磁気探査の土木への応用

池田 和彦* ・ 松尾 正吾**・ 持田 豊***
土屋 敦****・ 長谷川 淳*****

Airborne Magnetic Survey Applied for Civil Construction Purpose

By K. Ikeda, S. Matsuo U. Mochida, T. Tsuchiya and K. Hasegawa

1. ま え が き

空中磁気探査法（航空磁気探査とも呼ばれる）は、航空機から、磁界を測定し、地下構造を調査する物理探査の一方法である。

この方法は、山岳地などの近づきにくいところでも容易に、かつ短期間、したがって安価に地下構造を調査できる利点のために、第二次大戦後、急速な発展を遂げ、現在では、石油、ガス、金属鉱山などの分野において、地質調査に前後して、かならず採用される重要な探査法となっている。

この利点を有する空中磁気探査技術を土木工事の地質調査に適用できるように開発し、それを青函トンネル通過地域の地下構造調査に採用した。この結果を含めた、2, 3の応用例および土木調査への応用上の問題点をここに紹介する。

2. 調 査 方 法

地球の磁界が、北極にSの磁極、南極にNの磁極をもつような磁石をおくことによって、その大略をあらわすことができることはよく知られたことであり、地球上のいかなる地点においても、この双極子磁界に近い標準地球磁界が存在している。

ここで磁気探査の対象となるものは、地磁気の局地的変化[†]であるが、これは比較的浅いところに分布する岩石の磁氣的性質に関連して生ずるものである。すなわち、この磁氣的性質は、その岩石のもつ帯磁率（磁化さ

図 1 地球双極子

標準地球磁界は地球双極子によって生ずる磁力線密度分布によって近似的にあらわすことができる。

* 鉄道技術研究所

** 日本鉄道建設公団青函建設局

*** 日本鉄道建設公団設計室

**** 日本鉄道建設公団大阪支社

***** 住鉄コンサルタント株式会社

[†] 地磁気の分布における局地的変化を以下“磁気異常”あるいは“異常”と呼んでいく。

れやすさ)と残留磁気である。岩石は、多かれ少なかれ磁鉄鉱、磁硫鉄鉱等の磁性鉱物をその構成鉱物として含

磁力線は帯磁率分布の変化によって歪を生ずる磁力線密度の変化が局地的磁気異常となる。

んでいる。特に磁鉄鉱は火成岩中の主要鉱物である。岩石、地層の帯磁率はその内に含まれる磁鉄鉱によって支配される。このように、ある大きさの帯磁率をもった岩石は、上に述べた標準地球磁界のもとにおかれると磁界の強さに比例して、帯磁（磁化）^{††}の状態となり、地磁気の局地的異常をつくりだす。

地磁気の磁界は方向をもったベクトル量であるから地磁気の3要素（全磁力の強さ、伏角、偏角）によってこれをあらわすことができる。空中磁気探査の場合、この内、地磁気的全磁力値分布を測定し、等磁力線図（全磁力図）にとりまとめる^{†††}。

3. 解 釈

等磁力線図にあらわれる局地的地磁気分布の異常は、すべて調査地域内およびその周辺の地表あるいは地下に

†† $\vec{H}$ を地球標準磁界、 $\vec{I}_i$ を誘導磁化とすれば $\vec{I}_i = k \cdot \vec{H}$ となる。ここで k は帯磁率である。局地的磁気異常の原因となる磁化 $\vec{I}$ は上記の誘導磁化 $\vec{I}_i$ と残留磁化 $\vec{I}_r$ との和である。 $\vec{I} = \vec{I}_i + \vec{I}_r$ 但し、一般には $\vec{I}_r$ は $\vec{I}_i$ に比べ非常に小さいことと $\vec{I}_r$ が大きいことは非常に少ないため、ほとんどの場合 $\vec{I} \approx \vec{I}_i$ とおくことができる。

