磁気探査法による蛇紋岩調査

吉川恵也*・白井慶治**・原口 勉**・高橋満弥***

A Survey of Subsurface Extension of Serpentine Bodies by Magnetic Prospecting Method

Keiya YOSHIKAWA, Keiji SHIRAI, Tsutomu HARAGUCHI
and Mitsuya TAKAHASHI

Abstract

The feasibility study is under way for the tunnel construction under the Hoyo straits to connect the Shikoku and the Kyushu islands. Several serpentinite bodies crop out in the Saganoseki Peninsula which would be the exit of tunnel in the Kyushu.

Tunnels in serpentinite are often deformed by ground squeezing and heavy earth pressure. Magnetic prospecting was carried out to obtain more detailed information about serpentinite in the northern part of Saganoseki Peninsula where small serpentinite outcrops are scattered along Sambagawa metamorphic belt.

The following results have been obtained from this prospecting:

- (1) Virtually all magnetic anomalies in this area are caused by serpentinite and the three-dimensional structures of serpentinite have been clarified by the analysis of magnetic anomalies.
- (2) Serpentinite bodies are distributed almost continuously beneath the earth's surface in the east-west direction which is parallel to the axis of the Saganoseki Peninsula.
- (3) Serpentinite in this area had been inferred to have thin sheet shape, but it was clarified by this prospecting that most serpentinite bodies have subsurface dike-like roots.
- (4) The subsurface shapes of exposed or concealed serpentinite bodies have been inferred from the magnetic anomalies.
- (5) Magnetic prospecting is very effective method for the survey of serpentinite bodies.

1. はじめに

蛇紋岩は強い磁性をもつので、磁気の異常分布から、磁性を示す岩体の分布産状を推定する磁気探査は蛇紋岩の分布や産状を把握するためには極めて有効な方法である。

トンネルを掘削する場合、未固結層や破砕帯に伴う湧水や膨脹性地圧が大きな問題となるが、蛇紋岩も膨脹性を示すことがあるので、トンネルの計画にあたって、留意しなければならない岩石である。蛇紋岩の分布する地山の膨脹性の有無を知ることは非常に重要なことであるが、これを前もって知ることは困難である。また、全

ての蛇紋岩が膨脹性をもつわけではないが、膨脹性の有無を別にしても、トンネル計画時点で、蛇紋岩の産状を把握しておくことは非常に重要なことである。

九州と四国を結ぶ豊予海峡（佐田岬—佐賀関間 14 km）の海底トンネルの建設の可能性を検討するための調査が、昭和 49 年度から、日本鉄道建設公団によって実施されているが、その延長部にあたる九州方陸上部、佐賀関半島に蛇紋岩が分布しているので、その産状を明らかにするために磁気探査を実施した。ここでは、その結果について述べる。

2. 調査の概要

調査地は大分県北海部郡佐賀関町地内の 図-1 に示す範囲で、三波川変成帯の西端部にあたり、その地質は佐賀関層（仮称）に属する変成度の低い泥質片岩、砂質片

* 日本国有鉄道

** 日本鉄道建設公団

*** 住鉱コンサルタント(株)

図-1 調査位置と測線配置図

図-2 調査地域の地質図

岩、片岩型変斑れい岩からなり、蛇紋岩を伴っている。蛇紋岩の産状は、周囲の片岩層と調和的で層状のものが多く、その分布は $N70^{\circ}E$ 方向に配列しており、地表に窓状に露出している (図-2)。なお、この地域で大きな

帯磁率を有するものは蛇紋岩のみで、他の岩石のそれは、蛇紋岩の $1/100 \sim 1/1,000$ のオーダーである。

本調査は、これらの蛇紋岩が薄い層状のものか、深部まで続く、いわゆる「根っ子」のあるものか、あるいは

また、露出するもののほかに潜在する蛇紋岩があるか否かを明らかにする目的で実施されたものである。

調査機器、測定条件、磁場の状態などは下記のとおりである。

磁 力 計；プロトン磁力計 磁場強度；46,700ガンマ
測定成分；全磁力成分 磁場伏角；47度
測点間隔；約 50 m

3. 測定結果

地磁気は時間的に変動するので、調査地域内の一点に固定観測点を設け、この点のある時刻における地磁気の値を基準値とし、これと他の時刻における地磁気の値との差を求め、種々の時刻に測定した各測点の磁力値に固定観測点の変動分を補正する、いわゆる日変化補正を施した値を測点図に記入し、等磁力線図（図-3）を作成した。調査地域の中の磁力の最大値は 48,800 ガンマ、最小値は 45,200 ガンマで、磁気異常の振幅は数 10 ガンマから 2,500 ガンマに達するものまでである。2,500 ガンマにも達するような異常をひきおこしている岩体の磁性は極めて強いものと予想される。

