

地表ソース型空中電磁法 (GREATEM) による探査

茂木 透¹⁾・伊藤 久敏²⁾・海江田秀志²⁾・楠 建一郎³⁾・城森 明⁴⁾・結城 洋一⁵⁾

1. はじめに

航空機を利用して空中から地下構造探査を行うことにより、地表から立ち入ることができない地域でもデータを取得することが可能になる。この利点を利用して、たとえば、火山体やその周辺には立ち入るのが危険な噴気地域、変質地域や地すべり地域があるが、そういう場所の調査も容易にかつ安全に行うことが可能である。また、短時間に広い範囲のデータを取得できるので、繰り返し観測による面的な地下の状態変化のモニターもできる。特に、電磁気探査は空中からの計測が比較的容易であり、空間も伝播する電磁波の特徴を生かすことができる。

空中電磁探査は、航空機の発達した1950年頃よりいろいろな探査方式が開発されてきた。初期の頃の目的は、広い地域での未開発資源の探査であったが、近年は、地下水探査や地すべり地域等の危険地域の調査など防災・環境調査にも多く使われるようになってきた。これまでの探査は、航空機に送信機と受信機とを搭載する方式により行われることが普通であり、探査に使われる周波数が高周波に限られることや送受信機間距離の制約により、その可探深度は100 m程度に限られることが多かった。そこで、空中電磁探査の可探深度をもっと深くすることを目標に、地表に電流送信装置を設置し、それにより発生する大地の誘導磁場を空中で測定する探査法を開発した。

地表ソース型空中電磁法は、以前からいくつかの方式が提案されてきた。1955年に旧ソビエト連邦でBDK-70型という地表磁場ソース型空中電磁法が開

発された。これについてはPalacky and West (1991) やFountain (1998)に簡単な記載があるが、調査事例等は不明である。その後、地表ループによる鉛直磁場ソースを用いた空中電磁法として、1970年頃より実用的に使われたTURAIRがあり、これについては駒井 (1973)に詳しい解説がある。また、最近では地表ループソースを使った、FLAIRTEM (Elliott, 1998), TerraAir (Smith *et al.*, 2001)が提案され、実用的にも使われている。本報告では、我々のグループが1990年代より開発してきた地表電場ソース型時間領域空中電磁法 (Gounded Electrical source Airborne Transient ElectroMagnetics: GREATEM, Mogi *et al.*, 1998, 2009)について紹介する。

2. GREATEM探査システム

我々が開発してきた方式は、地表に長い電線を張り両端の電極から流す電流を電磁場のソースとして用いるものである。この方式は、比較的深部の構造を地表で探査する場合に使われている時間領域電磁探査法 (LOTEM: Strack, 1992)と同じ原理を用いている。送信方法は同じであるから、地表と空中での計測を同時に行うことも可能である。可探深度は、得られた磁場の過渡応答がノイズに埋もれるまでの深度と考え、現状では深度1,000m位までの探査が可能であり、活断層の活動評価や火山体内部の探査にも応用が可能となってきた。

第1図に探査の概念図を示す。地表に置いた送信線から通常数kmから10km位までの範囲で探査が可

1) 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、札幌市北区北10条西8丁目

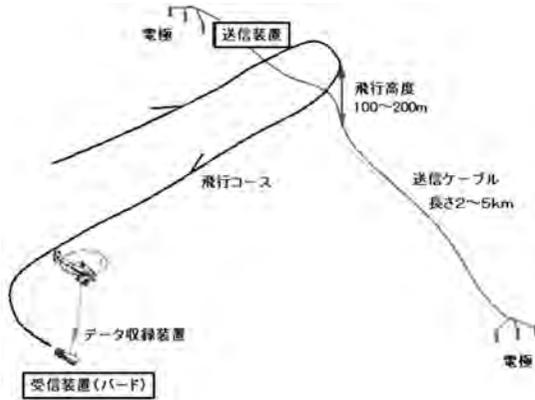
2) 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域

3) 元電力中央研究所

4) ネオサイエンス

5) 応用地質(株)エンジニアリング本部ジオテクニカルセンター

キーワード: 空中電磁法, 構造探査, 火山調査, 磐梯山



第1図 GREATEM探査の概念図.

