

# 空中磁気探査の最前線

## —高分解能空中磁気探査—

大熊茂雄<sup>1)</sup>・牧野雅彦<sup>1)</sup>・森尻理恵<sup>1)</sup>・中塚 正<sup>1)</sup>

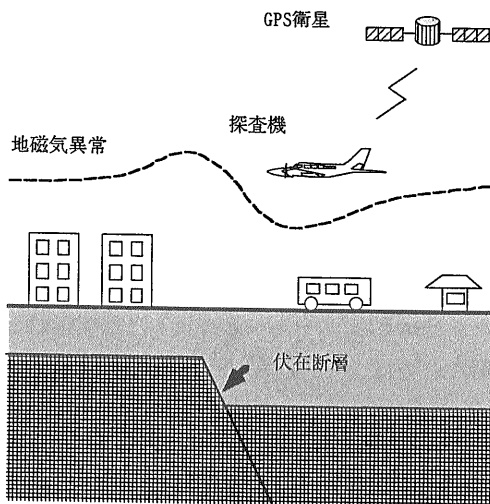
### 1. はじめに

空中磁気探査とは、航空機に搭載した磁力計により空中において地磁気(主にその強さ)を測定し、そのデータから地下構造を推定する物理探査法である。空中磁気探査は、他の物理探査法と同様に、従来は燃料・鉱物資源や地熱等の資源探査に関わる直接および間接探査として用いられてきたが、最近では探査技術の進歩や社会環境の変化により、「高分解能空中磁気探査」として地下構造調査一般に活躍の場を広げている。特に、地震・火山活動の活発な我が国や米国西海岸地方ではそれら災害の軽減のための伏在断層の調査や、火山の内部構造調査等に用いられ成果を上げ始めている。本論では、内外の話題を含めて空中磁気探査の最前線をお知らせしたい。

### 2. 高分解能空中磁気探査

「高分解能(高密度)空中磁気探査」(第1図)とは、従来に比べ格段に高密度に測点・測線を配置しかつ高精度に地磁気を測定する磁気探査のハードウェアおよびソフトウェア技術の総称である。「従来」とは常に変化するが、ここではロランC等の電波航法による位置標定に対応した磁気探査を指すことにする。空中磁気探査の歴史はハードウェアおよびソフトウェア双方の発展の歴史であるが、換言すれば位置標定技術の発展の歴史でもある。重力探査等の地上探査においてはその意義は別として物理的に可能な程度まで高密度の調査が行えるが、航空機等の飛行体による空中探査ではそうはいかない。空中磁気探査の最も初期の段階では航空写真が位置標定に使われた。すなわち日付時刻

が写しこめるカメラによる地表の連続撮影が行われ、位置標定は後処理された。1970年代になって電子技術の発展により電波航法装置が実用化され、これが位置標定装置として利用されるようになった。電波航法装置もドップラーレーダー、ロラン双曲線航法、Decca、ロラン円航法等が次々開発されていったが、位置標定精度は原理的に数100メートル程度であった。このような状態が1980年代後半まで続いたが、1990年代に入り再び長足の進歩を見せた。すなわち、GPS(Global Positioning System)の実用化によるデファレンシャルGPSによ



第1図 高分解能空中磁気探査の概念図。GPSによる位置標定技術に支援され、低高度・高密度の空中磁気探査が可能となった。探査機には磁力計が搭載され、空中において地磁気(地球磁場)の主に強さ(全磁力)が測定される。高分解能空中磁気探査は日本では伏在活断層の調査や、火山の内部構造調査等に利用される。海外では、燃料・鉱物資源探査等にも利用されている。

1) 地質調査所 地殻物理部

キーワード: 磁気探査, 高分解能

り測位精度が原理的に数m程度と格段に向上し、高分解能調査が現実のものとなったのである。磁気の測定そのものの精度は、15年ほど前から光ポンピング型磁力計により0.01nT程度あったが、これに見合った航空機の汎用測位システムはごく最近まで存在しなかったのである。

### 3. 日本における技術動向

#### 3.1 地質調査所における過去の高分解能空中磁気探査関連研究

我が国における空中磁気探査に係わる調査および研究は地質調査所、海上保安庁水路部、国土地理院、金属鉱業事業団、大学および一部民間企業等によって行われてきたが、ここでは地質調査所での過去数年の高分解能空中磁気探査関連研究を紹介する。

地質調査所では、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(平成2-6年)」により「高分解能空中磁気探査」の実用化をにらんだ研究を実施した。本研究は、従来の空中磁気探査技術をさらに向上させ微細構造の解明に適合する高密度測定システムの開発を進めるとともに、それに対応するデータ処理・解析の技術を確立することにより、資源評価をはじめ国土の開発利用・保全防災等各種のニーズに対応した地下構造の精密な評価を可能ならしめることを目標としていた。本研究においては、秋田県由利原地域(グリーンタフ地域)・静岡県丹那断層地域(断層系構造地域)・浅間火山地域(活火山地域)における高密度空中磁気探査を実施するとともに、他のプロジェクトでデータが取得された伊豆・雲仙・西表等の空中磁気データについても地下構造解析を進めた。それらの成果のうち、主要なものについて以下に記す。

##### 秋田県由利原地域：グリーンタフ地域

GPSの実用化前の1990年にはマイクロ波測距装置(MRS: Microwave Ranging System)により、従来のロラン航法(実用位置精度: 約200~300m)に比べ位置精度が一桁高い調査を秋田県由利原台地およびその周辺で行った(森尻ほか, 1992; 写真1)。この調査により鳥海火山に起源を持つ「象潟岩層なだれ堆積物」の分布に対応した高磁気異

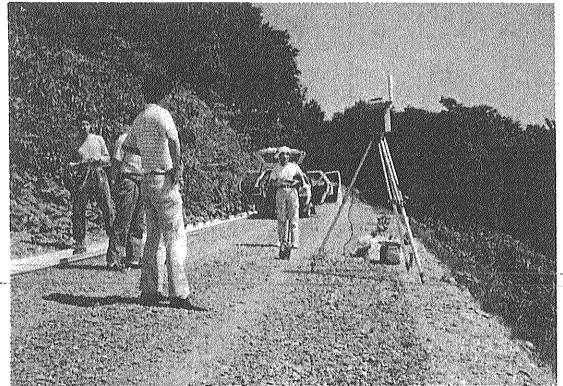


写真1 秋田県由利原地域の高分解能空中磁気探査で使用したMRS地上局。日住山南斜面に設置したMRS地上局。2個設置した地上局の一つ。探査機の飛行方向に障害物がない地点を探すのは難しい。

