

2. 地球電磁気的手法による地下構造探査

2.2 航空機磁気測量

工業技術院地質調査所 中塚 正・大熊茂雄・

森尻理恵・宇都浩三・須藤 茂

(1) 要 約

1989年 9月24日～26日に手石海丘と伊豆高原を含む陸海域の空中磁気探査を実施した。従来の探査に比してはるかに高密度の測線配置であり、航跡の位置標定には、対地ビデオカメラに加えてマイクロ波測距装置(MRS)を用いた。航空機の誘導技術が未熟なため、かなりの測線分布の粗密を生じたが、既存データよりは格段に精密な磁気異常分布図が得られた。この磁気異常の解析から、この地域の特徴的な磁氣的構造が明らかになり、今回の地震火山活動に関連した大規模な磁氣的構造の変動はなかったと推察された。また、1978年の探査測線に沿った新旧データの磁気異常プロファイルの比較からは、川奈崎付近を中心とする地下での磁化の減少に相当する変化があった可能性が指摘される。

(2) 研究目的

一般に火成岩は堆積岩に比して強い磁性を有しており、火山地域において顕著な磁気異常の見られることはよく知られている。この磁気異常を空中から測定し、その分布から地下構造を明らかにするのが空中磁気探査である。また、岩石の磁性は、岩石に含まれる強磁性鉱物に由来しており、マグマのような高温状態では、磁性鉱物のキュリー点温度を超えるため、強磁性が失われる。すなわち、空中磁気探査におけるマグマ溜りは、地下構造の非磁性の部分に対応することとなる。

1989年 6月30日に始まった伊豆半島東方沖の群発地震と、引き続く 7月13日の手石海丘の噴火活動を契機とする本研究では、①この地震火山活動の活動域において航空機による磁気測量を行い精密な磁気異常図を作成すること、②またそのデータの解析から強磁性岩体の分布を立体的に明らかにすること、③さらに既存の広域探査データとの比較検討により、マグマ活動による大規模な磁氣的変動現象の存否を明らかにすることを目的としている。

本研究による調査は、航空機による空中からの測定であり、磁性に関する情報に限定されるものの、海域と陸域にまたがる区域の立体的な地下構造情報が得られることに特長があり、マグマの3次元的な活動状況を考察する上での重要な指針となることが期待される。また、作成される精密な空中磁気異常図は、この地域の今後の地震火山活動と関連した磁氣的な変動現象の検討を行う上での基礎データとしても貴重である。

(3) 研究方法

① 調査概要

1989年 9月24日～26日に手石海
丘と伊豆高原を含む陸海域（東西
約15km, 南北約20km）について航
空機による高密度の磁気測量を実
施した（表1参照）。この地域の
既存の空中磁気探査データとして
は、地質調査所による1978年の海
域の探査データと磁気図（図2）

〔1〕および新エネルギー総合開
発機構による1982年の陸域調査の
磁気図〔2, 3, 4〕があるが、
測線間隔が3-4kmと粗く、この地
域の詳細な磁氣的構造を議論する
には不十分である。なお、図2に
おいては飛行測線位置も記載され
ており、今回の探査区域内には3
本の主測線と1本の交差測線が通
っているのみである。

従って今回の調査では、東西約
15kmの範囲内に南北方向の主測線
約50本を配置した。従来の探査に
比して、はるかに高密度の測線配
置であり、航跡の位置標定には、
対地ビデオカメラ（直下点インジ
ケータ付）に加えてマイクロ波測
距装置（MRS）を用いた。MR
Sは、地上に設置された従局との
間でマイクロ波の交信を行って、
複数の従局までの距離を公称分解
能 0.1mで毎秒計測できるもので
あり、Trisponder の商標名で知
られている。

表1. 伊豆半島東部空中磁気探査の概要

現地調査期間	1989年 9月24日～ 9月26日
調査区域	伊東市及びその東方を中心と する陸海域（面積約 280km ² ）
使用航空機	JA5264（セスナ404型）（図1）
飛行高度	海拔2,300フィート（700m）
延べ測線長	約 1,080 km
主測線方向間隔	N-S, 300m（計画）
航法・誘導	目視及びロランC円航法
航跡標定	陸域の対地映像ビデオ 及び マイクロ波測距装置（MRS）
飛行基地	名古屋国際空港
使用機器類	
・ 磁力計	EG&G GeoMetrics (USA) G813型プロトン磁力計
・ 気圧高度計	丸文(株) 833000
・ ロラン受信	Decca Survey (UK) ADL-81
・ M R S	セナー(株) SNCS-21 ほか
・ データ収録	丸文(株)821000/831000/832000
・ 対地ビデオ	中日本航空(株) BPV-002 ほか
地磁気日変化 補正データ	気象庁地磁気観測所（柿岡） による毎分値（全磁力）