能である。飛行高度は低いほどよいが、これまでの実績によれば、高度100~200mでもデータを取得することが可能であり、従来の送受信機搭載タイプの空中電磁探査では飛行高度が30~50mであったのに対し、高い高度で飛行できるので安全性が向上した。また、高度の変化による影響も小さい (Mogi *et al.*, 1998)。

第2図には探査装置を示す。地上に置く送信装置は、送信電流を制御する送信機、送信タイミングを制御する高精度時計である。ヘリコプターから吊るす受信装置は、磁場変動観測用コイル、ファイバーオプティックジャイロ、方向探知磁気センサー等の入ったバードと収録装置や送信タイミングと同期をとる高精度時計とが収納されたデータ収録機からなる。バードの内部には、ファイバーオプティックジャイロや方向をモニターするための磁気インピーダンス (MI) センサーが装着されている。これらはジンバル台に置かれていて、その裏側には3方向を向いた誘導コイルが装着されており、それにより3成分の磁場変動を計測している。

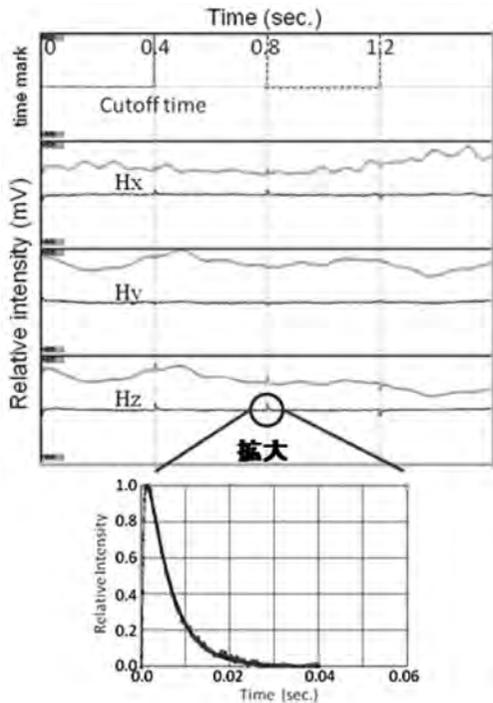
データ収録装置は、2008年まではヘリコプターのキャビンの中に置いていたが、この場合、その改造を許可されたヘリコプターしか使用できず、非常時の探査装置の切り離しにも問題があったため、2009年からデータ収録装置を小型化し、第2図のように、センサーを搭載したバードの約10m上 (ヘリコプターから30m下) にそれを吊り下げることにした。これにより、吊り下げが可能なヘリコプターであればどのような機種でもこの探査に使えるようになり、安全性も向上し



第2図 GREATEM探査に用いる機器類、ヘリコプターへの装着状況。

た。

空中で磁場計測する場合、磁力計を空中に吊り下げるため、それが地球磁場の中で揺れることにより大きなノイズが発生する。このようなノイズが本当に除去できるかが大きな問題となるが、センサーの揺れをジャイロによりモニターし、さらに磁場の変動波形を完全に取得することにより、このノイズの大部分は補正できるようになった。このようなセンサーの揺れを高速で精度良く計測できるようになったことは、近年のジャイロ技術や加速度センサーの発達によって実現されたものである。また、揺れによる大きな磁場変動の波形を完全に取得できる大きなダイナミックレンジを持ち、かつ高速サンプリングができるA/Dコンバータ等の電子機器の発達によりこのようなことが可能となった。今後、これら電子機器がさらに高性能化すれば、この探査の精度も向上するであろうし、可探深度もさらに深くできるであろう。