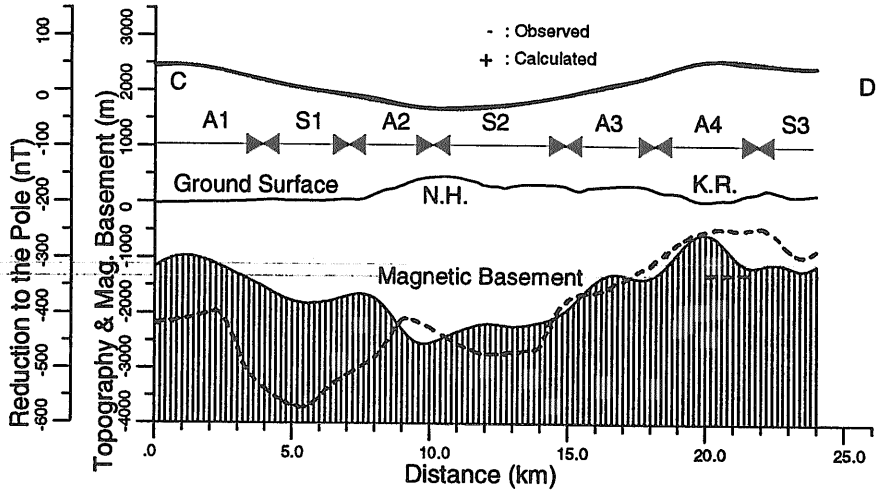
常が予想外にも観測され、当該の岩層なだれ堆積物の流動メカニズムについて興味ある情報を提供した(口絵7)。また、これらの浅部構造による磁気異常をモデリングにより除去し残差磁気異常を解析することにより、当該地域の深部に伏在し油・ガス鉱床を胚胎する新第三紀青沢層の起伏構造を明らかにした(Okuma et al., 1995; 第2図)。

##### 静岡県丹那断層地域：断層系構造地域

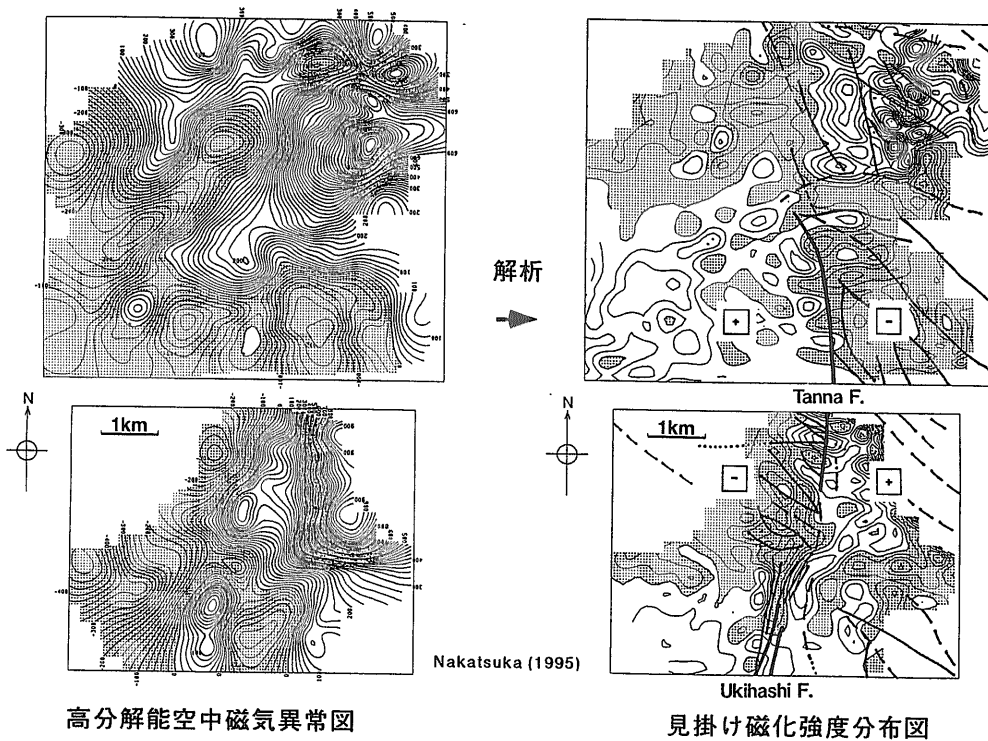
丹那断層地域では、磁気異常が地形起伏の影響を大きく受けるとともに断層構造そのものも地形に現れており、地形自体の影響と断層構造の影響とを分離することに困難があったが、精密地形補正に加えて開発したノルム最小化技法に基づく磁化強度マッピングの解析により、左横ずれ断層の応力場に対応した断層破砕帯の発達域を解明した(Nakatsuka, 1995; 第3図)。

