

機首に Radio Phase と E-phase のセンサを取付けた STOL機のNorman Islander 機尾は 磁力計のステインガ

Ⅲ. 各 論

Ⅲ-1 V L F 法

最近における空中電磁法（以下 AEM）の進歩—各論ということになれば やはり VLF 法から始めるのが当を得ているであろう。遠方の送信空中線から放射された高周波の電磁波を金属鉱床探査に利用しようとする着想は すでに1900年代初頭には二 三の先人が抱いていたが 米国がラジオ放送を開始した1920年からわずか9年後には この実地の応用が盛んに試みられたというから驚かされる。その後も断続的ながら世界各地で研究が続けられ とくにソ連 北欧では少なからぬ後継者が研究の火種を絶やさず 長い系譜が知られている。

使用する周波数が高いということは 探査対象に対する分解能のよさを意味するけれども 同時に可探深度の面で失うところが大きいのは AEM に限らない普遍的傾向である。両者を同時に満足させようとするのは通常 無理な話で どちらかにわれわれは重点を置くことを余儀なくされるが AEM の技術開発においては 文句なしに可探深度の向上が最優先課題になっていた。このことは金属鉱床に適用される物理探査技術のなかでやや特異ともいえる AEM の座を示している。海陸ともにスケールの大きい堆積盆地を対象とする石油探査に比べれば 一般に金属鉱床探査の方が微細構造に対する要求ははるかに切実なものがあるからである。それに対象深度も 相対的には何といっても浅くてすむことは間違いない。しかし 分解能をあえて軽視するものではもちろん ないにしても AEM の可探深度はあまりにも貧弱の一語につきるのであって とりわけ前回で詳しく論じた導電性表土が存在するときなどには 手も足も出ない窮地に追込まれる場合が少なくない。通常好条件下にあっても せいぜい 100m の線を越えることはまれとされ AEM の宿命的な泣き所であった。まして深部探鉱への要請が一段と高まるにつれ 今後ともこの方向に対する要求は衰えるどころではあるまい。

駒 井 二 郎

しかし 何も深部の解明能力だけが電磁法に託されている訳ではない。浅くともよいから手軽な あるいは微細構造を検出できる技術の需要はいくらでも考えられる。むしろ苦手な深部は他の方式にまかせ 得手な部門に集中するのも悪くない。高周波の電磁法はこの意味で打ってつけであり 加えて技術的な興味もあって variety に富む電磁法のなかでも「電波法」と呼ばれる独自の一分野を早くから形成していたのである。1913年 史上初の実用的な電磁法としてドイツ特許をとった SCHLÖSKY の考案も この「電波法」には属さないまでも 現在 普通の AEM が多用している周波数帯より一桁上の 1~50kHz で設計されていた。

ただし 計測技術はともかく 理論面の困難さは低周波を扱う場合に比べて倍増する。一寸考えると 通信工学の方で達成されたばう大な成果がそっくりそのまま拝借できそうな気がするし 事実 電磁波の発生・伝播機構からはじまって微弱信号の検出理論にいたるまで電磁法にかぎらずもともとは境界領域の工学である物理探査技術は この方面の進歩に負うところきわめて大なるものがある。しかし ごく浅い地表面の影響だけを考慮している場合ならともかく 大地という入り組んだ構成を有する損失媒質中における電磁波の伝播は 通常は無線工学が取り扱う自由空間中のそれに比し 数段も複雑さの度を増し とても安易な焼き直しですむようなしるものではない。この観点からは むしろ地球電磁気学の方で発展したモデルの方がまだしも役に立つ。ただ こちらはこちらで地殻・マントルの内部構造といった類のはるかにマクロな尺度で考えるため 数時間から数年以上にも達する気の遠くなるような長周期の電磁誘導現象を対象としている。物理探査としては この種の電磁的手法のなかで最高に近い大深度に向いている magneto-telluric 法でさえ “せいぜいマントル上部までの浅部構造に限り適用可能” などといわれている状態だから どうしても話がなかなか噛み合わない。

