

# 地質調査所における空中磁気探査の歴史と将来

中塚 正<sup>1)</sup>

地質調査所が空中磁気探査法の研究に本格的に着手したのは、1964(昭和39)年である。以来約四半世紀、探査技術は大きく進展をとげた。この間、空中磁気探査は一貫して工業技術院特別研究のテーマとしてとり上げられてきた。そして新年度(1990年度)からは、新たな研究テーマ「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」がスタートすることとなった。

本稿では、これまでの磁気探査の歴史をふりかえり、地質調査所の果たした役割を概観するとともに、これからの空中磁気探査に期待される技術的視点を考えてみたい。

## 1. 日本での磁気探査の前史／地上磁気測量

話はやや「いにしえ」の頃から始めよう。そもそも日本で、いつ最初に地磁気測定が行われたかは不明というほかはないが、加藤(1981)によれば1600年頃すでに伊達政宗が仙台城築城にあたってコンパスを用いて方位を決定したと推定される。これはまだ磁気測量と呼ぶにはふさわしくないが、磁石の指北性が認識されていたことを示している。また、磁北が真北と異なること、すなわち偏角の存在は西欧ではすでに知られていたが、日本人による最初の偏角の測定は、1694年の谷秦山によるとされている(篠崎, 1938; Imamiti, 1956)。

磁場の空間分布の調査(磁気測量)については、地質調査所の前身の農商務省勸農局地質課に所属したお雇い外人シュットが、1880(明治13)年に関東山地から箱根にかけての調査を行ったのが最初と考えられる(佐藤, 1985)。また、シュットの帰国後の1882-83年(明治15-16年)には、農商務省地質調査所(1882年創立)の関野修蔵・神足勝記が東京市内4点を含め全国185点の磁気測量を実施している。

やや話の道をそれるが、地磁気の連続観測としては、1882年に始まる第1回極年(IPY)の国際共同観測が契

機となって、①創立早々の地質調査所(1882.8-1883.8)、②海軍水路局(1882.11-1887.?)、③内務省地理局(1883.3~)で独立に行われた。このうち③の地理局での観測が、中央气象台を経て、現在の地磁気観測所(柿岡)に引きつがれている。この間の歴史的な話は、IPY百周年記念であり、地質調査所創立百周年でもある1982年頃に書かれた地質調査所百年史編集委員会(1982)、地磁気観測所(1983)、杉浦(1983)、佐藤(1983, 1985)などの文献を読むと面白い。

その後の磁気測量では、1887(明治20)年に東京帝国大学の外人教師ノット博士の指導で、田中館愛橋らが全国磁気測量を、1891-92年(明治24-25年)には田中館愛橋・長岡半太郎が濃尾地震による地磁気変化の有無を調べる磁気測量を行い、さらに1893-96年(明治26-29年)にやはり田中館愛橋が全国磁気測量を実施している。

これより後の磁気測量は、海軍水路部(現在の海上保安庁水路部)に引きつがれ、1912-13年(明治45-大正2年)の測量を第1回として、10年ごとの繰返し測量が行われるに至った(須田, 1959)。さらに戦後は、5年ごとの測量が行われるようになっていく。

これらの磁気測量は、地磁気の空間分布の測定ではあるが、今日ではよく知られているように地表での磁場分布は非常に複雑であり、地下構造の調査を目的とするにはあまりにも測点が粗い。須田(1959)によれば、いずれも日本全国で概ね50~300点の測量である。

戦後になって国土地理院(GSI)では、日本全国の磁気測量を開始した。この磁気測量は、1等・2等に大別される。1等磁気測量は1948(昭和23)年から開始されており、大局的な地磁気分布とその永年変化を明らかにするため、全国に配置された100点程度の1等磁気点を精密に測量する。2等磁気測量では、地域的ないし局所的な磁場の分布と変化を明らかにするため、全国約800点の2等磁気点の測定を10年に1回程度行っている(GSI, 1961)。

