 .
- 文部科学省 (2008) 「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」提案課題の審査経緯及び採択課題について . 文部科学省報道発表 , 2008年7月23日 , URL : http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/07/08072405.htm .
- Sayanagi, K., A. Oshida, M. Watanabe and K. Tamaki (1994) New self - contained deep - towed proton magnetometer system. *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 631-642.
- 佐柳敬造・西村清和・上嶋正人・倉本真一 (1999) マルチセンサ型深海曳航式観測システムを用いた日本海盆及び石狩海盆の精密磁気探査 . 海洋調査技術 , 11 , No.2 , 19-36.
- Sayanagi, K., K. Nishimura, M. Joshima and S. Kuramoto (2001) Deep - tow magnetic anomaly near ODP Site 795 in the northeastern margin of the Japan Basin. *Proc. Japan Acad.*, 77, Ser. B, 57-62.
- 佐柳敬造・後藤忠徳・笠谷貴史・澤 隆雄・原田 誠・中島崇裕・長尾年恭・楠本成寿 (2008) 電磁気学的手法を用いた海底資源探査ツール開発の取り組み . 地球電磁気・地球惑星圏学会 , 第24回総会・講演会予稿集 , A003 - P003 .