図1. セスナ404型探査機 JA5264

MRS以外の各種計測装置は、従来より地質調査所の空中磁気探査に用いられているもので、その詳細については引用文献〔5, 6〕を参照されたい。

MRSの使用にあたっては、その計測結果をデータ収録するため、既存の磁気テープによるデータ収録用装置（丸文機821000）に若干の改造を行った。この改造は、MRSの計測データがディスプレイへの表示とともに、RS-232C形式で出力されているので、RS-232Cインターフェイスをデータ入力部に増設したものである。これにより今後、他の種類の位置計測手法を取り入れる場合にも、RS-232C規格の出力さえあれば、容易に接続可能となった。

しかしながら、MRSのデータからリアルタイムに航空機の予定測線に対する位置を計算して、航空機を予定測線上へ誘導できる体制にはなっておらず、航空機の誘導には、目視と従来のロランC円航法によらざるを得なかった。その結果、かなりの測線分布の粗密を生じたが、既存データよりは格段に精密な測定データが得られた。

② 位置標定精度

この調査のように高密度の探査データを取り扱う上では、航空機の航跡位置を正確に決定することが特に重要である。そのために本調査ではMRSを導入したが、これを航空機に搭載し飛行しながらの測定での測位精度は、最良条件下での公称分解能とは異なり、その評価を行っておくことも必要である。そこで、探査飛行中の良好な目標物のある地点において、対地ビデオカメラによる標定位置とMRSによる測位位置との比較を行った。

対地ビデオの記録には、それ以外の計測データを記録するデータ収録装置の時計と同期した時刻が画面に表示されるようになっている。対地ビデオ標定では、ビデオ記録と地形図との対応から、地形図上の標定点と時刻との対応が得られ、その標定点は、地形図の準拠するUTM座標系での座標値として読みとられる。これによって対地ビ

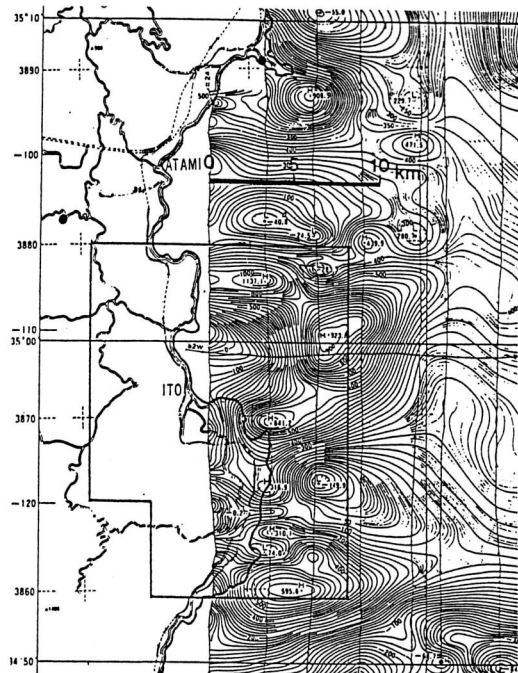


図2. 探査区域と1978年調査の空中磁気図。

図中の黒丸はMRS従局設置位置を示す。

デオ標定が10m単位程度で数値化されるが、この標定精度は、2万5千分の1地形図上で1mmすなわち25m程度である。一方、MRSによる位置標定は、従局位置情報とデジタルに収録された距離データから計算される。設置した従局の位置は図2に示してあるが、その正確な座標値は5千分の1地形図を用いて緯経度0.1秒位まで求めてあり、10m程度の精度は確保されている。

両者の比較には時刻の同期が不可欠であるが、不幸にして対地ビデオのデータ収録において時刻の同期の不具合があったため、十分な結果とはならなかった。その比較結果は、図3に示すとおりであり、すべて南北測線に対するものである。しかし、時刻のずれがあまり大きくなく、南北測線であることを考慮すると、この比較の東西成分はかなりの有意性をもつと考えられる。また、現実にはフライト中の時刻のずれが大きくは変動しないことと、実際のある1フライトのデータが南北成分でも、北向き飛行時と南向き飛行時でそれぞれ誤差の値がまとまった分布を示していること（図3で×印を施したものを）を考えあわせると、東西成分の誤差分布に示された程度の精度は十分に確保されていると考えられる。さらに、東西成分の誤差分布の中心が-40m付近にあることは、従局位置情報の誤差から誘導されるものである可能性があり、その分散状況は対地ビデオ標定の誤差に起因するものである可能性がある。