##### 浅間火山地域：活火山地域

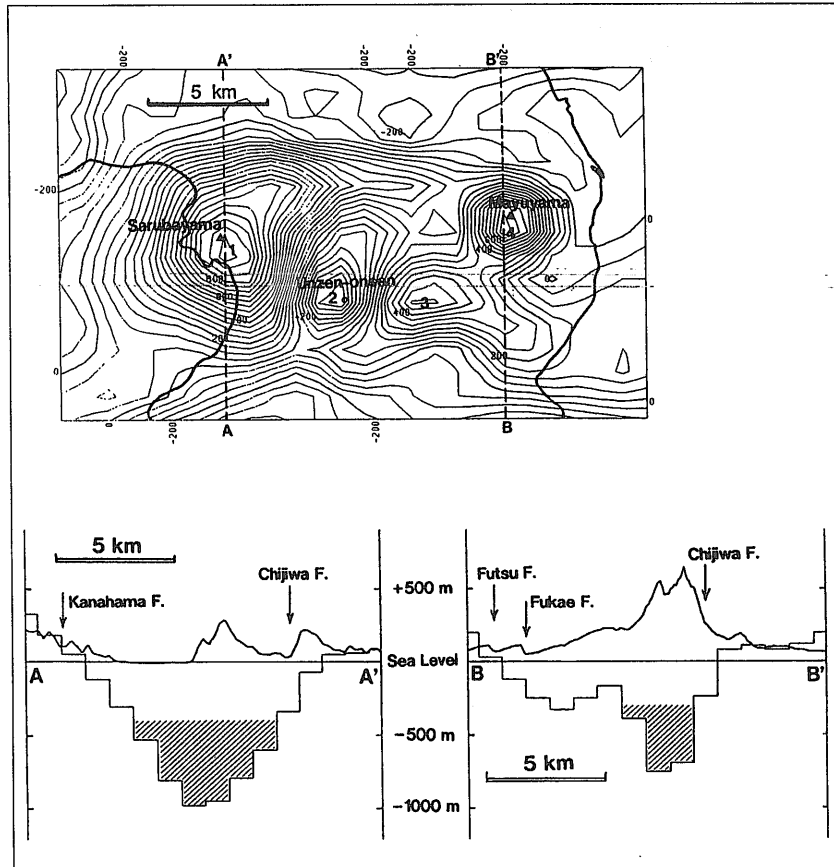
浅間火山地域(口絵1)では、時代を異にする火山活動の変遷を経ているが、ヘリボン探査(口絵2および3)による精密磁気異常分布はその状況をよく反映しており、山体を構成する各活動ユニットに対応した溶岩との対比が可能であること、また、より新しい噴火活動によって覆われた溶岩流の分布範囲等が解析可能であることが明らかになった(牧野ほか, 1993; 口絵4)。また、雲仙地域では、地形効果の適切な補正と磁化強度の正確な見積もりに基づいて、山体構造における火山噴出物の堆積し



第2図 秋田県由利原地域の磁気基盤断面図(東西)(Okuma et al., 1995). A1:象潟背斜, A2:仁賀保背斜, A3:由利原背斜, A4:矢島複背斜, S1:白雪川向斜, S2:西日向斜, S3:新莊向斜, N.H.:仁賀保丘陵, K.R.:子吉川. 影を付けた部分が磁気基盤を表す. 解析に用いた極磁力異常(観測および計算値)のプロファイルも併せて表示してある. 破線は青沢層の推定上限および下限深度(大沢ほか, 1988)を示す.



第3図 静岡県丹那断層地域における高分解能空中磁気異常図と見掛け磁化強度分布図(Nakatsuka, 1995). 高分解能空中磁気異常図でのコンター間隔は20nT. 見掛け磁化強度分布図でのコンター間隔は1A/m. 太い実線は断層を示す. +および-記号は, それぞれ正および負の磁化強度を示す. 丹那断層(見掛け磁化強度分布図中央)に沿って正負の磁化強度が4象限型の分布を示す.



第4図 雲仙火山付近の火山岩体の底部深度解析図(上)と同南北断面図(下) (Nakatsuka, 1994). 深度解析図においてコンター間隔は50mで、海面よりの深度を表す。現在の地球磁場方向に一様磁化(平均磁化強度: 2.9A/m)を仮定して解析を行った。南北断面図の斜線の範囲は、磁化の強いより浅部の構造と等価な構造とも考えられる。特にA-A'断面の斜線の範囲は、地表兆候が認められないことから、伏在する火山体に対応する可能性が示唆される。

た基底面の深度変化を明らかにして既知の地質構造と対比して解釈し、未知の主要な火山体の伏在を推定した(Nakatsuka, 1994; 第4図)。

### 3.2 有馬・高槻・六甲活断層地域における高分解能空中磁気探査

我が国は従来より近年の兵庫県南部地震や雲仙火山の噴火等に代表される地震・火山災害により甚大な被害を被っている。このような地震・火山災害の軽減のためには、地震や噴火活動のモニタリングとともに、伏在断層や火山の内部構造の把握が重要となる。地質調査所は平成7年度の補正予算で有馬・高槻・六甲活断層地域において「高分解能空中磁気探査」を実施する機会を得た。当該

地域では弱磁性(磁化率 $< 10^{-3}$  SI)の六甲花崗岩類を基盤としてこれを非磁性の大坂層群(更新統)や沖積層が厚く覆っているため、磁気探査の適地ではないが、我が国初の都市部での高分解能空中磁気探査ということで大きな意義があった。探査地域の一部では特別な事情により日の出から早朝7時までの飛行が余儀なくされたため、探査飛行は24時間開港している関西新空港を基地として行われた(写真2)。地上地磁気日変化観測定点は最寄りの淡路島に置かれた。探査飛行は、飛行高度300m(対地高度)、測線間隔300mで行われた(写真3)。主測線方向は、通常主な地質構造の方向と直交する方向が望ましいが、今回は飛行の安全を確保するため採用できず、北東-南西方向(阪神・



写真2 有馬・高槻・六甲空中磁気探査に用いたセスナ404型機(中日本航空(株)所有)。午前7時までに探査飛行を終える必要があったため、クルーは早朝2時に起床し、4時には関西新空港のエプロンで機体および機材の調整を行った。



写真3 探査機から見た神戸市。調査は日の出前後の限られた時間内に行われた。下に見えるのはポートアイランド。仮設住宅が痛々しい。

神戸地域)および南北方向(京都地域)となった。探査結果(口絵8)は、主に都市の周辺部において地質・地下構造に対応すると考えられる磁気異常が観測されたが、都市部において予想以上に人工雑音が大いことが分かった(中塚ほか, 1996)。特に、電車の送電ループに対応した環状に配列した磁気異常群が特徴的であり、モデル計算によると環電流による磁気異常と良い一致をみせることが分かった(中塚ほか, 1997)。この調査から得られた都市部での高分解能空中磁気探査の指針として以下のものが上げられる。