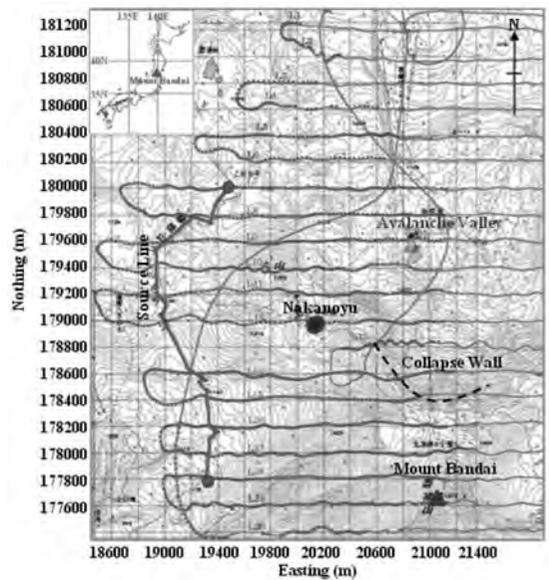


第3図 取得されるデータと補正後のデータ。

第3図には、観測された磁場3成分記録を示す。変動の大きい線は取得されたデータであり、軸上でほとんど一定の線は揺れ補正したデータである。この処理でもノイズが大きい場合は、データを複数個重ねる処理(スタッキング)が有効である。こうして、地下構造解析に使う過渡現象曲線(データ拡大図参照)が得られる。第3図の下に示した拡大図では、点で示したデータと、それに最もよく合う層構造を仮定した比抵抗構造モデル(層の比抵抗と層厚を仮定したモデル)による計算値を示す線とを示した。この過渡現象曲線は、送信電流を突然切断したために、それを打ち消すように地下に流れる渦電流により誘導された磁場の測定点での減衰を表す。渦電流の分布は地下の比抵抗構造に依存しているので、その誘導磁場の分布を測定することにより地下比抵抗構造を推定することができる。ただし、ここで示した曲線は、測定器の周波数特性による影響も含まれているので、実際に地下構造解析するには、地下比抵抗構造モデルから計算される磁場の過渡現象曲線に、その周波数特性をコンボリューションした曲線と比較し、妥当な地下比抵抗構造を求める。こうして得られる比抵抗構造の



第4図 磐梯山での探査状況。

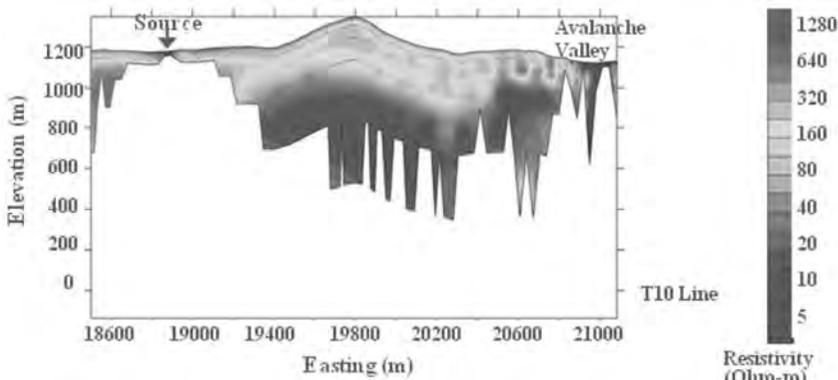


第5図 探査地域と飛行コース。

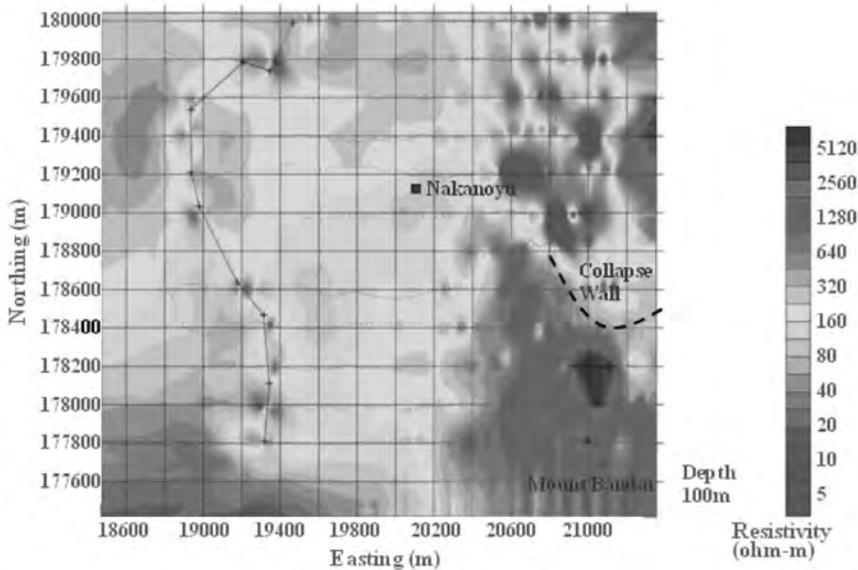
妥当性については、ほぼ同じ地点での地表測定と空中測定との結果の比較により検討されている(伊藤ほか, 2007)。

3. 磐梯山での探査例

磐梯山は福島県中部に位置する活火山で、1888年に大噴火し、その北側斜面が大崩壊を起こした(下



第6図
L10飛行コース沿いの断面比抵抗構造 (Mogi *et al.* 2009 より引用).