周波数が高くなるにつれて解析が困難になってゆく最大の理由は 媒質の誘電率 ϵ が無視できなくなる点に存する。電磁法の理論の冒頭には必ずといってよいほど変位電流の省略が枕言葉としてうたわれており たかだか数 kHz 以下の範囲にとどまるかぎり 飛び抜けて ϵ の大きい水分の影響を問題にするような場合をのぞけばこの仮定は常に正しい。しかし「電波法」のように周波数が数百kHzともなれば 事情は相当に変わってくる。具体的な例をあげれば花崗岩 ($\epsilon=1.6 \times 10^{-10} \text{F/m}$) の場合 いわゆる伝播定数を γ とすると

$$\gamma = \pm [i\omega\mu\sigma - \epsilon\omega^2]^{\frac{1}{2}}$$

ここに μ =透磁率 σ =導電率 $\omega=2\pi f$ であって 同じく代表値として $\sigma=10^{-9} \text{mho-m}$ $\mu=12.56 \times 10^{-7} \text{H/m}$ を使用すれば わずか 50kHz においてさえも第一項の 12.56 に対し 変位電流を表わす第二項は 62.8 と前者を上回り γ の簡略化が早くも利かなくなってくる状況がうかがえるであろう。したがって これら種々の理由により 地表近くに埋没された鉄管類や 地雷・不発爆弾などに対する小規模な金属探知器のたぐいを別にすれば 少なくとも資源探査の分野では「電波法」というよりは比較的高周波を用いる電磁法の実用化は 特許・実用新案のおびただしい登録数にもかかわらず 未だしの感が否めなかった。

ところで無線通信の方では電磁波を便宜上 周波数帯域によって区分し それぞれに特定の呼名が与えられているが 俗に VLF 帯と称される範囲には 3kHz (1kHz) から 30kHz までを含む。一般の電波応用では これ

はたしかに文字通り Very Low Frequency なのだが われわれが今 関心を持っている地下資源探査の目的には 実はこれでも “very high” な周波数帯に属するので VLF 法という名前は誤解を招くかも知れない。

もっとも昔の「電波法」が愛用していた周波数帯はこれよりもさらにふた回り近く上の MHz 級が多かったから 結局 VLF 法は通常の電磁法が慣用している周波数帯 (数百 Hz ないし数 kHz) と「電波法」との中間に入ることとなり 可探深度と分解能もこれに見合っ

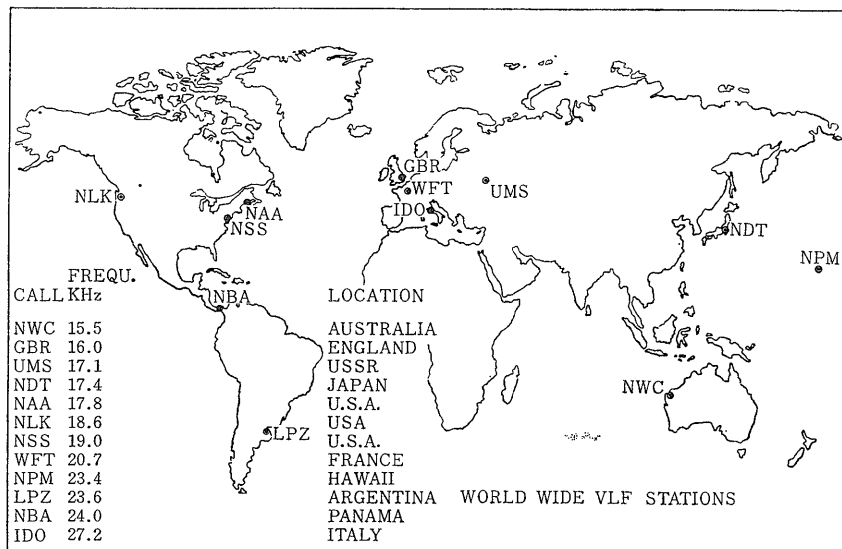
てその中間に位するものとみなしてよいであろう。この VLF 帯は昼夜を通して E 層反射が良好なため無線通信の揺籃期には 大電力の空間波による遠距離通信に広く賞用されていた。第一次世界大戦中などはもっぱら この周波数帯に頼っていた由。しかし 1920 年代に入ると 安定度をのぞけば短波長の方が多くの点で有利なことが立証され 無線通信は高周波の長い全盛期を迎えるのである。それが第二次大戦後も 50 年代に入ると 数十年来ほとんど顧みられることのなかった VLF の長所が軍事上の要請から再び見直され とくに海中への浸透力が買われて復権されたのだから まったく面白いものだと思う 遠距離を航行する原子力潜水艦との交信を目的とした強力な VLF 送信局が世界各地に続々と建設され その数は十数ヵ所にも達した(第 1 図)。