(1) 飛行の安全を確保する意味から、大都市部中央での探査飛行は事実上難しい。

(2) 電車の漏洩電流に起因する人工雑音をできるだけ避けて調査する。

(3) 主な地質・地下構造の方向と直交する方向に探査測線を配置する。

(4) 磁気異常に影響を与える人工構造物等のデータベースを作成することにより磁気異常との対応が付けやすくなる。

(5) 人工雑音を除去するフィルター等を開発する必要がある。

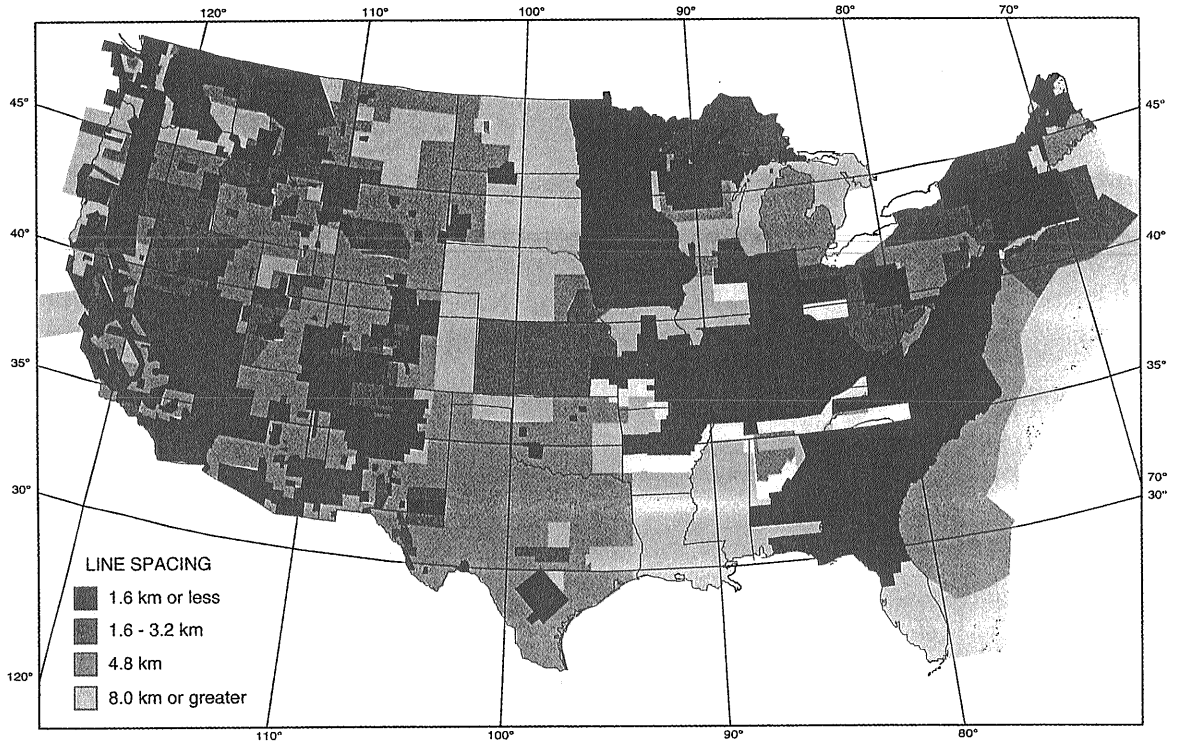
(4)および(5)については、米国では既に関連する研究が行われており、これについては4.1で触れる。

## 4. 海外における技術動向

### 4.1 アメリカ合衆国

米国では、第2次世界大戦中に潜水艦探知を目的として開発された磁力計を、戦後いち早く民生化し空中磁気探査への利用を図った。初期の段階では炭化水素資源の調査の目的で利用され(Hana, 1990)、また鉱物資源調査に大いに利用され、その調査範囲は米国本土をほぼカバーするに至り地磁気異常(以後磁気異常)データベース(DNAGデータ; Decade of North American Geology)も構築されている(Committee for the Magnetic Anomaly Map of North America, 1987)。しかしながら、測線間隔に代表される探査仕様は様々でありまた探査年度もまちまちなことから、データの利用に当たって重要な問題を含んでいることが明らかとなった(Grauch, 1993; 第5図)。すなわち、品質が異なるデータ(多くの場合は各磁気図に対応するグリッドデータ)を単に接続し図面上連続しているように編集していることが多いため、接続の境界付近で実際の値と異なることが、実測により確認されている(Grauch, 1993)。また、共通の高度への引き直しも行われておらず本来客観性のあるデータがその性質を失っており、磁気異常データを地下構造解析に利用する場合問題となる。このような状況を改善し将来北米大陸全体の新磁気異常データベースを構築するため、NRC(National Research Council)の助言のもとに米国地質調査所、大学および民間企業等の磁気探査専門家からなるU.S. Magnetic-Anomaly Data Task Group

## U.S. AEROMAGNETIC COVERAGE



第5図 米国における空中磁気探査の実施範囲 (U.S. Magnetic Anomaly Data Task Group, 1994). 様々な飛行高度で探査が行われていることが分かる。また、測線間隔が1.6km以下の地域 (黒で塗りつぶされた範囲) が広大な国土の割に多いことに注意。