以上の考察から、MRS測位は従局位置情報の誤差による標定位置の系統的なずれを除いて、実用的には少なくとも20～30mの精度が確保されていると考えられる。従って、今回の調査における最終位置標定には、時刻同期ずれの心配がなく測位精度も優れていると期待されるMRSのデータを採用することとした。

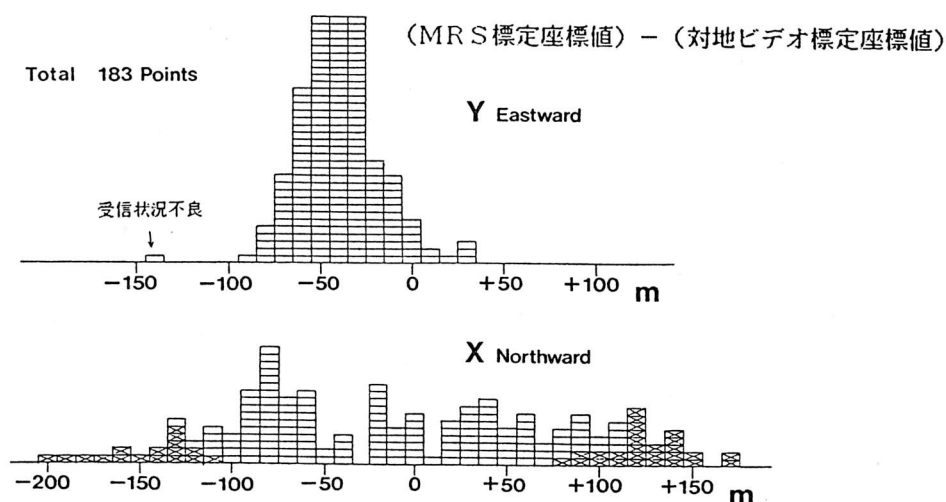


図3. MRS測位と対地ビデオ標定との比較。誤差ベクトルを南北成分と東西成分で表示した。×印は、対地ビデオ装置の時刻ずれが相対的に大きかった特定のフライトに関する比較データ。