第7図
地表から深さ100mでの比抵抗分布 (Mogi *et al.* 2009 より引用).

鶴, 1988). 大崩壊を起こしたメカニズムについてはいろいろな議論があり, その崩壊を起こす原因が地下構造にも関係があると考えられている (Yamamoto *et al.*, 1999 ; Yamawaki *et al.*, 2004). そこで, この探査をとおして比抵抗構造の面からその検討を行った (Mogi *et al.*, 2009).

この探査のようすを写した写真を第4図に, また, 送信線の位置, 飛行コースを第5図に示す. 飛行コースはほぼ東西方向であり, それぞれの間隔は約200mである. ヘリコプターは, このコース上を平均50km/hの速度, 対地高度100m程度で飛行した. この探査で得られたデータの例とそれを揺れ補正した例を第3図に示し, 飛行コースに沿った比抵抗構造を求めた

例を第6図に示した. この図は, 左側に送信源があり, それからほぼ東西方向に飛行した測線上の各測点毎に層構造を仮定して求めた比抵抗構造を並べたものである. 条件の良いところでは深度1,000m近くまでの構造が推定されている. また, 第7図には, それぞれの飛行コースの断面比抵抗を内挿して求めた地表から100m深での比抵抗分布を示した.

これらの結果によると, 地表から深度200~300mでは100 Ωm以上の高比抵抗層が分布する. 探査地域の中央部~西側では, その下に20 Ωm以下の低比抵抗層が分布する. 一方, 南東側の表層は高比抵抗層が分布し, 新しい溶岩や火山性堆積物に対応している. また, 北東側の崩壊地の堆積物が分布する地域

は、低比抵抗層が分布している。磐梯山においては、各種の地球科学的手法による調査が行われている(防災科学研究所編, 1995)。第6図や第7図に示した比抵抗構造は、その総合研究において行われたDighem型空中電磁法(棚橋ほか, 1995)やダイポール・ダイポール法電気探査(竹内ほか, 1995)、MT探査(井上ほか, 1995)で得られた比抵抗構造と概ね一致している。

ここで得られた比抵抗構造は、各測点の地下を水平層構造と仮定した比抵抗構造である。実際の比抵抗構造は水平方向にも変化があるし、このような起伏のある地域では地形の影響もある。これらの点については、今後3次元比抵抗構造モデルを考えていく際の検討課題である。

GREATEM探査の調査例については、ここで述べた磐梯山での調査の他に、阿蘇火山(伊藤ほか, 2007)、深部地質構造調査(結城ほか, 2010)、長大トンネル調査(Okazaki *et al.*, 2010)等の報告がある。

4. 将来の発展

電磁気的な手法による地下構造探査は、計測される比抵抗値により岩石の硬軟や水の存在が推定できるので、地震発生地域や火山地域の構造探査に使われてきた。可探深度が100m程度では表層しか探査できないが、それが1,000m以上になれば、基盤岩中の断層構造や火山体中の帯水層の分布などの探査に利用できる。また、これまでは地下構造を1次元(深度方向にのみ比抵抗が変化する)や2次元(走行方向には構造は一樣)と仮定し、地下構造を推定することが普通であった。その理由として、3次元構造の数値モデリングが難しいことや、非常に多くの場所で測定する必要があり、測定に多大な時間を要することが問題となっていた。前者は数値計算法の発展やコンピュータの計算速度向上により解決されつつある。しかし、モデリング技術が向上してもそれに入力する十分なデータがなければ妥当な構造は得られない。空中探査は、ほぼ等間隔のデータを短い期間に大量に得ることが可能であり、今後、詳細な3次元構造モデルを作成するためには必須の探査法であるといえる。

現在、最も精密な地下構造が得られている方法は、海上の地震反射法探査であろう。この探査は、船舶により速やかに障害物のない海上で満遍なく探査

地域内のデータが取得できることにより実現されている。このような条件を陸上で実現するとすれば、空中探査を用いるしかないであろう。現在までは、空中探査は広い範囲をカバーする予察的探査に使われてきたが、将来は対象地域で満遍なくデータを取得し、より正確な3次元地下構造を得る手段として発展していくと考えられる。そのためには、探査精度のさらなる向上が必要である。