が組織され提言を行っている。この提言は、米国のみではなく我が国にも当てはまるものと考えられるので以下に紹介する。

**提言1：**現在の米国における磁気異常データベースを各探査データを同一基準の精度で再処理・再編集する。

**提言2：**この再処理は、共通のグリッド間隔や作成面高度等のパラメータにより処理された探査データに基づいて米国に適した磁気異常グリッドを設定することにより達成される。また、民間企業にも協力を求めより多くのデータを集約する。

**提言3：**北米大陸全体の磁気異常データベースを改善するため近隣諸国と協力する。

**提言4：**既存および新規の探査データを編集するため高々度 (30 km) の磁気探査を測線間隔30 kmで行う。

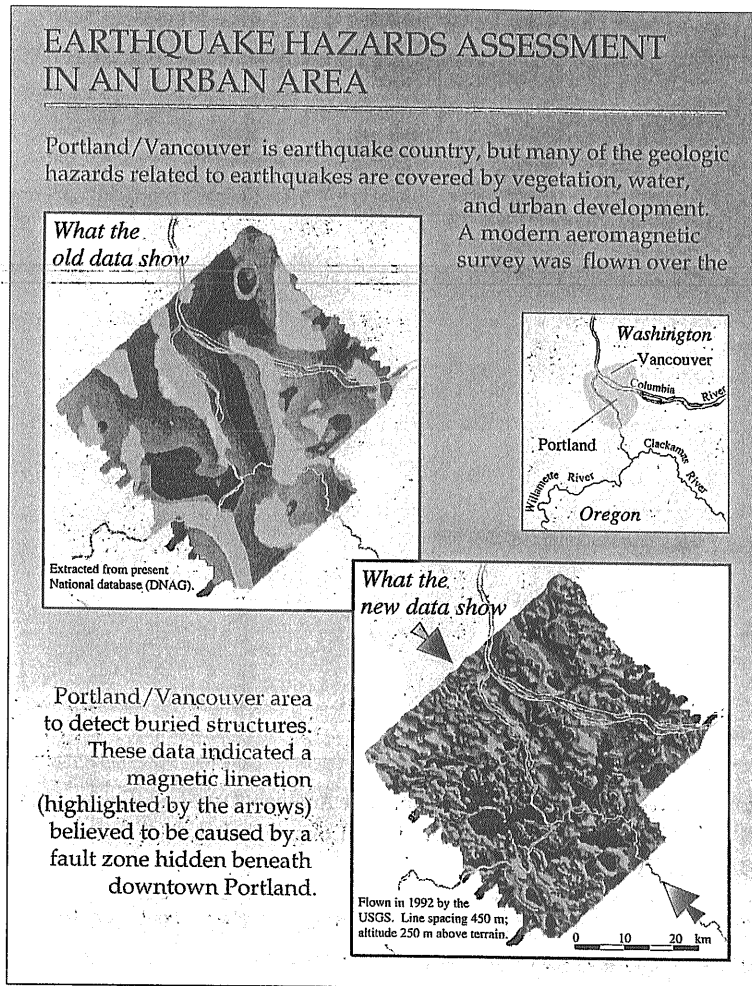
**提言5：**連邦政府は州政府、民間企業、大学の協力により既存の広域的な磁気異常データベースを更新するため、低高度の空中磁気探査計画を実施

する。経済的な観点から他の地球物理学的データ (地磁気ベクトル、磁気傾度、放射能および電磁データ) を同時測定する。連邦および州政府と民間企業からの出資によりNRCが投資効果の見積もりを行い、最適な探査仕様を決定する。

**提言6：**連邦および州政府と民間企業の援助のもとにNRCが諮問機関を設置する。

この諮問機関は

- (1) データおよび処理仕様を発表する。
- (2) 参加する民間企業は所有するデータを公開する。
- (3) 来るべき北米大陸の新磁気異常データベースの編集に際し、米国を代表する。
- (4) データの処理およびデータベースの配布を監督する。
- (5) 高々度広域空中磁気探査を計画し実施する。
- (6) 最適な探査基準に基づいた低高度磁気探査計画を支援する。
- (7) 低高度磁気探査計画を監督する。



第6図 米国における高分解能空中磁気探査の実例 (U.S. Magnetic Anomaly Data Task Group, 1994)。既存の概査に基づく広域磁気異常図 (左上) と高分解能空中磁気異常図 (右下)。白黒写真では分かりづらいが、高分解能空中磁気異常図 (右下) では北西-南東方向に明瞭な磁気異常のギャップが見られる。

提言6-5) に関しては、早速航空機による合成開口レーダ画像調査に併せて探査が開始されている (Hildenbrand et al., 1996)。

最近日本でも広域磁気異常図が編集されており (例：牧野ほか, 1992; GSJ and CCOP, 1995), ほとんどのものは米国の磁気異常データベースと同様の問題を抱えているが、利用者に周知されているとは思えず、危惧を感じている。我が国においても同様の対応が早急に求められている。

米国西海岸地方はプレートの収束域に面しているといった日本の地質構造と類似性があり、地震活動および火山噴火により甚大な被害を被ってい

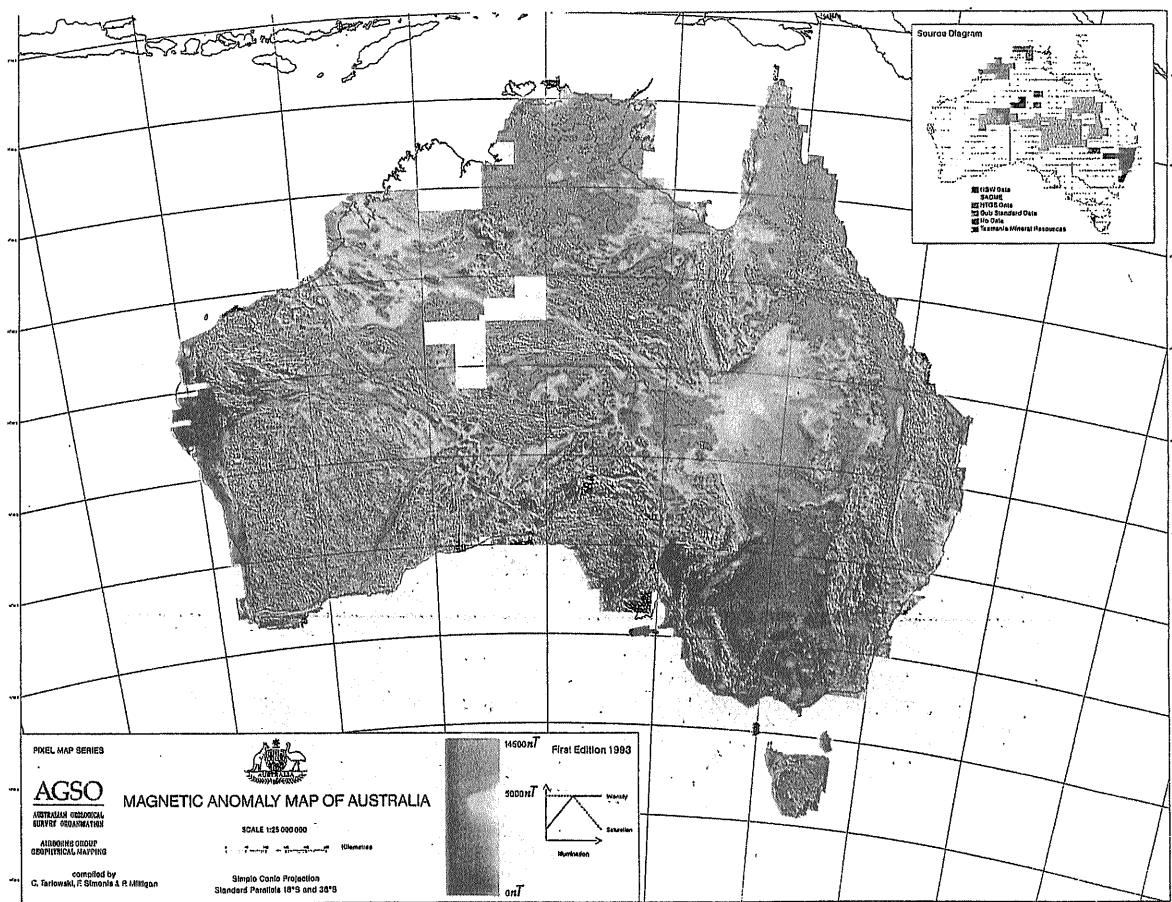
る。このような地域では地震・火山災害の軽減のために、伏在断層や火山の内部構造の調査を目的とした高分解能空中磁気探査が行われている。米国地質調査所は、ワシントン州ポートランド市の市街地で伏在断層の調査を目的とした高分解能空中磁気探査を実施し、伏在断層の発見に成功している (第6図)。また、火山災害評価のためワシントン州レイニヤ火山でヘリコプターを用いた空中磁気・電磁法探査が実施されている (Finn, 私信)。さらに、世界でも有数の地熱活動で知られるイエローストーン国立公園でも全域にわたる高分解能空中磁気探査 (飛行高度：300m, 測線間隔：400m) が計画されている (Finn, 私信)。