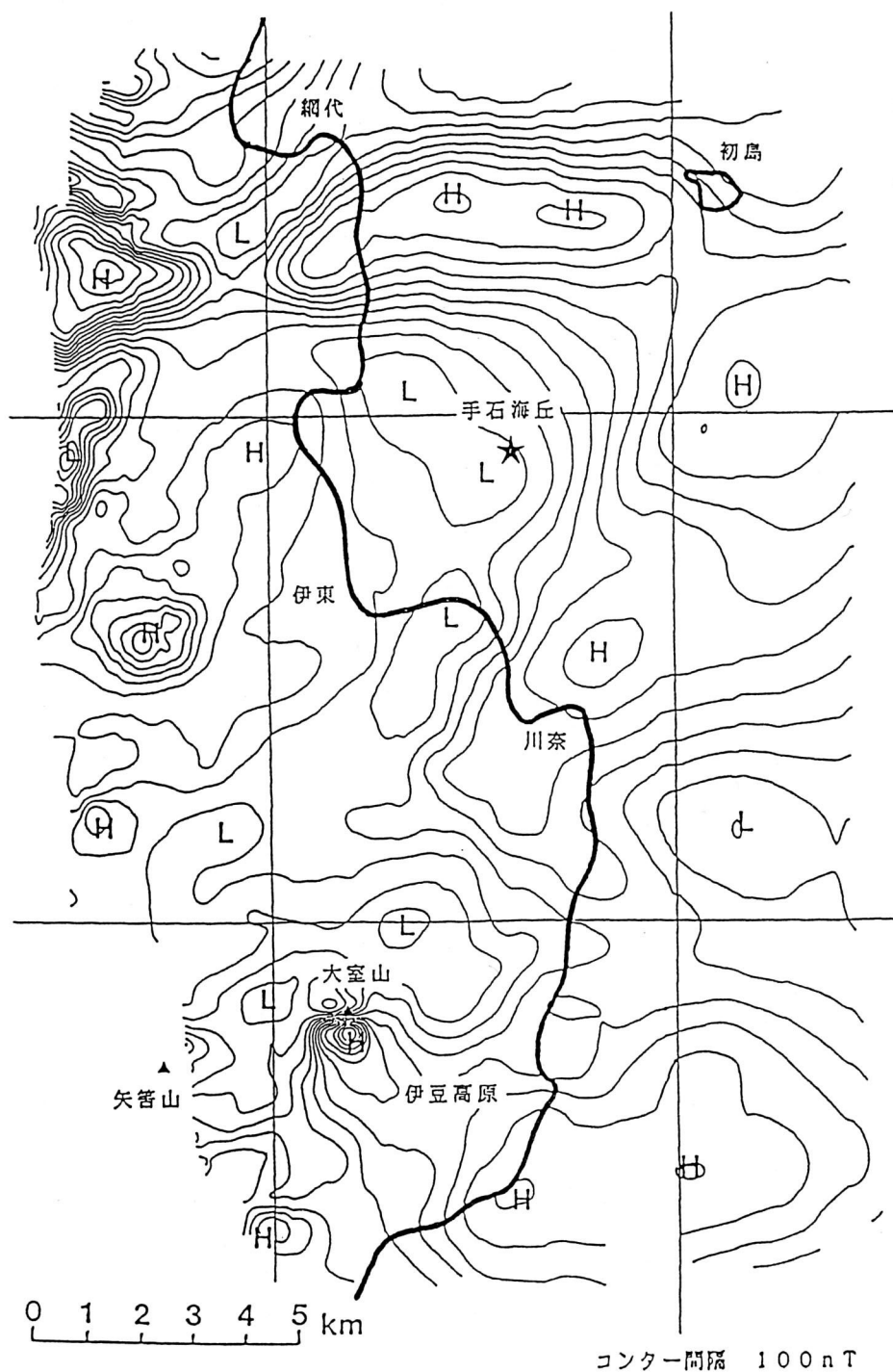


図4. 1989年9月調査による伊豆半島東部地域のIGRF残差空中磁気異常図。
飛行高度は海面上700m (2,300ft) で、南北方向の測線約50本による。

③ データ処理・解析

現地調査の飛行測定データは、その点検整理の後、従来より地質調査所で使用しているデータ処理ソフトウェア〔7〕を用いて磁気異常分布図の作成を行った。ここでは、新たに使用したMRSによる位置標定のプログラムの作成と、高密度探査にふさわしい大縮尺の図化のための若干のソフトウェアの改造を行った。作成された磁気異常分布図を図4に示す。地磁気日変化の補正にあたっては、気象庁地磁気観測所による柿岡での全磁力毎分値のデータを使用させていただいた。なお、調査期間中の地磁気の擾乱状況としては、9月26日の14時47分（JST）頃に発生した磁気嵐の急始（SC）の前はきわめて静穏であり、磁気図作成に使用したデータはすべてこの地磁気擾乱のない状態での測定である。

図4には、数多くの磁気異常分布の特徴が表現されており、この地域（陸域）の地質〔8〕とも対比しながら、定性的な解析を行った。その結果は後述する。また、磁気異常図からも明らかなように、この地域の磁気異常は地形の起伏の影響を強く受けており、その定量的な解析には地形効果を十分考慮する必要がある。従って、海域を含む詳細な地形データの数値化をすすめた。しかし、高密度探査にふさわしい地形データの数値化は膨大な作業となり、現在なお進行中である。

次に既存の磁気探査データとの磁気異常分布の比較検討を行った。1978年の探査は今回の調査と比べて測線間隔ははるかに粗いため、面データとしての比較は有意でないが、1978年の探査測線に沿ったプロファイルでの新旧データの比較は、マグマ活動と関連した磁気異常分布の変化を検討する上で有意義であると考えられる。しかし、両者のデータには約240mの高度差があり、単純な比較が行えないので、1978年（低高度）のデータを、測線に垂直な2次元地下構造を仮定して上方接続したものと、今回（高高度）のデータを比較した。今回の調査範囲を通る全4本の測線プロファイルでの比較を図5に示す。なお、1978年のデータには、使用された測位システムの相違のため、200～300m程度の位置標定誤差が存在すると考えられる。