また、地下の情報を正確に把握するためには、いろいろな地球物理的手法による探査データと合わせて総合的な情報を利用することが望ましい。航空機を利用し、電磁気だけでなく磁気、重力などのセンサーを同時に搭載すれば、一度の探査で複数の情報が得られる。さらに、地表の温度分布が得られる熱赤外センサーや地表の変動を調べられる干渉SAR等の測定を同時に行えば、その熱源や変動を引き起こしている地下の原因を探ることも可能となるであろう。このような他手法との協同探査は、航空機を効率よく用いることになり探査経費の点でも利点があって、空中総合地下探査法として発展が期待される。

参 考 文 献

- 防災科学研究所編(1995): 磐梯火山-防災研究の進展にむけて-, pp.241.
- Elliott, P. (1998): The principles and practice of FLAIRTEM: Exploration Geophysics, 29, 58-60.
- Fountain, D. (1998): Airborne electromagnetic systems - 50 years of development, Exploration Geophysics, 29, 1-11.
- 井上 純・川上則明・高杉真司・田中耕平・竹内睦雄(1995): MT法による磐梯山の比抵抗構造, 防災科学研究所編: 磐梯火山-防災研究の進展にむけて-, p.31-41.
- 伊藤久敏・海江田秀志・楠 建一郎・茂木 透・田中良和・藤光康宏・結城洋一(2007): ヘリコプターを用いた総合空中探査システムの開発(その1)-空中電磁, 空中磁気, 空中放射能, 空中赤外映像の各探査手法の高度化-, 電力中央研究所研究報告, N06011, 21.
- 駒井二郎(1973): 空中電磁法の現状と展望, 物理探査, 26, p.18-41.
- Mogi, T., Tanaka, Y., Kusunoki, K., Morikawa, T. and Jomori, A. (1998): Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM): Exploration Geophysics, 29, 61-64.
- Mogi, T., K. Kusunoki, H. Kaieda, H. Ito, A. Jomori, N. Jomori and Y. Yuuki (2009): Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of Mount Bandai, north-eastern Japan, Exploration Geophysics, 40, 1-7.
- Okazaki, K., H. Kunishima, T. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Ito, T. Mogi, T. Hashimoto, Y. Yamaya, M. Utsugi, H. Kaieda, H. Ito, Y. Yuuki and A. Jomori (2010): Airborne electromagnetic and magnetic survey for long tunnel construction design, Physics and Chemistry of the Earth, Submitted.

- Palacky, G.J. and G.F. West (1991) : Airborne electromagnetic method., in Nabighian, M.N. Ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics.*, p.811-879.
- 下鶴大輔 (1988) : 磐梯火山の概要, 磐梯山1888年噴火100年記念号-地学雑誌, 97, 243-255.
- Smith, R.S., A.P. Annan and P.D. McGowan (2001) : A comparison of data from airborne, semi-airborne, and ground electromagnetic systems., *Geophysics*, 66, p.1379-1385.
- Strack, K.-M. (1992) : *Exploration with Deep Transient Electromagnetics*, Elsevier, pp.373.
- 竹内睦雄・中里裕臣・森 充広・藤崎 修・金 喜俊・古谷 保・小倉 力・奥山武彦 (1995) : 電気探査法による磐梯山の比抵抗構造調査, 防災科学研究所編L: 磐梯火山-防災研究の進展にむけて-, p.21-30.
- 棚橋道郎・森川剛夫・日下部和宏・吉川治男・田中耕平・井口隆・竹内睦雄 (1995) : 磐梯火山における空中電磁法調査, 防災科学研究所編: 磐梯火山-防災研究の進展にむけて-, p.1-9.
- Yamamoto, T., Nakamura, Y. and Glicken, H. (1999) : Pyroclastic density current from the 1888 phreatic eruption of Bandai volcano, NE Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90, 191-207.
- Yamawaki, T., Tanaka, S., Ueki, S., Hamaguchi, H. and Nakamichi, H. (2004) : Three-dimensional P-wave velocity structure of Bandai volcano in northeastern Japan inferred from active seismic survey: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138, 267-282.
- 結城洋一・西川 徹・山根 誠・中山文也・池田和隆・山下善弘 (2010) : 総合空中探査システムによる地下深部地質構造調査, 日本地球惑星科学連合2010大会, STT074-P02.
-
- MOGI Toru, ITO Hisatoshi, KAIEDA Hideshi, KUSUNOKI Ken'ichiro, JOMORI Akira and YUUKI Youichi (2011) : On the grounded source type airborne electromagnetic (GREATEM) survey.
-

<受付: 2010年8月2日>