米国は燃料・鉱物資源にも恵まれているため、石油調査を目的とした市街地での高分解能空中磁気探査も実施されている。測定されたデータには様々な人工雑音が含まれるが、原因と考えられる構造物等のデータベースを作成し、雑音源による理論計算異常と観測異常との相互相関係数値によって信号を判別する雑音除去フィルターが開発されている (Wilson et al., 1997)。

米国においては、核廃棄物を廃棄貯蔵する候補地の選定、廃棄された場所の調査および産業廃棄物の漏出のモニタリング等の、いわゆる Environmental Geophysics (環境物理探査学) と呼ばれる分野が盛んになりつつある。特に地中に投棄された核廃棄物の多くはドラム缶等の金属製の容器に入れているため、高分解能空中磁気探査は非常に有効な調査手法である。

#### 4.2 オーストラリア

現在、おそらく世界で最も精力的に空中磁気探査を行っているのはオーストラリアであろう。オーストラリアは先進工業国の仲間入りを果たそうと脱鉱業・農業化を図ろうとしているが、鉱業が依然同国の重要な基幹産業であることに変わりはない。国土が広大な同国では金属および炭化水素鉱床を発見するために物理探査が普遍的に重要な役割を果たしているが、そのなかでも航空機を使用した空中磁気探査は最も頻繁に利用されている。同国では地表表層がレゴリス (Regolith) と呼ばれる風化帯 (厚さ50~数100m) によって覆われている地域が多く、最近では潜頭鉱床が探査の主要ターゲットになっている。通常鉱床探査に最も用いられる電気・電磁探査等は、レゴリスが低比抵抗であるため坑井を利用したボアホールEM法等除いてその適



第7図 オーストラリアの空中磁気異常図 (Australian Geological Survey Organization, 1993)。ほぼ陸域をカバーしているが、データの品質が異なる部分があることが図面からも明瞭に読み取れる。すなわち、測線間隔が粗い場合あるいは飛行高度が高い場合には、図面上磁気異常がなまった分布をみせる。