図5でわかるように、磁気異常のパターンは大局的には一致するものの、手石海丘付近（測線B中央）とその南東方（測線A2中央部両側）で若干の相違が見られた。しかし、この比較では、磁気異常が現実的に3次元的事実であることに反して地下構造の2次元性が仮定されている。この特殊な仮定を除くためには、今回の面データに下方接続を行って1978年のデータと比較することが望まれるが、下方接続フィルターは、とくに高周波成分に関して不安定となることが知られている。そのため、下方接続フィルターは、高周波成分を除去して操作せざるを得ず、短波長成分が抑制された出力結果がもたらされる。図6に、このような処理を行った結果を示す。図5と比較すると、新旧両データのマッチングが改善されているものの、とくにA3測線において短波長成分の復元ができていないことがわかる。しかし、A2測線中央部両側の新旧デ

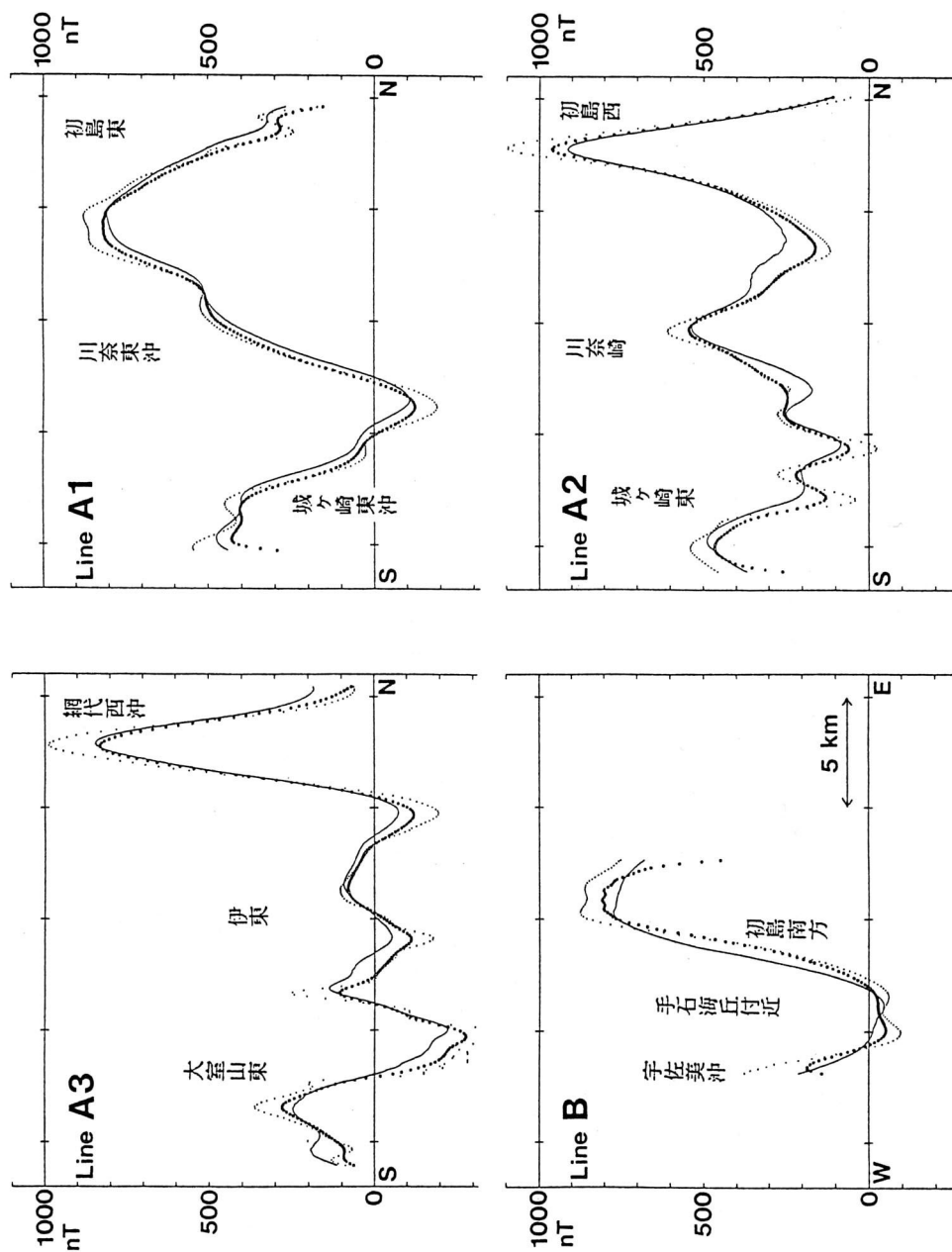


図5. 1978年の探査測線沿いの新旧磁気異常プロファイル比較(1)。

黒点は1978年の測線データ(高度460m)、それを2次元構造仮定の下に高度700mへ上方接続したものが丸印で、実線は1989年探査結果磁気図(高度700m)から当該測線位置のプロファイルをきったものである。