1) 地質調査所 地殻物理部

測点密度の問題でいえば、2等磁気測量でも平均20～30km毎に1点の割合であり、地下構造を反映した局所磁気異常を正確に捉えるには程遠いと言わざるを得ない。水路部および国土地理院による磁気測量は、今日もなお続けられているが、これらは測地学的な位置づけを持つものであり、従って、3成分の絶対値を求める測定と同一地点の繰り返し測量による地磁気永年変化の検出に意義があると言えよう。

一方、資源探査の観点からの磁気測定は大正年間にはじまる。1919(大正8)年にターレンティベルグの磁力計が京都大学に輸入され、磁鉄鉱床の探鉱に試験されたのが始まりで、その後、各大学・地質調査所・鉱業会社等で研究・実地試験が行われた(萩原, 1951)。ターレンティベルグの磁力計は3成分測定用のものであったが、その後シュミット磁力計が出現してからは、探鉱にはシュミット型鉛直磁力計が広く用いられ、磁気探鉱の実用化がはかれるようになった。いずれの磁力計も、磁針の振れを利用したものであったので、移動しながらの測定は不可能である。

フラックスゲート磁力計の原理は古くから知られていたが、測定に必要な電子技術が野外測定に利用できるほどは発達していなかったために、探鉱に利用されることがあまりなかったものと思われる。

今日の探査技術の発展に向けては、電子技術の進歩とプロトン磁力計の発明を待たねばならなかった。

## 2. 日本における初期の空中磁気測定

1958(昭和33)年、日本で最初の航空機による磁場分布の測定が、東北大学の加藤ら(1958)のグループによって行われた。それはフラックスゲート磁力計と空気ジャイロを用いた鉛直成分の測定であったが、1961(昭和36)年には同グループがやはりフラックスゲート磁力計を用いた全磁力測定を行っている。

本質的に一軸方向成分の磁場測定器であるフラックスゲート磁力計を、動揺の避けられない航空機に搭載して有為な結果を得るための努力は、相当なものであったと推察される。しかし、ちょうどその頃より、プロトン磁力計が実用化されはじめ、航空機や船舶のような移動体での磁場測定は、プロトン磁力計が主流を占めるようになる。

プロトン磁力計では、原理的に、機体の多少の動揺にかかわらず全磁力を精度よく測定できるため、移動体での測定に適するが、通常は全磁力のみの測定にならざるを得ない。測地学的な目的のためには3成分測定が不可欠であり、1962-64年の世界磁気測量(WMS)に向けて

は、前出の加藤の指導の下に海上保安庁水路部でフラックスゲート磁力計による3成分測定のシステムが開発されている。しかし、動揺に加えて方位の固定もできない機体上での3成分測定は困難が多く、現実的に、プロトン磁力計の全磁力測定に比して1桁以上精度が劣ることは否めない。

この時期からは磁気測量の事業が国土地理院(陸域)と水路部(海域)で分担されることとなり、国土地理院でもプロトン磁力計とヘルムホルツコイルを用いた航空用3成分逐次測定装置が開発され、WMSに使用された(WMS Committee, 1965)が、精度の問題からその後の航空測量では、全磁力測定のみが利用されている。

これらと平行して地質調査所では、1962-63年(昭和37-38年)にプロトン磁力計による空中磁気探査の試験測定が行われ、1964(昭和39)年からは構造的天然ガスの調査研究の目的で本格的探査が開始された。さらにこの頃、水路部でも航空用プロトン磁力計が導入され、火山地域を中心として全磁力測定が行われるようになった(Utashiro *et al.*, 1972)。

このプロトン磁力計の実用化の時期に、奇しくもIPY時代と同様、国の3機関で開発が進められたことは面白い。

この時期の計測器の信頼度は、今日と比べるとはるかに劣っており、作成された磁気図(Magnetic Chart)の中には、必ずしも納得の行かない変化が表現されていたりもする。しかし、地質調査所の陶山(1965)は、すでにこの時期に、地下構造探査の観点から高感度で測定間隔の十分短い測定装置の使用の必要性を述べるとともに、交差測線の効用についても言及している。これは移動測定に由来する種々の誤差要因に対する吟味の必要性が認識されていたことを意味しており、空中磁気探査が探査技術として地質調査所でその後大きく発展する基礎となった。