これらの各送信局の使用周波数はまちまちであるが いずれも 15~25kHz の間に大体おさめられており 送信出力も小は 4kW から大は 2,000kW にもおよぶ。これらが常時 無変調の搬送波を連続またはモールス信号の形で放射しており 世界中たいていのところはどこ

かの局でもれなくカバーできるように配置されている。受信装置の性能にもよるから一概にはいえないが 数年前でも水深 50m で楽に傍受できたとのことである。

近年 話題となっている オメガ航法もこの周波数帯を利用しており わずか 8 局で全世界をサービスエリアとなしうるのも長波長の利点をフルに生かした賜であろう。

ただし 送信設備は必然的に大規模たらざるをえず 現在 建設中の対馬局などではアンテナの高さは 450



第1図 世界の V L F 局 分 布

m 鉄塔の総重量は1,000トンにも達するし 海外ではそれでも間に合わなくて天然の峡谷を鉄塔代りにして電線を張っているということである。往時 隆盛をきわめた低周波が捨てがたい長所にもかかわらず 高周波にその座を追われたのは所要設備が巨大化しすぎることもその一因であった。なお VLF 局としては 日本でも愛知県の依佐美が NDT 局として 17.4kHz 500kW を以ってすでに稼動していることを付け加えておく。

資源探査などとはまったく関係なく 日夜 世界の空に飛び交うこの VLF 電波にタダ乗りして探鉱に応用できないかと最初に目をつけたのはスウェーデンの PAAL (1963~64 1965) であった。それも通常の地上電磁法を実施中 奇妙な妨害電波に悩まされたのが端緒になったそうだからそれなりに劇的であり この種の主客転倒は本文中でもこれまでにしばしば観察してきたところである。すなわち スウェーデン北部の著名な Kiruna 鉱山において NAA 局 (米国 Main 州 17.8kHz 2MW) と GBR 局 (英国 Rugby 160kHz 400kW) を受信すると500~700 μ V/m の電界強度を示し 大地中における減衰率を実測したところ 地下250mの深度でなお地表の値の25パーセントを保持したので 少なくとも100mの可探深度が期待できると推論した。GBR 局はまだしも NAA 局などは実に3,000マイルも離れているのだから驚異的である。

彼は地上での VLF 法の可能性を実証し エアポーンへの応用にも言及したが 翌65年には Geonics 社 (カナダ) の RONKA が早々と地上用 VLF 測定器の商品化に成功し EM-16 と銘打って販売を開始する。さらにその翌年 カナダ地質調査所がこの EM-16 によって構造探査への適応性を試験してお墨付きを出したところから にわかに関界より多大の関心を集めるにいった。

VLF 法の受信器は 一般に電子機器としては比較的簡単な方に属するため Geonics 社以外の大小メーカーも相次いで乗り出し 72年現在 地上 VLF 法として4社の5製品が競っている (EM-16 および EM-16R: Geonics G-28: Geotronics RADEM: Crone Geophysics SCOPAS SE-80: Scintrex)

一方 空中 VLF 法としては 同じく Geonics の EM-18を筆頭に KEM (McPhar) Radiophase および E-Phase (Barringer) の四機種が代表的であり 一時 DELTAIR を発表して進出しかけた Scintrex は 今では実質的には撤退に近い。また機器の製作や請負調査よりも むしろリースを主体としている Austral Exploration Service が独自の VLF 法装置を Cessna 206 に

機装中 と報じられているが 詳細は不明である。

さて VLF 法が AEM 一族のなかではっきりとその生誕が認知され 技術としての体裁をととのえてからもすでに7年を経過した。今なお 批判の種はあちこちにくすぶってはいるものの 少なくとも構造探査へのすぐれた適応性についての評価はほぼ 確立した感があり mapping に適した AEM の最有力候補として囁目されている現況は 前号で記した通りである。