††† 実際に測定される全磁力は、地帯磁気的全磁力と局地異常的全磁力とのベクトル和の絶対値をはかっている。しかし、局地異常の大きさは標準地球磁界に比べ遙かに小さい為、全磁力測定値からその地点の標準全磁力をさしひいたものを、局地的全磁力異常として近似的にあつかうことができる。

図3 地磁気の3要素

存在する地層あるいは岩体によってひき起されている[†]。

† 全磁力測定値分布から、その地域の標準全磁力分布をさしひいた結果得られる局地的全磁力異常は、地表あるいは地下に存在する磁性体によってひき起されたものである。この局地的磁気異常 ΔT は原因となる磁性体の形態 $f(v, r)$ 、帯磁率 k および標準全磁力 T_0 によって決まり、近似的には $\Delta T \approx k \cdot T_0 \cdot f(v, r)$ と表わすことができる。ここで $f(v, r)$ は磁性体の形状によるファクター (v) と測定点と磁性体の距離 (r) に関する関数となる。例えば球状の磁性体がある場合、 v は体積に相当し、 $\Delta T \propto k \cdot T_0 / r^3$ と表わされる。

従って、逆に全磁力分布の形状から、磁気異常の原因となっている地層（あるいは地層の集合体）あるいは岩体の形態、深さ、帯磁率を求めることができる。ここで求めた帯磁率の大きさから、地層あるいは岩体を構成している岩石の種類を推定していくことが可能になり、地下

構造を推定できる。もちろん、この過程において、地質資料、既存の岩石帯磁率に関する知識を考慮に入れる。

ここで、磁気分布図上にあらわれる局地的地磁気異常は次のように分類できる。

i) 等磁力線（コンター）が円形に閉じているか、開いているか、あるいはコンターの歪として現われるか。

ii) 等磁力線間隔がこみあっているか、まばらであるか、すなわち等磁力線の勾配が急であるか、緩いか。

iii) 円形に閉じた等磁力線、開いた等磁力線あるいは等磁力線の歪が広い地域を覆っているか、狭い地域を覆っているか。

iv) 等磁力線の流れる方向はどの方向か。

v) i) にあげたような等磁力線の特徴がある方向に連続して追跡できるか、あるいは孤立した特徴であるか。

これら i)~v) の磁気分布図上に一般に見られる特徴について、おおよそ次のように地下構造を考えることができる。

i) 円形に閉じた等磁力線があらわれる場合、周囲の岩石に比べ帯磁率の大きい火成岩体が存在する（貫入火成岩体等）。

- ii) 等磁力線の勾配が急である場合は、その付近に地質あるいは岩体の境界がある。また浅いか、相接する岩石の帯磁率差が著しい（火成岩と堆積岩等）。
- iii) 閉じた、あるいは開いた等磁力線によって形成される磁気異常が広い地域を覆っている場合は、潜在する構造は深いか、規模が大きい。
- iv) 等磁力線の流れる方向、あるいは等磁力線の歪が連続する方向は、およそ境界、岩脈等の走向を示している。
- v) ある方向に連続して磁気異常が追跡できる場合は、その下に断層、破碎帯、岩脈等の存在を予想し得る。

以上のように等磁力線図より、定性的におおよその地下構造を推定することができる。一般には玄武岩、安山岩等の火成岩は帯磁率も大きく、顕著な磁気異常となつてあらわれ、比較的小規模な岩脈、岩床等の検出も困難でない。凝灰岩、火山碎屑岩層などは中程度の磁気異常をしめす。一方、頁岩、砂岩等の堆積岩層は低磁気異常となつて現われることが多い。また、断層、破碎帯は低磁気異常帯となつて現われたり、磁気異常を両断あるいは磁気異常内に歪帯として現われることが多い。過去に熱水蒸気、あるいは断層、破碎により変質をうけ、磁性を失ってしまった岩石、地層は低磁気異常となつてあらわれる。

実際には、地下において岩体、地層はさまざまな形態をとるため、次の段階では、理論的に計算される種々の地下構造モデルと実際に得られた等磁力線図あるいは磁力断面との定量的比較照合^{††}を行ない、潜在する構造の形態および帯磁率を求めていく必要がある。これらの定性的・定量的解釈は他の地球物理学的情報、地質学的情報と共に検討され、最終的構造が決定される。