## 3. 地質調査所の空中磁気探査

地質調査所では、1964(昭和39)年に空中磁気探査の研究を本格化して以後、電子技術の進歩を背景として探査および解析の技術開発を行うとともに、1969(昭和44)年からは日本周辺大陸棚の石油・天然ガス資源の賦存評価のための調査を実施してきた。この流れを、工業技術院特別研究のテーマ名とともに示したのが第1図である。

1964-66年(昭和39-41年)には、空中磁気測定の技術確立の研究が行われ、陸域探査の基礎が固められた。引続き1970(昭和45)年頃までに、海域調査に必要な航法技

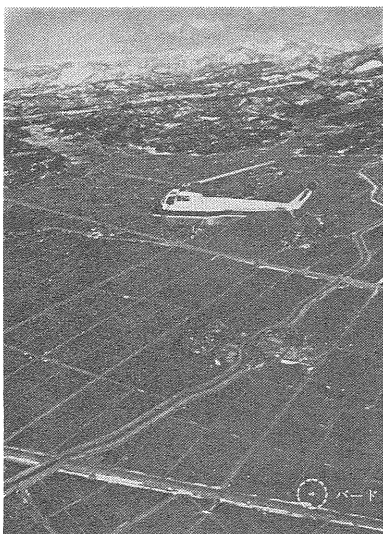


写真 1 シコルスキー S-55.

日本で最初の本的格空中磁気探査に用いられた。パード（センサー部）を曳航して時速 100km 弱で飛行した。（陶山（1965）より）

術・位置決定技術の開発・実証の研究が進められ、海域探査の基礎固めが行われた。この技術的な裏付けのもとに、1969（昭和44）年から大陸棚の基礎調査としての空中磁気探査が開始される。さらに、大陸棚の調査で実証された技術は、金属鉱業事業団（MMAJ）（1973（昭和48）年6月までは金属鉱物探鉱促進事業団）が実施する広域調査の項目にもとり上げられている。この頃の空中磁気探査の計測と解析の方法に関しては、陶山（1966, 1968）に詳しい。

1970年代に入って、その前半には、デジタル電子技術の進展をうけて、計測・データ収録からデータ処理・解析に至るシステムのデジタル化が促進された。また1970年代後半は、コンピュータ処理の普及を背景に、探査から解析に至る処理の体系化が進んだ。この間の計測・データ収録にかかるハードウェアと一貫データ処理のソフトウェアの開発状況については、すでに述べたことがある（中塚, 1984 a, 1984 b, 1989）ので、深入りしないこととするが、これらの開発によって、空中磁気探査の作業能率と経済性には大きな進歩がもたらされ、測定信頼性を含めた探査精度も着実に向上したと言えよう。

こうした技術開発を基礎に、大陸棚の空中磁気探査は精力的に進められ、1978（昭和53）年までに、北海道から九州に至る地域の沿岸域の調査は、民間の調査が先行した区域を除いて完了することとなった。

この10年にわたる技術開発と広域的な調査の成果は、その後の磁気探査に大きなインパクトをもっていた。す

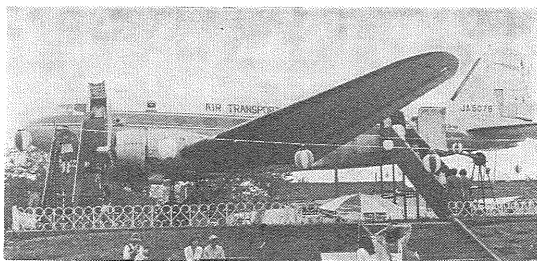


写真 2 ダグラス DC-3 型探査機.