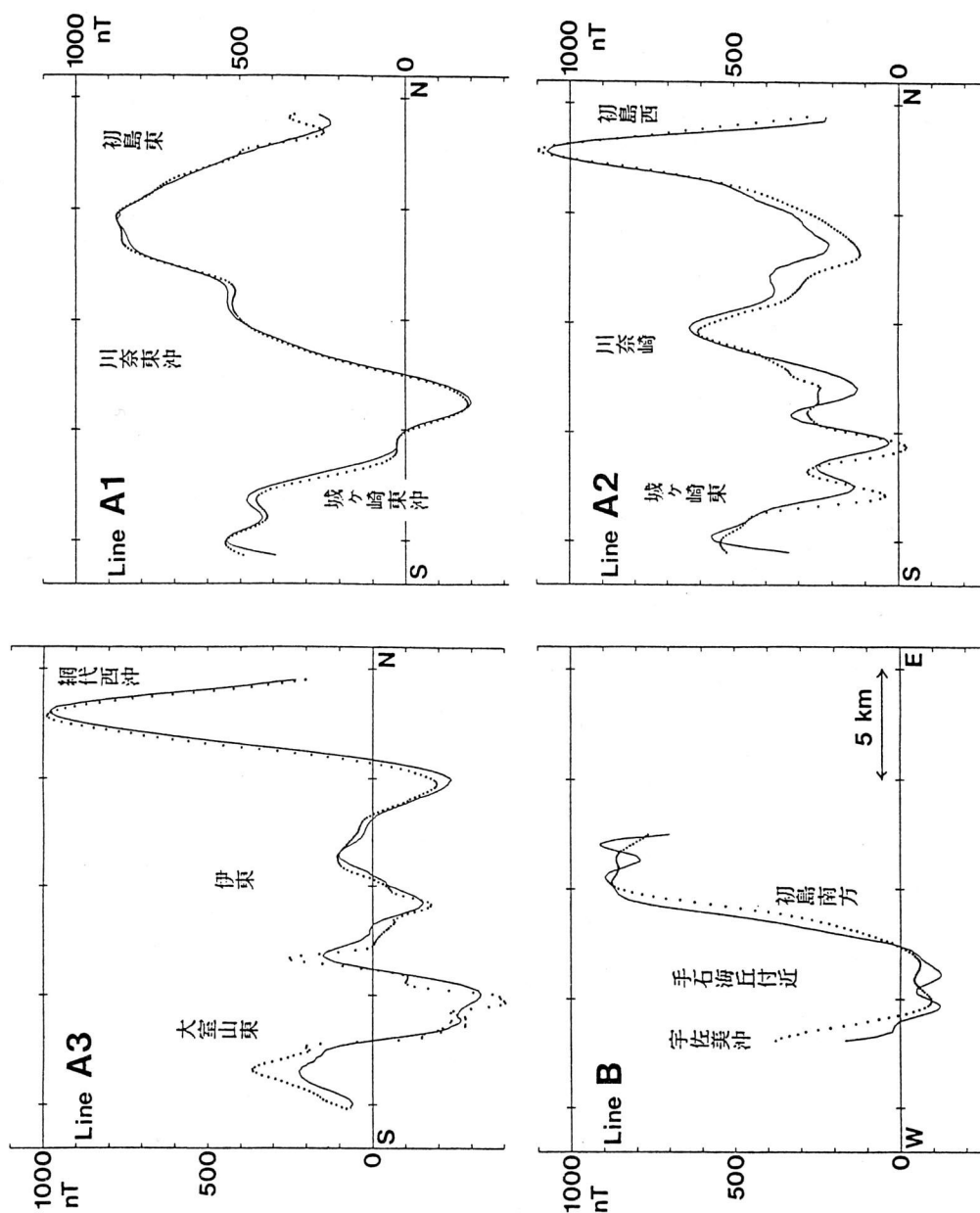


図6. 1978年の探査測線沿いの新旧磁気異常プロファイル比較(2)。

実線は1989年探査結果磁気図(高度700m)を高度460mに下方接続した面データから作成したプロファイルで、・印が1978年の 高度460mの測線データ。下方接続操作において、短波長成分がカットされている。測位誤差の効果を少なくするよう若干の調整を行ってある。