ただし VLF 法の特色が これまで AEM で処女地のまま残されていた周波数帯の活用と 他動的に供給される送信エネルギーの無料借用にのみある訳でないことは念頭におく必要がある。これらも VLF 法を象徴する大きな要素にはちがいないが 送信源が無遠慮ともみなせる遠方に存在することも実は重要な意義をもっている。

これは magneto-telluric 法や VLF 法の前身ともいうべき AFMAG 法でも同様であって VLF 信号はこの故にこそ平面波としての性質を具備することとなり 実用上 従来の AEM とは大幅に異なった様相を呈することとなる。通常の電磁法が準拠する送信源は 空地ともほとんどがいうところの双極子源であって とくに受信コイルの相対的位置もまた対象とする地下構造との距離に比較して実質上 送信コイルと同位置にあるものとみなせる AEM などは 別名 “double dipole 方式” と呼ばれているくらいである。あとはわずかに TURAM 系が 直線状または大型ループの送信源を使用しているのが 例外的存在であるにすぎなかった。

この平面波としての特質から いろいろと個性ある特徴が生じてくる。まず直接的な形で利いてくるのは可探深度で たとえば直線状導体に対し双極子源では距離のほぼ6乗に比例して応答が減衰してゆくのに対し VLF 信号は1~3乗程度ですむため 周波数が高い割にはエネルギーの浸透度は劣化しない。裏返していえば150~1,500ftの範囲なら測定飛行に際し 対地高度の維持にそれほど神経質にならなくともよいとされておりこれは operational な面からは図り知れない便益をもたらすものである。

次に遠路はるばる到来するこの平面波は 5波長を越す距離 (VLF 帯では100km前後) にいたれば全エネルギーが電界と磁界との間に平等に分配され かつ位相も足並みがそろってゆく。これを巧みに利用したのが前号でもその片鱗をご紹介した E-phase (第2図) であるが これについてはのちほど もう一度 再論する機会があるので これ以上は立入らない。

また さなきだに心細い可探深度を少しでもかせぐため 地表上のこまかい起伏に沿って縫うような低高度で飛ばざるをえない「双極子源 AEM」では 当然ながら送信源はある一時点において地下導体をごく局所的に励振するにすぎないから 大規模な高比抵抗体よりは小さな低比抵抗体の方に S/N 比がよく したがって延長数 10マイルにも達するような大構造に対しては どうしても応答しにくい。この点 平面波による方式は優位に立つ。たとえば West MacDonald 鉱山では 並行して実施した「双極子源 AEM」のチャンピオン INPUT が 鉱体直上で明瞭な反応 (第 3 図一図中央の■印) を示して "辛うじて" 面目を保ったものの 要するにそれだけで終わったのに対し VLF 法の成果は同図のコンターにみるごとく かくも密度の濃い新しい知見を発掘しているのであって とくに鉄道線路の南に剪断帯の存在を明らかにしたのなどは まさに好個の例といえよう (BARRINGER and McNEILL 1970)。

最後にこれは平面波というよりは むしろ送受信器間隔の大きさから派生することだが VLF 信号が mapping にとってははなはだ都合のいい性質を有している利点があげられる。今 均質の半無限媒質上に垂直磁気双極子源を考えると 電磁界としては磁界の垂直成分 Hz 電界の接線成分 Eφ および電界の半径成分 Hr だけが観測される。繁雑だから 一番簡単な Eφ のみを記せば

$$E\phi = \frac{M}{2\pi\sigma r^4} \{3 - [3 + \gamma r + (\gamma r)^2] e^{-\gamma r}\}$$

ここに M は双極子モーメント (=nAI n: ループ巻線数 A: ループ面積 I: 印加電流) r は送信器と観測点間の距離 γ はさきほどの伝播定数を指す。Hz はまだしも Hr などとはこれよりも数段 複雑な関数形