初期の大陸棚の調査に使用された。往時の関係者にとっては思い出の多いカリマンタンの調査にも動員された。1988年春頃まで、栃木県の小山遊園地に展示されていたが、その後、解体廃棄されたらしい。（1981年撮影）

なわち、先にあげた MMAJ の広域調査にとどまらず、1980-83年（昭和55-58年）の新エネルギー総合開発機構（NEDO）（1988（昭和53）年10月に、現在の新エネルギー・産業技術総合開発機構に改組）による日本列島をおおうキュリー点法調査が計画される基盤を与えた。また、密な測線間隔による広域的な磁気探査の有効性の認識が、水路部で行われている“海の基本図”計画の立案に対する一つの大きな要因になっていたと思われる。

さらに地質調査所でも、地質踏査の手におえない遠隔海域について、地質状況の一端を明らかにするための空中磁気探査の研究が、さらに約10年にわたって続けられた。

この約25年の地質調査所の空中磁気探査において、探査に使用された航空機の機種は5代を数える。一番最初の本格調査（1964年）では、その前の試験測定を引きついでヘリコプターが用いられた。機種はシコルスキー S-55（写真1）で、速度は時速100km弱であった。翌1965（昭和40）年からは固定翼機に移行しており、陸域探査の1966（昭和41）年までは小型のピラタス PC-6型機が用いられた。しかし、海域探査のためには位置測定装置の拡充強化が必要であり、1967（昭和42）年からは、中型のダグラス DC-3型機（写真2）が採用された。この DC-3 機では、就役早々に東カリマンタン沖の受託調査（石油開発公団より）が行われたことも特筆される。

1970（昭和45）年からは、位置測定装置類を含む計測・データ収録のデジタル化の進行によって膨張した搭載機器の容量のため、日本航空機製造 YS-11 型機（写真3）が採用された。探査時の速度は時速 300~400 km 程度である。この YS-11 機でも、最初の調査として、海外技術協力によるフィリピンでの空中磁気探査が行われた。YS-11型探査機は、その後9年間、日本の空を駆け巡ることとなる。なお、1972（昭和47）年からは、空中磁力計の更新と相まって、センサーを曳航する従来のバ



写真 3 YS-11型探査機。

1970 (昭和45)年から1978 (昭和53)年まで9年間にわたって、日本各地の探査に活躍した。地質調査所の空中磁気探査だけでも、測線延長約21万kmの飛行を行った。1972 (昭和47)年から機体尾部のスティンガーが設置され、探査はスティンガー方式で実施されるようになった。スティンガー用の機体磁気補償装置の調整作業時には、バードによる測定が併用された。



写真 4 磁気探査用スティンガーを装備したセスナ 404 型探査機。

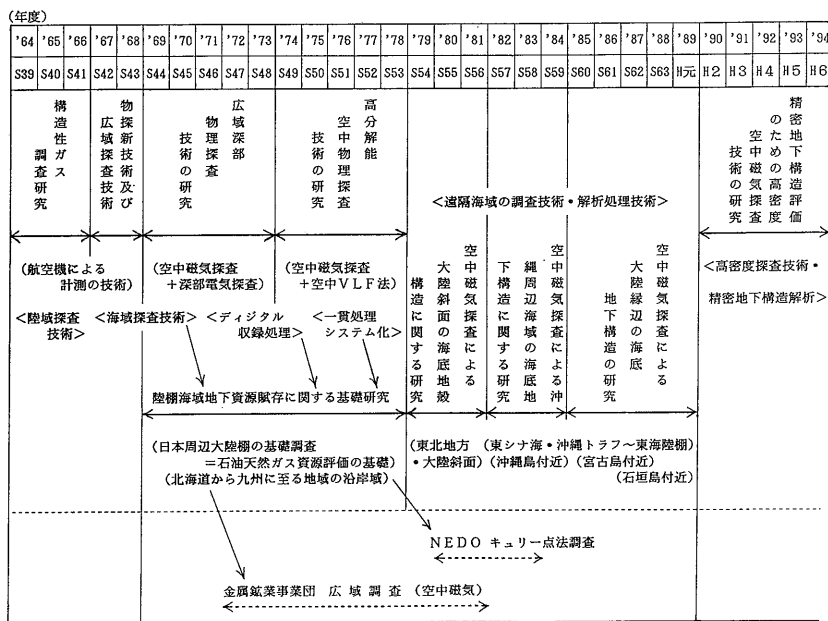
1979 (昭和54)年から空中磁気探査に就役し、現在に至る。スティンガーに対する機体磁気補償装置のほか、各種の調査飛行のために、OMEGA・LORAN-Cの受信機をはじめ、ドップラーレーダ・マイクロ波測距装置・GPS・対地映像ビデオカメラなど多種の測位システムが搭載できるようになっている。(中日本航空機提供)