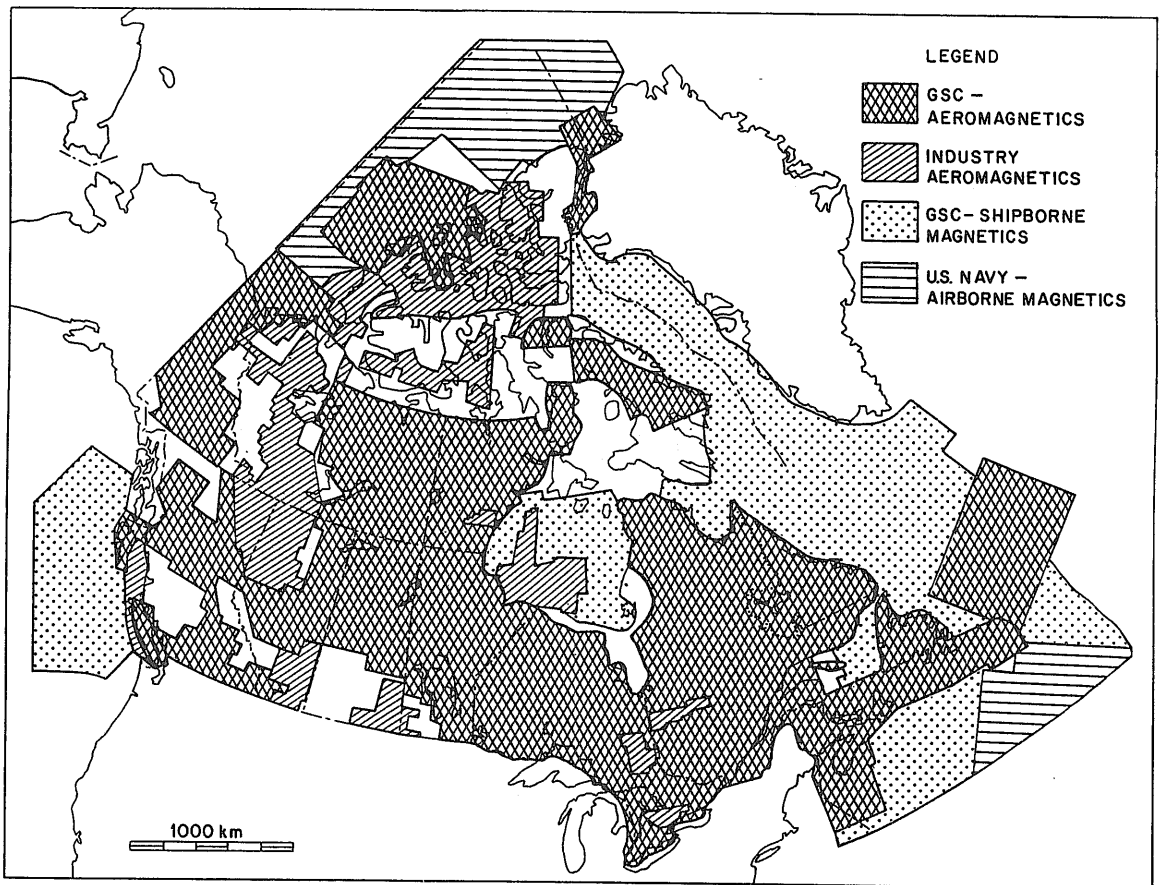


用が難しい。一方、空中磁気探査は同国が比較的  
地形が平坦であり、探査コストが相対的に安く短時  
間に広い範囲を調査できる特徴を有しているため  
打ってつけである。同国では、従来の広域的な鉱  
物資源ポテンシャル評価のための調査には、測線間  
隔：1,500mの概査が行われておりほぼ国土全体を  
カバーしている(Horsfall, 1995；第7図)。これに  
加え最近では、GPSによる高精度位置標定技術に  
より可能となった「高分解能空中磁気探査」による  
精査(測線間隔：200～400m)が行われており、政  
府だけではなく民間企業による探査も連邦および  
州政府の援助を受け積極的に行われている。これ  
らのデータは最終的には連邦政府に集約されデー  
タベースとして公開され有料で販売されている。

### 4.3 カナダ

カナダはオーストラリアと比肩する世界で最も空

中磁気探査が盛んなの国の一つである。カナダで  
は資源関連産業がGDPの10%、そして鉱石と鉱物  
製品が全輸出額の約20%を占めている。カナダ地  
質調査所(GSC: Geological Survey of Canada)  
は1841年に創立され1992年に創立150周年を迎  
えた同国での鉱物資源探査の中心機関であり、同  
所独自にあるいは大学・民間企業と連携をとって  
調査活動を行っている(Hood, 1990)。同所では25  
万分の1の空中磁気図で2005年までに全土をカバ  
ーする予定で調査を行っており、概査(測線間隔：  
800m、飛行高度：対地300m)および精査(測線間  
隔：300m、飛行高度：対地150m)の両データが磁  
気図の編集に利用されているが、最近の調査では  
精査の仕様による高分解能空中磁気探査が実施さ  
れている。編集されたデータはデータベース化さ  
れ、オーストラリアと同様にマップあるいはデータ  
そのものが販売されている(第8図)。



第8図 カナダにおける空中磁気探査の実施範囲 (Tesky et al., 1993). 1992年までの調査範囲。

### 5. 今後の空中磁気探査

本論では、空中磁気探査の最近の話題から「高分解能空中磁気探査」を中心として内外の話題を紹介してきた。最後に私達が現在計画中の研究を紹介したい。

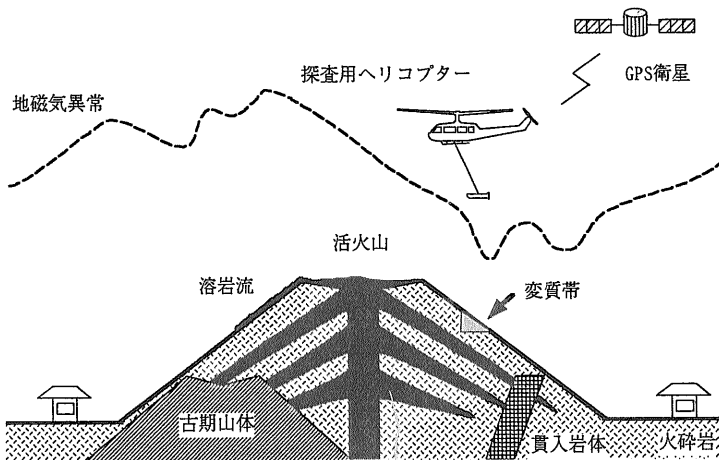
前述のように、我が国の地震・火山災害軽減のために、私達は空中磁気探査によって当該の地下構造調査に貢献したいと考えている。高分解能空中磁気探査は、伏在断層の調査において、地下構造の磁氣的な性質の変化から、伏在断層(特に横ずれ断層)の位置、規模等を検出するのに有効であると考えられる。地質調査所では平成9-10年に工業技術院特別研究「活断層等による地震発生ポテンシャル評価の研究-1. 活断層による地震発生ポテンシャル評価の研究」の中で「3. 活断層の地球物理学的研究」と題して、近畿三角地帯の東縁部において高分解能空中磁気探査を実施する予定である。また重力探査を併せて実施し、既存の反射法地震探査データの解釈も加えて当該地域の地下構造評価を行う予定である。

一方、狭小な国土の我が国には地方都市近傍あるいはその影響が及ぶ範囲内に活火山が位置していることが多い。雲仙火山の島原市は言うに及ばず、富士火山の南には富士宮市等の製紙産業が盛んな都市があり、岩手火山のごく近傍には岩手県の県庁所在地である盛岡市がある。先の兵庫県南部地震によって地方自治体の中には地震災害軽減のための地下構造調査を積極的に実施している所

が多いと聞かすが、関係機関には火山災害の評価も併せて行って頂きたいと思っている。私達も火山災害軽減に向けた火山の内部構造調査のための高分解能空中磁気探査を将来実施したいと考えている(第9図)。

環太平洋地域では、プレート運動に起因する地震・火山災害が居住する住民の生活を脅かしている。しかし、これら災害の軽減のための対策が必要であるにもかかわらず、関連諸国の国情により必ずしも十分な対策が取られていない場合が多い。その中で米国および日本は従来より当該の研究を実施してきたが、1996年に「日米地震被害軽減パートナーシップ」が締結され、今後は2国間の協力関係をさらに強化し当該の研究が精力的に実施される予定である。私達も地震・火山災害軽減のために高分解能空中磁気探査を行っている米国地質調査所等の機関と連携をとって共同研究を実施し、調査技術及びデータ解析技術の向上を図り、当該の地下構造調査に貢献したいと考えている。