図-3 には多くの磁気異常が認められるが、巨視的には、ほぼ東西に連なる異常群が、本地域の磁氣的構造を支配しているとみなすことができる。

4. 磁気異常の解析法

磁性岩体によって生じる磁気異常は、地球磁場に誘導される感応磁気と岩体自身が持つ残留磁気による異常の和である。残留磁気の磁化の方向が現在の地球磁場のそれと異なり、磁化の強さが非常に大きい場合には、残留磁気異常が等磁力線図に認められることもあるが、本調査の等磁力線図（図-3）からは残留磁気異常は認めないので、全て感応磁気異常として解析をすすめる。この場合、全磁力成分の磁気異常は次の一般式で表わされる。

$$\Delta T = kT \cdot f(a, b, c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ΔT ： 全磁力成分磁気異常

k ： 磁性岩体の帯磁率

$f(a, b, c)$ ： 地球磁場の伏角、磁性岩体の構造、測定点と磁性岩体との距離により変化するファクター

T ： 地球磁場全磁力強度

磁性岩体の構造は、単純な構造のものばかりとは考えられないが、磁気異常の解析にあたっては、単純なモデルを考え、これによって生じる磁気異常をあらかじめ計算し、理論曲線を作成しておき、等磁力線図から作成した観測曲線と比較して、最も良く合致する理論曲線を選

び、これに対応する構造モデルを実際の構造とみなす「曲線照合法」による解析法を使用した。また、理論曲線と観測曲線の合致があまり良くない場合には、構造モデルを部分的に変形させ、このとき生じる磁気異常を計算して観測曲線と比較し、合致の度合いをみる。これが不十分な場合には、さらに構造を変えて、合致の度合いがよくなるまで計算をくり返す「シミュレーション法」も利用した。

構造モデルとして、プリズム（角柱）モデルとダイク（岩脈）モデルを使用した。（1）式の $f(a, b, c)$ をプリズム、ダイクについて計算し ΔT を求めると、それぞれ次のようになる。

プリズムモデルによる磁気異常：

$$\begin{aligned} \Delta T = kT \left[\cos^2 \delta \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{r_0 h} \right) \right. \\ \left. - \sin^2 \delta \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{\alpha_1^2 + r_0 h + h^2} \right) \right. \\ \left. + \sin \delta \cos \delta \cdot \log \left(\frac{r_0 - \beta_1}{r_0 + \beta_1} \right) \right] \left[\begin{matrix} \alpha_u \\ \alpha_l \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} \beta_u \\ \beta_l \end{matrix} \right] \\ \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$\delta = 90^\circ - I$, I ： 地球磁場伏角

$r_0^2 = \alpha_1^2 + \beta_1^2 + (h-z)^2$, $\alpha_1 = \alpha - x$, $\beta_1 = \beta - y$

h ： 測定面とプリズム上面の距離， α, β, γ ： プリズムの中の体積要素 $dx dy dz$ の座標。 $dx dy dz$ によって生じる磁場の強さを γ については積分すみなので（2）式には γ は入ってこない。