ード方式を改め、機体尾部にセンサーを固定するスティンガー方式がとられている。

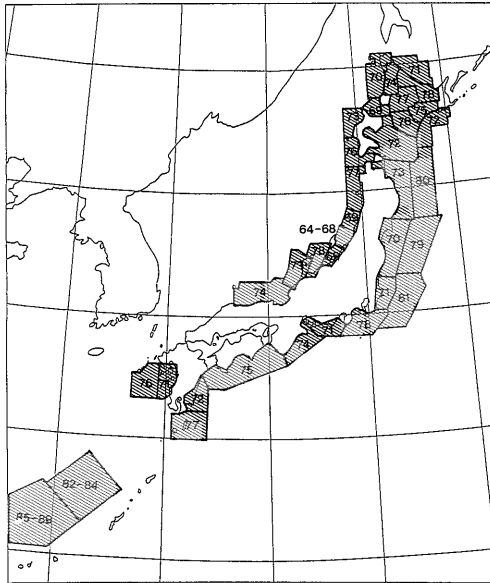
その後、1979 (昭和54)年からの遠隔海域の調査に向けて、探査機は小型のセスナ 404 型 (写真4) に交替する。その理由は、YS-11型機が製造中止となり第一線から退く状況と遠隔海域調査のための航続時間の確保のためでもあったが、計測装置類の小型軽量省電力化が大きく進み、小型機で十分調査できるようになったことが大きい。現在もこの機種が探査に活躍しているが、機器を搭載した状態での乗員は、パイロット・ナビゲータ・オペレータの3名で、予備席として補助オペレータ用のものが一つある。

昨年までに実施された探査の概略の区域を第2図に示す。冒頭に述べたように、ここで地質調査所の空中磁気探査は、一つの節目を迎えた。

探査済区域のカバー状況からみると、南西諸島とその南東側や伊豆-小笠原諸島の海域が残されているし、太平洋・中部日本海の広大な海域もある。しかし、これら海域の調査を行うとすれば、相当な期間と膨大な費用が必要となるし、それだけの社会的要請も特に大きいとは言えない。また水路部では、船によるかなり精密な調査が“海の基本図”計画の下に、精力的に進められている。磁気探査の観点からは、十分とまでは言わぬまでも、基本的な磁気異常分布の把握が行われている。海域につい



第1図 地質調査所における空中磁気探査に関する研究実施状況 (工業技術院特別研究)。



第2図 地質調査所による空中磁気探査実施区域図。  
 図中の数字は、探査年度（西暦）を示す。

例えば、今後は、船の調査等によって焦点の絞られた対象区域を、さらに精密に計測するのが空中磁気探査の役割となる。

#### 4. 新しい探査技術をめざして

以上に述べてきた日本における磁気探査の歴史を概観すると、資源を含めた地下構造の探査の観点での調査には、3つの世代があった。探査の視点のうすい明治時代を除いて、大正から昭和初期にかけての直接探鉱の時代を第1世代とする。この頃は、磁針の振れを利用する磁力計で磁鉄鉱鉱床の調査が行われ、磁気探査の探査手法としての有効性の実証の時期であった。