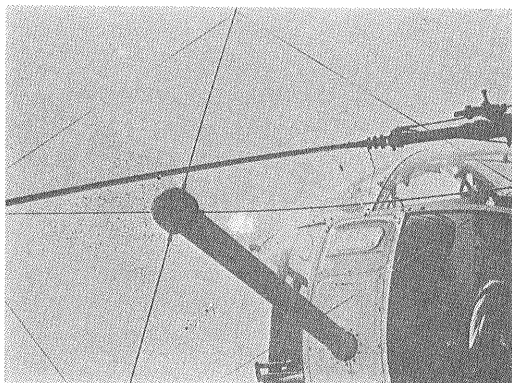
となる。これら三成分とも いずれも目標とするσを可測量の組み合わせで表現することができない。この点は同じ垂直探査といっても 例の直流法などとは大いに趣きを異にするところである。

そこでσを求めるべく いろいろと工夫がこらされており 現在ではやはり曲線重合法がもっとも実用に耐えうるものとされているが いくつかの重要な欠陥から免れられない。しかるにここでγが波長にくらべてきわめて大きいとする条件を導入すると 上式中で e^{-γr} のかかっている項は全部 無視できるから σは次のようにわずかに1回の測定で一気に求められることになる。

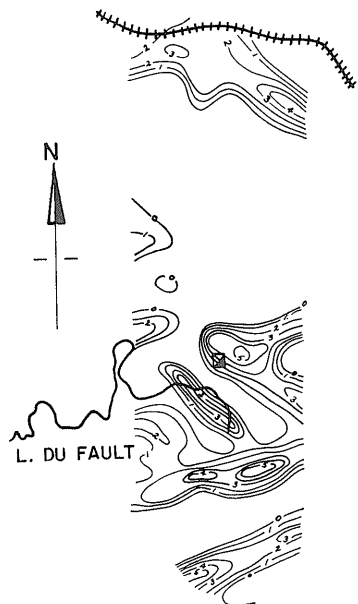
$$\sigma = 3M / 2\pi r^4 E\phi$$

この簡略化は Hz Hr についても同様に成立つ。一波長はかりに周波数 5kHz とすれば せいぜい 60km 程度だから 普通の電磁法では破天荒な距離でも VLF 法では容易に満される条件である。

この関係は無線工学でよく知られているところの誘導磁界と幅射磁界に対比される。もっともこのままの形では精度が悪く たとえば MT 法のように異種成分の比をとるような細工をしなければ使いものにはならない。また大地が均質でなければ このσはもちろん真のσではなしに見掛けのσとなり 成層構造に対する解析はそれはそれで大変であるが とにかく比較的簡単な測定原理によって 等価的ないしは近似的にσの大体の線の見当をつける方向に一歩近づいたことにはなる。



第2図
ヘリコプタの機首に取付けられた Radio Phase と E-Phase の電界アンテナ 飛行中水平を保持できるようジャイロを使用している



第3図
INPUT と VLF (West MacDonald 鉱山)

このような種々の特質によって VLF 法の解析はこれまでの AEM とはかなり異質なものとなることが予測される。実際たとえば USGS の FRISCHKNECHT が行なった水槽実験では とくに水平磁場の離相成分に関し しばしば予想を越える意外な結果を生じた。一例をあげると比抵抗コントラストの変化に対し ゼロ応答点を通過しつつの極性の逆転といった類の奇妙な挙動が観察されている。この種の模型実験でも 実施に際しては綿密な配慮を要することはいうまでもないが とりわけ計算を容易(可能)にするため 多くの省略・近似を常套手段とする理論解析においては よほど慎重に事を運ばないと 見当ちがいの結果を出してしまうおそれが多分にあることを警告する向きも多い。

また現在のところ まだあまり説明はされていないが VLF 法には どうも二種類の異なった電流パターンがあるらしい。すなわち一は導電性表層 岩体中の渦流による直接の誘導分であるが 他はかりに比抵抗が均質であったとしても地中と送信アンテナ間に還流し 水平方向の薄いシート状の拡がりに付随した電流パターンでもちろん比抵抗によって姿態が異なり 比抵抗の低いゾーンに集束してゆく傾向がみられる。この両者は若干その性質を異にし しかも効果としては当然 重畳するから 既存の知識では説明しがたい新現象の続出も予想される。