(x, y, z) ： 測点の座標。 x を磁北， y を東， z を下向きにとる。 α, β, γ はそれぞれ x, y, z に平行にとるものとする。

α_u, α_l ： α_1 の上限と下限， β_u, β_l ： β_1 の上限と下限
ダイクモデルによる磁気異常：

$$\begin{aligned} \Delta T = kT \cdot 2c \sin d \left[\sin \phi \left(\tan^{-1} \frac{x+a}{h} - \tan^{-1} \frac{x-a}{h} \right) \right. \\ \left. + \cos \phi \ln \frac{r_2}{r_1} \right] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$c = 1 - \cos^2 I \cos^2 A$, I ： 地球磁場伏角， A ： ダイクの走向と磁北のなす角， d ： 水平面から測ったダイクの傾斜角， $\phi = 2i - d$, $i = \tan^{-1} (\tan I / \sin A)$,

a ： ダイクの幅の 1/2, $r_1 = \sqrt{(x+a)^2 + h^2}$, $r_2 = \sqrt{(x-a)^2 + h^2}$, x ： ダイクの走向に直角方向にとった x 軸上の測点の座標， h ： 測定面とダイク上面の距離

薄いシート状構造モデルに対する異常は、 h の小さいプリズムモデルの異常から、 h の大きいその異常をさしひいて求められる。

上はモデルの断面図と磁気異常、下はモデルの平面図。Aはモデルの南北幅、Bは東西長。
Hは測定面からモデル上面までの深度。hはシートモデルの厚さ。Tは全磁力強度。Iは磁
気伏角。kは帯磁率。

図-4 モデルによる磁気異常断面図

構造モデルによる磁気異常は(2)および(3)式の
 I と T に調査地域の伏角と地球磁場全磁力強度の値 $I = 47^\circ$ および $T = 46,700$ ガンマを、また構造モデルに $k = 1 \times 10^{-3}$ cgs-emu/cc を与えて計算した。理論曲線の例を図-4に示す。(図では測定面から構造の上面までの深度を H とし、シートの厚さを h としてある。)

本地域の異常の解析にあたっては、140個のプリズムモデル、40個のプリズムの組合せモデル、140個のダイクモデル、40個のシートモデルの合計360個の構造について理論曲線を作成し、この中から観測曲線に最もよく似た理論曲線を選び、(縦軸、横軸)を (m, n) 倍して実際の構造の帯磁率と構造の大きさを求めた。

表-1 解析結果一覧表

岩体 No.	帯磁率 ($\times 10^{-3}$)	幅 (m)	長さ (m)	深度 (m)	傾斜	形態
1	2.6~13.0	100~300	2,000	0~200	東側 $45^\circ N$, 中央部 $70^\circ N$, 西側 90°	岩脈状
2	1.0~13.2	100	700	0	東側 $60^\circ N$, 中~西部 90°	複雑だが深部まで続く
3	4.4	70~80	200	0~70	90°	プリズム状
4	1.1~8.8	100	600	0~30	90°	岩脈状
5	7.0	180	350	50~130	90°	楕円状、深部まで続く
6	3.1~8.0	50~150	1,100	30~100	90°	岩脈状
7	5.5	130~150	400	40	90°	プリズム状
8	1.0~6.4	70~220	1,400	0~50	東側 90° , 西側 $70^\circ S$	岩脈状
9	11.2	50	500	20~40	90°	岩脈状
10	6.4~10.0	150~230	750	10~70	北側 $80^\circ N$, 南側 $25^\circ S E$	複雑だが深部まで続く
11	11.0	100~250	1,100	20~40	$25^\circ S E$	複雑だが深部まで続く
12	11.0	50~100	650	0~30	$25^\circ S E$	岩脈状
13	6.4	60~80	270	30	90°	岩脈状

5. 解析結果

図-3 の等磁力線図から磁気異常断面を作り、これを
4. で述べた方法により解析した。解析結果を表-1 に、

解析断面の一部を図-5、図-6、図-7 に示す。図-7 の
M-M' 断面はトンネル予定線に沿って、解析結果から推
定して作った断面である。

図-5 解析断面図 (A, B, C断面)

図-6 解析断面図 (E, D断面)

図-7 解析断面図 (M断面)

6. 考 察

断面による解析結果と等磁力線図から推定される磁気的構造を図-8の解析平面図に表わした。また、地表で認められる蛇紋岩の分布範囲もあわせて記入した。

磁気異常の解析によって得られた本地域の磁性岩体の帯磁率の値は $1.0 \sim 13.2 (\times 10^{-3} \text{ cgs-emu/cc})$ である。この値は中性ないしは塩基性岩が一般的にもつ帯磁率であるが、本地域に分布する地質は 2. で述べたように泥質片岩、砂質片岩、片岩型変斑れい岩および蛇紋岩であり、これらの中で上記のような大きな帯磁率をもつものは蛇紋岩のみである。また、地表に分布する蛇紋岩と磁気異常の位置関係から、本地域の顕著な磁気異常はすべて蛇紋岩に起因すると考えられる。