その後昭和30年代までの第2世代は、いわゆる地上磁気測定の時代であり、地域的なし局所的な磁気異常分布が議論されるようになるが、系統的な調査の測点間隔は数10kmと粗く、学問的な興味の対象ではあっても、結局、磁場分布の大局傾向を捉えるのみで、地下構造に関する特に有用な情報にはなり得なかった。

地質調査所による空中磁気探査技術の開発が進む昭和40年代以降が、第3世代と位置づけられる。この第3世代では、数kmの間隔で連続的な測線調査が行われる。測点の面密度で比較すると、第2世代の1,000倍以上となる。この差は単なる量的な差にとどまらず、質的な変革をもたらしたと言えよう。すなわち、磁気探査技術が

直接探鉱にとどまらず、地下構造解明の有力な一手段として認識されるようになった。

空中磁気探査は、航空機の迅速性を生かした広域的な調査が実施できること、また特に地質踏査の困難な海域の調査に能力を発揮することによって、注目された。しかし一方、磁気探査は岩石の磁性というわずかな一側面のみ頼る調査法であり、苦手とする探査分野も多くあるのに加えて、地下構造解析にあたって解の唯一性が本質的にないという弱点も抱えている。

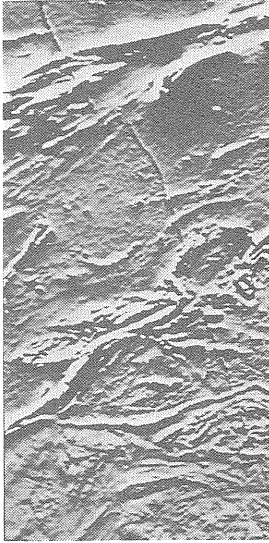
この弱点を克服するためには、他の物理探査手法との併用も含めて、地質の情報との総合化の視点が要求されるのは当然である。さらに、地質情報との総合化の中では、磁気探査データの利用として今までは見過ごされてきた有用な解析の考え方が発展することがあるかも知れない。例えば、NEDOによるキュリー一点法調査は、斬新かつ大胆な解析法の適用の実例であろう。地質情報との総合化は、常に古くて新しい問題である。

現状の空中磁気探査を省みると、探査の測線間隔は、“地質屋”の地質踏査の実態と比べて、まだまだ粗いと言わねばならない。それは、海域の広域的な調査が主流であったためでもあろう。しかし、これからの探査技術を展望するには、この測定の密度をさらに飛躍的に高める問題を避けるわけには行かない。

すでに見たように、探査データの量的な飛躍は、その有効性の質に転化できる。このことは、磁気探査に限らず、反射法地震探査でさらに顕著なのは周知の通りである。

新年度から、新しい特別研究「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」がスタートする。このテーマの中心課題は、まさに高密度探査とそれを有効ならしめる各種計測の技術を開発することであり、またその有効性を各種の地質状況において実証することにある。具体的には、従来の探査に比して1桁小さい100mオーダーの測線間隔での探査技術を確立することをめざしている。磁気探査の第2世代から第3世代への飛躍に示された探査の有効性の質の飛躍を、さらに進めて、第4世代の探査技術のさきがけとなり得ることをめざしたい。

具体的な技術的課題としては、精密な位置計測および航空機誘導技術、検出対象に見合った低高度探査飛行、高密度測定のための傾度測定技術導入の検討、また、それにふさわしい解析技術・手法の開発、さらに将来的には探査飛行の無人・完全自動化などがある。しかし、重要なのは、個々の技術の進展ではなく、それらの総合された「探査結果から何がどれだけ精密にどこまで確実にわかり、何に対して有効か」を示すことであり、その実



第3図 カナダにおける高密度空中磁気探査の結果の表示例。  
(AERODAT 社パンフレットより)

証的解明であろう。

高密度探査の視点は、北米や豪州でもすでに芽生えており、商業ベースでの探査例もあると聞く。第3図に示したのは、カナダでの AERODAT 社による調査結果の一例である。結果の表示では、カラフルな印象深いものが数多くあるにもかかわらず、紙面の都合で提示できないが、探査データの処理結果が、リモートセンシングデータの表示と同じ感覚で表現されている。