もっとも これらの分離がなんらかの形で可能となれば VLF 法をあえて mapping 的用途の枠内にみずから閉じ込める必要は毛頭なく 直接探鉱的应用への軌道修正も加速の度を早めるだろう。従来の方式にみられぬ特異な性格を有することは 逆にうまく利用できればこ

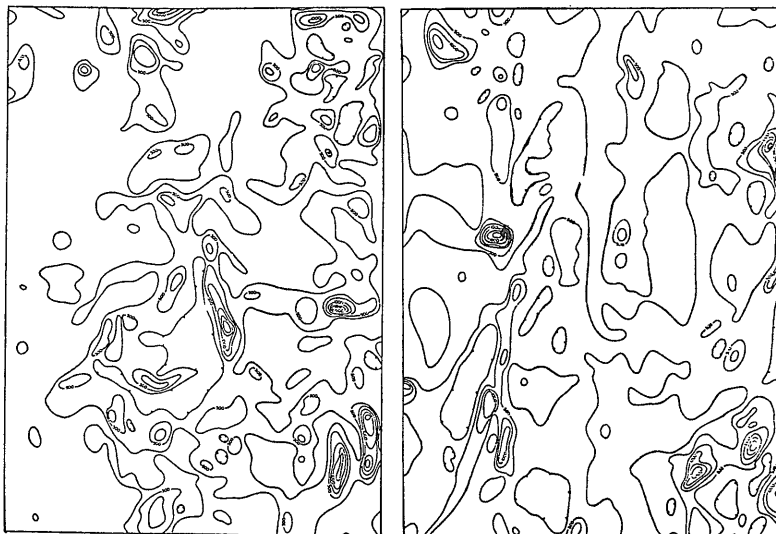
れまで想像も及ばなかった方向へ爆発的發展をする可能性を秘めていることを暗示する。

たとえば周波数の問題にもどるが 各送信局の使用周波数が VLF 帯とはいいながらもちまちまなところから抜け目ない応用が考えられる。すなわち 世界には地理的に一カ所の送信局しか受信できない地域も数多いが S/N比にゼイタクさえいわなければ 数カ所からの電波を受信可能なところも少なくない。したがって複数の周波数による測定が“労せずして”行なえることになる。もっとも同じ VLF 帯のなかでは 上限と下限の差といえどもタカが知れているが この考え方を一歩進め かつて先人が夢に描いた放送周波数の利用にまで持って行った例が第4図(Uxbridge, Ontario)である。周知のように表皮深度は 周波数の平方根に逆比例するから VLF 帯よりも 50 倍も高い放送周波数によれば エネルギーの浸透度は約7分の1となり VLF法の受持つ 150ft 前後の深度に対し 10~25ft 付近の比抵抗分布が画然と浮き出てくるはずだから 深度別の構造解析が一挙に可能となってくる。

以上に近年 急テンポの進展をみせている VLF 法のあらましを素描した。同じ他力本願であっても AFM AG 法や MT 法と異なり 人工源—それも軍用通信網に依存しているだけに 何となく“狂い咲き”の印象も払拭しがたいのだが このようにして VLF 法には 伸び盛りの新技術が一樣に発散するところの熱っぽい雰囲気はムンムンしている。まだまだ解決されなければならない未知な部分が 少なからず残されていることも事実だが 克服されてゆくスピードもまた猛烈に早い。

たとえば半定量的な解析の技法なら 100 コ以上のモデルについてかなり克明に吟味された標準曲線集が すでに71年初頭には出版されており (MADDEN-VOZOFF) 米加両国の地質調査所をはじめ あちこちの諸機関で活発な基礎・実用の両面にわたる研究が推進されている。

この方面の基礎理論に不滅の足跡を印したのは とくに50年代から60年代前半にかけて精力的に活動した J. WAIT で とりわけ各種送信源による水平成層構造中における電



第4図 同一地域での二周波数測定例(右: VLF周波数 左: 放送周波数)