ータの相違は、図5と同様に現われており、この変化が有意である可能性がある。この変化を有意とすれば、川奈崎付近の地下2 km程度の所で磁化の減少が生じたことに相当する。

(4) 研究成果

本研究の調査によって伊豆半島東部地域の詳細な磁気異常分布が得られた。このデータは、当該地域の磁氣的地下構造を考察する上で重要であると同時に、今後の磁氣的な変動現象を検討する場合の客観的な基礎データとなる。

また、この磁気異常分布の解析から次の諸点が認められた。

- ① 網代一初島、矢筈山一初島、伊豆高原南部からその東方の3つの地帯は、連続した高磁気異常で特徴づけられ、それぞれ高磁性の岩体が伏在していることを示すと考えられる。
- ② 手石海丘は、ゆるやかな低磁気異常部の中心をややそれた所に位置し、噴火に伴う大規模な磁氣的構造の変動はなかったと推察される。
- ③ 大室山の磁気異常は対地高度が低いいため特に強調されているが、その周辺に分布する溶岩流は層厚が薄く大きな磁気異常を生じない。
- ④ 低磁気異常帯は湯ヶ島層の分布とよく対応している。矢筈山一初島の高磁気異常帯の中には、大室山と川奈の間に低磁気異常部がある。それは溶岩流下の湯ヶ島層の分布を示すと考えられるが、大規模なマグマ溜りの存在のため元来強磁性の岩体が熱消磁されている可能性も否定はできない。
- ⑤ 探査区域西縁にある正および負の磁気異常は、それぞれ地形の高まりを構成する宇佐美火山溶岩が正および逆に帯磁していることを反映しているとみられる。

また、1978年探査測線に沿ったプロファイルでの新旧データの比較によれば、磁気異常の大局的なパターンは11年間を通じて基本的に変化しておらず、今回の地震火山活動に関連して新たに大規模な磁気異常の生成・消滅は生じなかったと考えられる。また、より規模の小さな変化としては、川奈崎付近を中心とする地下での磁化の減少に相当する変化があった可能性がある。

(5) 考 察

今回の高密度空中磁気探査によって、多岐にわたる興味ある結果が得られた。

この研究の対象とした区域に大局的な3つの高磁気異常で特徴づけられる地帯が存在することは、この地域の地下構造発達を論ずる上で重要な要素となろう。とくに矢筈山一初島のNE-SW系の構造は、伊豆半島全体を特徴づける構造とも整合するものであり、また、伊東から熱海にかけての大局的な海底地形とも密接に関連することが推察される。

湯ヶ島層の分布に対応する低磁気異常帯は、熱水変質を受けて磁化強度が低下した地層の分布を示すと考えられ、そのような熱水変質を受けた地層が湯ヶ島層と呼ばれている。宇佐美火山溶岩の分布域には、正負の振幅の大きい磁気異常が分布する。その溶岩の噴出時期は必ずしも明確になっていないようであるが、磁気異常の正負を別にして振幅と地形の起伏とはよく対応することを考え合わせると、正逆帯磁の分布が正負の磁気異常のソースになっていなければならない。

噴火地点の手石海丘自体については、海底地形の変化分だけからはとくに大きな磁気異常は期待されないが、その近くに大規模なマグマの供給があれば、相当な変動が観測されてよいと考えられる。一方、実際の磁気異常にはとくに大きな変動がなかったことを示唆しており、浅部へのマグマの供給は量的には小さかったとみられる。このことは、曾屋ほか〔9〕による、より深部からのマグマの間欠的な供給（量的にも多くない）があったとする噴火のモデルと整合的である。また、川崎崎付近を中心とする地下での磁化の減少の可能性については、さらに精度的な検討を要すると考えられるが、群発地震の震源域にも近く、マグマの上昇に関連していたともみることができる。

活火山地域における高密度の空中磁気探査が、日本において本格的に実施されたのは、今回が初めてである。

地質調査所では、1986年の伊豆大島火山の噴火に際しても噴火後間もない時期の空中磁気データを取得し、その8年前の探査データとの比較による噴火活動にともなう磁気異常の変動の検討と、それらデータによる伊豆大島の磁氣的構造の解析を行った〔10, 11〕。両データを用いた磁気構造の解析は興味深い結果をもたらしたが、磁気異常の変動の検討を行うためには測線の密度が十分ではなく、精密な議論はできなかった。