海外での技術動向で紹介したように資源探査の分野でも高分解能空中磁気探査が積極的に実施されているが、国内においても金属鉱業事業団によりヘリコプターを使用した探査システムが技術導入され実際に調査が行われると聞く(通商産業省資源エネルギー庁、1997)。地質調査所が試みたヘリコプターによる高分解能空中磁気探査システム(口絵2及び3)はバード方式のため、事実上住宅街上空の飛行は難しい。航空機で行われているようなスティンガー方式のヘリボーンシステムは、航空機



第9図

火山地域における高分解能空中磁気探査の概念図。火山地域では、飛行高度の調整が比較的容易なヘリコプターが探査機として用いられることが多い。火山地域における高分解能空中磁気探査により、火山の内部構造(埋没した古期山体、貫入岩体等)や溶岩流(火砕物に被覆されるものも含む)・地熱変質帯等の分布を明らかにし、火山災害軽減のための情報を提供することが期待される。

に比べ飛行高度の調整が容易であるため、日本のような山間部が多い地域には適している。

## 6. おわりに

本論では、「高分解能空中磁気探査」に関する内外の話題を紹介してきた。諸外国の実状をみると、目的は異なるものの「高分解能空中磁気探査」が広く行われていることが分かる。我が国においては、地震・火山災害等の自然災害軽減のための地下構造調査あるいは土木建築関係において「高分解能空中磁気探査」を実施する価値があると考えている。しかしながら、より広範囲の方々を利用していただくためには残された問題もあるので、今後はその解決を図りたいと考えている。

なお、小論に関するご意見・ご質問がございましたら、下記までご連絡下さい。

〒305 茨城県つくば市東1-1-3 地質調査所  
地殻物理部 大熊茂雄 (E-mail:okuma@gsj.go.jp)

謝辞：地質調査所地質部の中野 俊氏には原稿を読んで間違いを指摘して頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

## 文 献

- Australian Geological Survey Organization (1993) : Magnetic Anomaly Map of Australia, 1:25,000,000, Pixel Map Series.
- Committee for the Magnetic Anomaly Map of North America (1987) : Magnetic Anomaly Map of North America: Geological Society of America Continent-Scale Map-003, scale 1:5,000,000.
- Geological Survey of Japan (GSJ) and Committee for Co-ordination of Joint Prospection for Mineral Resources in Asian Offshore Areas (CCOP) (1994) : Magnetic Anomaly Map of East Asia, 1:4,000,000, Geol. Surv. Japan.
- Grauch, V.J.S. (1993) : Limitations on digital filtering of the DNAG magnetic data set for the conterminous U.S., *Geophysics*, 58, 1281-1296.
- Hana W. F. (1990) : Some Historical Notes on Early Magnetic Surveying in the U.S. Geological Survey, *U.S.G.S. Bulletin*, 1924, 63-73.
- Hildenbrand T.G., Blakely R.J., Hinze W.J., Keller G.R., Langel R.A., Nabighian M. and Roset W. (1996) : Aeromagnetic Survey Over U.S. to Advance Geomagnetic Research, *EOS*, 77, 265 and 268.
- Hood, P.J. (1990) : Aeromagnetic Survey Program of Canada, Mineral Applications, and Vertical Gradiometry, *Geologic Applications of Modern Aeromagnetic Surveys*, U.S.G.S. Bulletin, 1924, 7-23.
- Horsfall, K.R. (1995) : Airborne Geophysical Data Acquisition, 平成6年度鉱物資源探査技術開発調査報告書—新探査・生産技術の導入開発, 通商産業省資源エネルギー庁, 189-213.
- 牧野雅彦・伊勢崎修弘・山崎俊嗣・石原丈実・大久保泰邦・中塚正 (1992) : 日本及び隣接地域地磁気異常図, 1:5,000,000 Sheet 14, 日本地質アトラス (第2版), 地質調査所.
- 牧野雅彦・中塚 正・大熊茂雄 (1993) : 浅間火山における磁気異常, 第94回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会予稿集.
- 森尻理恵・大熊茂雄・牧野雅彦・中塚 正 (1992) : 秋田県由利原地域での高密度空中磁気探査—MRSによる位置標定の評価—, *物理探査*, 45, 96-104.
- Nakatsuka T. (1994) : Aeromagnetic anomalies over the area of Unzendake volcano, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 529-540.
- Nakatsuka T. (1995) : Minimum Norm Inversion of Magnetic Anomalies with Application to Aeromagnetic Data in the Tanna Area, Central Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, 295-311.
- 中塚 正・大熊茂雄・森尻理恵・牧野雅彦 (1996) : 有馬・高槻・六甲活断層地域における高密度空中磁気探査, *物理探査学会第95回学術講演会論文集*, 110-114.
- 中塚 正・牧野雅彦・森尻理恵・大熊茂雄 (1997) : 神戸—京都地区の空中磁気異常に見られる人工ソースの影響, *地球惑星科学関連学会1997年合同大会講演予稿集*.
- Okuma, S., Makino M. and Nakatsuka T. (1994) : Magnetization Intensity Mapping in and around Izu-Oshima Volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 541-556.
- Okuma, S., Morijiri R., Makino M. and Nakatsuka T. (1995) : Evaluation of a High-resolution Aeromagnetic Survey in a Volcanic Region - The Case of Yurihara Area, Northeast Japan, *Butsuri-Tansa (Geophy. Explor.)*, 48, 316-332.
- 大沢 穰・片平忠実・中野 俊・土谷信之・粟田泰夫 (1988) : 矢島地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 87p.
- Teskey, D.J., Morley L.W. Gibb, R.A., Sawatzky, P., Bower M. and Ready E.E. (1993) : The aeromagnetic survey program of the Geological Survey of Canada: contribution to regional geological mapping and mineral exploration, *Can. J. Earth. Sci.*, 30, 243-260.
- U.S. Magnetic Anomaly Data Task Group (1994) : Rational and Operational Plan to Upgrade the U.S. Magnetic Anomaly Data Base, 24p.
- Wilson, C.R., Tsoulias G. and Bartelmam, M. (1997) : A high precision aeromagnetic survey near the Glen Hummel Field in Texas; Identification of cultural and sedimentary anomaly sources, *The Leading Edge*, 16, 37-42.

OKUMA Shigeo, MAKINO Masahiko, MORIJIRI Rie and NAKATSUKA Tadashi (1997) : The state of the art of aeromagnetic survey—High-resolution aeromagnetic survey.

<受付：1997年2月17日>