磁波の伝播 あるいは各種導電体による散乱現象に関し多くの事実を明らかにした。

また自由圏で蓄積された成果とは独立に ソ連でも旺盛な研究活動が1920年代より連綿として続けられ なかなか時間領域での電磁垂直探査法を体系化して実用の域に達せしめ この分野ではむしろ西欧側をリードして世界の最先端を走りつつある (VANYAN et al 1963)。

VLF 法の“総論”を終わるにあたり 蛇足ながらこの魅力あふれる新しい“道具”が 物理探査技術のなかでどのような位置を占めているか 再考しておくのも無駄ではなからう。 まずさきほど VLF 法の解析に際しては従来の固定観念から脱却し 視点の転換が迫られる旨を強調したけれども 別にこのことはとくに高度な困難さを意味するものではない。 これまでの AEM に比すれば空白の部分が若干 目立つというだけで 技術としてかなり異質な側面を有し かつ歴史も新しいのだから当然のことである。 ひとたびエンジンさえ始動すれば 数学的には VLF 法のような平面波の方が双極子源よりもむしろ扱いやすいのであり また前記の誘電率の影響にしても VLF 帯の程度ならばまだ幸いにしてこれに目をつぶっても大過はない。 不相応に適用範囲のいたずらな拡大に血道をあげるような愚さえ犯さなければ 探査技術者が長い間 渴望してやまなかった空中探査の四番打者に成長しうる素地は充分に備えている。

ただし VLF 法は 万能薬でもなければ起死回生の秘薬でもない。 現在のところ mapping はともかく 直接探査としての意味合いでは 強いてたとえるならば高単位のビタミン剤程度に考えておくのが妥当な線と筆者はみる。 もちろん 適応性について100パーセントの保証などは 百年河清を待つにひとしいけれども 一步を誤ればデータが何の役にも立たぬ紙屑と化すおそれは空中磁気探査の比ではない。 VLF 法を活かすも殺すも 鍵はデータ処理・解析の soft technology にある。 他の探査技術ととも同様であろうが 無定見な濫用は経済的損失のみにとどまらず かえって無用の混乱を招く結果に終わってしまう。 技術の内容が高級なものになってゆくほど 折角の利器の使いどころを誤って高価な玩具たらしめぬよう その限界をみきわめておく必要性は痛いほど認識しておくべきだろう。 そしてこれは maker 側の責任であると同時に contractor および client を含む user 側の責任でもある。

前置きが長すぎたが 以下にすでに実動している空中 VLF 法の各システムの概要を個別に展望してゆく。 またそれぞれの方式の技術面からの考察に加えて その

母胎となっている海外の鉱山探査関係諸企業の概況についても 折にふれ略記してゆくこととする。 これらの maker や contractor の実態は それ自身がきわめて興味深いものであると同時に AEM 技術の背景を理解する上にはなほ示唆に富む。

EM—18 (Geonics)

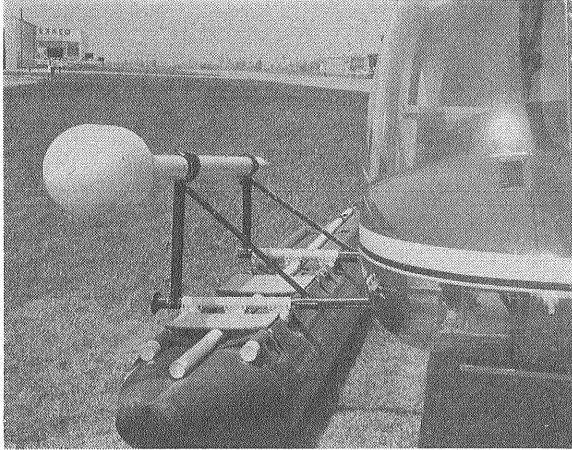
各社それぞれに個性あふれるシステムを発表して一概に甲乙はつけがたく また研究開発から試験飛行へと進んだのがいずれも1968年頃から相前後してほとんど同時期であったが 鼻先の差で先陣を切ったのは何といても Geonics 社の EM—18 であった。