今回の伊豆半島東部地域の探査では、そのことを踏まえて、高密度の測線配置を計画した。高密度の測定によって、この地域の磁氣的な構造に関する情報は、今回の結果（図4）と従来の空中磁気図（図2）とを比較してもわかるように、非常に鮮明になった。一方、新旧データの比較による変動現象の解明の観点からは、旧データの不十分さが、その解明を難しくしたといえよう。逆に今回の精密なデータを基礎にすれば、今後の磁氣的変動現象を空中磁気データからより精密に議論できる可能性を開いたと位置づけられる。しかし、このように高密度の空中磁気データが存在するのは、今のところこの伊豆半島東部地域のみである。日本のすべての活火山とまでは言えぬまでも、とくに活動的なものについては、高密度の精密な調査が推進されることを期待したい。

この緊急研究では、ある意味では必要にせまられて、高密度空中磁気探査を実施した。技術的な問題の検討を進める余裕もないまま、実地調査を実施せざるを得なかつ

たため、データとして不十分な面も生じた。しかし、この時期は奇しくも、地質調査所において、高密度空中磁気探査の技術的問題の検討と各種の地質状況の下での適用の研究が、計画されている時期でもあった。その計画は、工業技術院特別研究「精密地下構造評価のための高密度空中磁気探査技術の研究」として平成2年度から5年の予定で着手されることとなった。伊豆半島東部での探査の経験が、この特別研究の中で生かされるとともに、特別研究によって活火山地域の地下構造解明の研究がさらに進展することを期したい。また、緊急研究で残された地形情報を取り入れた精密な定量解析による地下構造解明は、この特別研究の中で引き続き研究を進めることとした。

(6) 引用文献

- 1) 地質調査所； 房総沖－伊豆沖海域空中磁気図。20万分の1，
地質調査所空中磁気図シリーズ，no.27 (1980)
- 2) 新エネルギー総合開発機構地熱調査部地熱調査第二課； 全国地熱資源総合調査
(第1次)の調査成果図の公開について。地質ニュース，no.362，58-62 (1984)
- 3) 大久保泰邦・津 宏治・堀川義夫・小川克郎・高木慎一郎； 全国の空中磁気図。
地質ニュース，no.374，48-57 (1985)
- 4) 中井順二・駒沢正夫・大久保泰邦； 関東地方の重力・磁気異常の分布と特徴。
地学雑誌，vol.96，185-200 (1987)
- 5) 中塚 正； 空中磁気探査のシステム化について(I)－ハードウェアシステム－。
地調月報，vol.35，341-364 (1984)
- 6) 中塚 正； 地質調査所の空中磁気探査システムの現況について。物理探鉱，
vol.37，268-278 (1984)
- 7) 中塚 正； 空中磁気探査のシステム化について(II)－データ処理ソフトウェア
システム－。地調月報，vol.40，99-111 (1989)
- 8) 久野 久； 5万分の1地質図幅「伊東」，地質調査所 (1970)
- 9) 曾屋龍典・宇都浩三・山元孝広・須藤 茂・富樫茂子・中野 俊・阪口圭一・
吉川清志・水野清秀・高田 亮・小野晃司； 1989年7月の伊豆半島東方沖海底
火山噴火と噴出物－正体を現した群発地震の黒幕－。地質ニュース，no.422，
14-26 (1989)
- 10) 牧野雅彦・中塚 正・大熊茂雄・金子 力； 伊豆大島火山の空中磁気異常。
火山第2集，vol.33，S217-S223 (1988)
- 11) Nakatsuka, T., M. Makino, S. Okuma and T. Kaneko； Aeromagnetic Surveys over
Izu-Oshima Volcano before and soon After the 1986 Eruption. J. Geomag.
Geoelectr., vol.42，337-353 (1990)

(7) 成果の発表

③口頭発表

発表者氏名	発表題名	発表会名, 年月	備考
中塚 正, 大熊茂雄, 森尻理恵	伊豆半島東部における精密 空中磁気探査について	C A 研究会, 1990. 2	
中塚 正, 大熊茂雄, 森尻理恵	伊東周辺陸海域の高密度空 中磁気探査 (1989年9月)	地球惑星科学関連学 会合同大会, 1990. 4	
中塚 正, 大熊茂雄, 森尻理恵	火山地域での高密度空中磁 気探査ー伊東周辺陸海域ー	物理探査学会第82回 学術講演会, 1990. 5	