日本は、カナダとは、地形・地質状況を大きく異にしており、独自の技術的な視点をも持つ必要もあるであろう。高密度測定のために先の技術的課題を検討するためにも、この研究を推進したい。

その研究に用意された予算は、必ずしも十分とは言えないが、地質調査所の空中磁気探査の大きな蓄積の下にこそ、大きな発展ももたらされよう。高密度探査技術によって、空中磁気データから議論される地質構造が、地質踏査で観察される岩体・岩層レベルになり、推測に頼らざるを得ない地中での分布を、探査データからよりの確に描くことができるようになるであろう。そのためには、磁気異常のもととなる岩石の磁性についての検討も必要である(大熊・金谷(1990), 本号)。従来の広域的空中磁気探査では、磁性岩体の形状と磁化ベクトルを分離して議論するのはやや困難があったが、高密度探査においてこそ岩石磁性測定の意義も深まるものと思われる。いずれにしても、高密度空中磁気探査技術が、岩石磁性の研究をも仲立ちとしつつ、地質データとのより有機的なつながりの下に発展することを願っている。

## 引用文献

- 地磁気観測所(1983)地磁気観測百年史. 202p., 地磁気観測所.  
地質調査所百年史編集委員会(1982)地質調査所百年史. 162 p.,  
地質調査所創立100周年記念協賛会.  
Geographical Survey Institute (1961) Magnetic Survey of Japan 1951-1957. *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **7**, 1-11.  
萩原尊禮(1951)第4篇 磁気探査法. 物理探査法, 199-252,  
朝倉書店(復刻版, 1974, 現代工学社).  
Imamiti, S. (1956) Secular Variation of the Magnetic Declination. *Memoirs Kakioka Mag. Obs.*, **7**, No. 2, 49-55.  
加藤愛雄(1981)わが国の磁気探査の発展の歴史. 物理探査,  
**34**, 182-193.  
——・松尾正之・桜井彰・川村文三郎・松浦邦朗(1958)航空磁気測量について(序報). 水路要報, No. 57, 15-18.  
中塚 正(1984 a) 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, **35**, 341-365.  
——(1984 b) 地質調査所の空中磁気探査システムの現況について. 物理探査, **37**, 268-278.  
——(1989) 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, **40**, 99-111.  
大熊茂雄・金谷 弘(1990) 岩石磁気と磁気探査. 地質ニュース, 本号, 20-26.  
佐藤博之(1983) 先人を偲ぶ(2). 地質ニュース, No. 347, 28-44.  
——(1985) 地質調査所初期の地磁気観測 百年史の一こま(1). 地質ニュース, No. 371, 6-15.  
篠崎長之(1938) 地磁気永年変化の日本に於ける観測に就て. 科学, **8**, 258.  
須田皖次(1959) 水路部における全国地磁気測量について. 水路要報, No. 60, 1-6.  
杉浦邦朗(1983) 国際地球観測の経緯と水路部の活動. 水路, No. 44, 3-9, 日本水路協会.  
陶山淳治(1965) 空中磁気探査. 地質ニュース, No. 133. 34-39.  
——(1966) 堆積盆地に対する空中磁気探査について. 物理探査, **19**, 206-216.  
——(1968) 空中磁気探査. 最近における物理探査の進歩, 127-140, 物理探査技術協会.  
Utashiro, S., Takigawa, U., Oshima, S., and Kondo, T., (1972) Aeromagnetic and Marine Magnetic Survey around Japan. in *Researches in Hydrography and Oceanography* (水路研究論文集), 75-111, 日本水路協会.  
WMS Committee, Geodetic Council of Japan (1966) *Report on Aeromagnetic Survey in Japan*. 242p., World Data Center C2 for Geomagnetism.

NAKATSUKA Tadashi: Aeromagnetic survey in GSJ, its history and perspective.

<受付: 1990年1月16日>