地表地質調査で確認されている蛇紋岩は沢沿いに窓状に分布するが、磁気探査結果では、磁気異常は東西方向にほぼ連続しており、蛇紋岩が東西の走向で、連続的に分布することを示している。

この地域の蛇紋岩の産状は従来シート状と考えられていたが、垂直方向の貫入岩の形態をとるものが多いことが解析から推定される。すなわち次のような分布形態が考えられる。地表の蛇紋岩は「磁気異常の振幅が非常に大きいところ」のほかに「振幅の比較的小さいところ」にも分布している。解析の結果、前者に分布するものは地下深部まで続く、いわゆる「根っ子」の部分に相当し、後者に分布するものは、この根っ子からシート状に張り出したきのこの傘のような産状の部分に相当すると考えられる。

きのこの傘と考えられる部分は、岩体 1 の南側の断面 B 付近、断面 C の岩体 1 と 4 の間、岩体 8, 10, 11 で挟まれた断面 E 付近、岩体 8 の北側の断面 E 付近、岩体 11 と 12 の間などに推定される。

以上のように磁気異常の解析から、蛇紋岩の分布や産状を推定することができたが、

(1) 測線が歩行可能な道路、小径、沢、尾根などに限られたため、測点密度が地域東側で密、西側で疎になっており、西側で解析精度が落ちること

(2) 解析には一様に磁化した、できるだけ単純な構造モデルを使用した、実際の構造はもっと複雑で、蛇紋岩内部にも磁性の強い部分や弱い部分があると推定されること

(3) 断面による解析のため、断面から離れた部分の蛇紋岩の境界位置に不確かさがあること
などの問題点がある。また、変質して磁性を失なった蛇

紋岩の有無や膨脹性地圧の有無などは、磁性を対象とした本調査から推定することは不可能であった。しかしながら本調査によって、地表に認められる蛇紋岩のほかに多くの蛇紋岩が潜在することが推定された。

本調査地域に隣接し、佐賀関半島先端を含む範囲においても磁気探査が実施され、その結果にもとづいてボーリングを行ない、蛇紋岩のシート状部分が見い出されている。この部分が単にシートなのか、きのこの傘状の部分なのか、1本のボーリングデータなので断定はできないが、磁気探査の結果から、きのこの傘状の部分である可能性が強い。しかしこの蛇紋岩がきのこの状なのか否かその全体像を確認するためには、さらに4～5本のボーリングが必要と思われる。

本地域においても、蛇紋岩の全体像を知るためには多くのボーリング調査を行なう必要があるが、本調査結果はボーリング位置の選定にも非常に有用と考えられる。

7. おわりに

地殻を構成する岩石は、それに含まれる磁鉄鉱のような強磁性物質の量に応じて磁性を持っており、磁気異常を発生する。磁気探査の歴史は鉄鉱床の探査にはじまったが、磁力計の進歩により微弱な磁気異常の検出が可能になるとともに、次第にその対象を広げてきた。現在では非鉄金属鉱床、石油鉱床の探査や地熱探査にも利用されるようになってきた。また、トンネルやダム、埋没爆弾調査にも利用されている。ここではトンネル建設予定地の蛇紋岩の分布を調べる目的で実施した地上磁気探査の例を述べたが、特に土木地質の分野では露出する磁性岩体はもちろんのこと、潜在する磁性岩体の調査にも役立てられる。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団内部資料 (1976～1979): 四国新幹線豊予海峡付近地形・地質調査中間報告書其の1～其の4
- 2) B. K. BHATTACHARYYA (1964): Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, Geophysics, Vol. XXIX, No. 4, pp. 517-531
- 3) 吉川恵也・井井慶治・蝦名克彦 (1980): 豊予海峡における海底トンネル地質調査, 応用地質, 21巻1号
- 4) 日本鉄道建設公団内部資料 (1981): 豊予, 九州方(小黒)地質調査報告書

(昭和 57 年 6 月 22 日受理)