4. 実 例

例 1

第 3 図は青函トンネル通過地域の地下構造調査に応用した例である。図に示した地域は訓縫層（訓縫層第 1 層～第 4 層：グリーン・タフ）により構成されており、既にトンネル予定線通過レベルの上下に、それぞれ作業坑、先進導坑が掘り進んでいる。想定地質断面に記入されている玄武岩体（記号 Ba）は先進導坑、作業坑に出現し、確認されたものである。これらの岩体は等磁力線図にあらわれる磁気異常に一致しており、各々の磁気異常を解

^{††} 地下構造モデルとして岩脈、岩床、断層、岩株その他、多数のものが用いられ、それらを単独あるいは組合せて使用していく。

析した結果得られた玄武岩体の形態は推定地下構造に示すとおりである。このうちトンネル予定線 35 km 付近に出現する玄武岩は比較的規模が大きく、一部先進導坑に出現しているが、さらに深くなると容積を増すものと推定される。この玄武岩は一体の貫入岩体というより複数の岩脈によって構成されている可能性がある。

例 2

第 4 図はやはり青函トンネル通過地域の一断面である。この地域は黒松内層（黒松内層第 1 層～第 5 層：堆積岩層）により構成されている。地質調査の結果によると、この地域の地表および地表付近には火成岩体の存在は予想されていない。空中磁気探査の結果によると、地表付近に火成岩の存在が予想され、岩脈が存在する可能性もある。第 5 図に示した磁気断面図は、顕著な磁気異常が観測される尾根を横断して、地上磁気測定を行なった結果である。この地上磁気測定の結果によっても、地表付近に火成岩体が存在していることは確実なことがわかる。

例 3

第 6 図は地層が熱水変質を受けている地域の例である。熱水変質をうけている地域は、構成岩石が磁性を失ない、全磁力断面には低磁気異常地域となつてあらわれている。また、この低磁気異常地域の中にも、比較的規模の小さい高磁気異常地域があらわれ、この高磁気異常地域は熱水変質を受けていない地域と考えられる。またトンネル掘削等で問題になる比較的新しい火成岩で地層が構成され、熱の予想される地域では度々、非常に強い残留磁気異常が観測され、熱に関する情報を提供する。

5. 結 論

現在まで実行された応用例から、次にあげることが結論づけられる。

- 1) 火成岩の種類（空中磁気探査によって求められた見掛け帯磁率から推定する）、形態、すなわち、かくされた火成岩の分布、配列、深さ、傾斜を推定することが可能である。
- 2) 潜在する断層、破碎帯の発見が可能である。この場合、断層、破碎帯は磁性体の形状をかえたり、両断したりする。また断層、破碎帯の部分が磁性を失なったかたちで磁気分布図上にあらわれることが多い。
- 3) 地熱、鉍化作用により岩石、地層が変質しているところを知ることが可能である。
- 4) 調査測線は密にとり、調査航空機は低空飛行をする必要がある。これは比較的小規模な岩脈、断層、破碎帯等を正確に検出する為であり、密な調査測線、低空飛

第3図

第4図

第5図

第 6 図

行を抜きにしては、空中磁気探査の土木への応用は成り立たないであろう。具体的には、調査主測線は 250 m 間隔以下、測定高度は平均対地高度 200 m 以下に設計する必要がある。特に飛行高度については、さらに低くとり、場合によっては地形沿いに飛ぶ必要も生ずるであろう。従って、調査に使用する航空機は、低空飛行、トッパー・レーダーで測線に正確に誘導

される小まわりの可能な小型機に限定される。

- 5) 隧道等の調査の場合には、計画路線の両側に、それぞれ 4~5 km 幅で調査範囲を設ける必要がある。
- 6) 以上にあげた条件を充した場合、25,000分の1程度の地下構造平面図および、地下構造断面図を作成することが可能である。