同社は1962年に発足し 規模としては中小企業の乱立するカナダの業界でもお世辞にも大きい方とはいえないが 有名な VANIO RONKA が主宰しているだけに 小粒ながら製品のラインアップにはなかなかユニークなものが多い。 前述の通り地上用でも EM—16 を開発して VLF 法を檜舞台へ押し上げる原動力となったし PAAL を VLF 法の父とすれば RONKA は母だろう。

先駆者としての特権から EM—18 は水平磁場を基準としたところの垂直磁場の同相・離相成分という“もともと有用でかつ信頼度の高い測定方式”を特許で押えてしまったため 他社は必然的にこの重圧からのがれるべく 技術的に無理をせざるをえなくなったと自賛する。 たとえば McPhar 社の KEM は 合成磁場の伏角とその振幅を測定しているがとくに後者は技術的にはナンセンスで かつ EM—18 からえられる全情報量の半分しか利用していない とクサシ 一方 Barringer 社の Radio Phase も盛りたくさんにいろんな測定量を並べ立てているものの“垂直電界というきわめて不安定な成分を参照基準とした無意味な複雑化”を招いただけでなく 地形・雑音等にも敏感な体質になってしまった と斬っている。

この主張は たしかに一理ある。 しかし この種のいわゆる know-why は 重要ではあることは間違いなくにしても それだけでは各方式の優劣を決定するキメ手とはならず それはむしろ know-how の方に存する機会が多いだけに よほどの判然とした格差でもないかぎり この段階で結論を急ぐべきではない。

Geonics 社自身は本来 機器メーカーであって 空中探査の請負は行っていない。 EM—18 を装備して請負サービスに入っているのは カナダの Lockwood Spartan およびオーストラリアの Geophysical Resources Development の各社が数えられる。



第5図 EM-18 の センサー部

第5図として Jet Ranger に取付けられた EM-18 のセンサの外観を示す。初期の型は受信コイルをジンバルに格納していたが 改良型はこの写真にみられる通り 機体に rigid に固定され ピッチングの補正は垂直基準として小型ジャイロスコープを使い electronic に行なっている。受信コイルの直径は2インチ弱 長さ9インチで 直径7インチのプラスチックコーンにおさめられ これとまったく同一寸法の参照コイルが5フィートほど離れて取付けられている。一切を含めた全重量は約60ポンドだから たしかに重くはない。

前記の諸社のうち Lockwood はかねてより Hunting の衣鉢を継いだ SLINGRAM タイプの AEM を その fleet 中に擁していたが そのうちの LHEM-200 (周波数4,000Hz) と この EM-18 の同時測定を試みたところ 大気乱流への抵抗力で前者にまさったのは予想通りとしても 何と可探深度においてすらも凌駕したとは嘘のような話である。事実 製作者の Geonics も 当初より浅部から深層にいたるまで幅広い検出能力を強調していたし 後記の Radio Phase も1,000フィートを呼号しているから VLF といえどもそう馬鹿にしたものではない。

第6～7図はこの二種類の AEM と磁気を併用した結果の一部で 原図の縮尺は1インチ=1,320 フィート 平均対地高度は200 フィートであった。また等磁力線図(第6図)のコンタ間隔は20ガンマであるが EM の方はまず20ユニット毎に引かれた等強度線が EM-18 による同相成分の勾配値(1ユニット:0.00679 パーセント/フィート)を表わし 一方 測線上に太く塗られた線分は SLINGRAM による同相成分の半値幅 中心の黒

点はピークの位置 そして分数表示は同相成分と離相成分との比を意味する。この辺のところはこの種タイプの AEM で慣用されてきた表現と差異はない(第7図)。

斜めに走る波線は推定断層を示しているが 面白いことに磁気図からは北東方向のトレンドが推定されたのに 反し VLF 図ではむしろ北西性の線構造が解釈された。消極的な見方をすれば このような食いちがいはデータそのものの信ぴょう性にまでさかのぼって際限もないが 素直に考えれば AEM と磁気の integration によってえられる独立な情報源の総合的解釈により かくも実り多き収穫がもたらされる事実に瞠目してしかるべきであろう。

一般に VLF 法は 岩石中に比抵抗変化を生ぜしめる構造運動に関連した lineation や 岩石の schistosity にもすぐれた応答を示すのに 反し 磁気測定もたしかに断層等に関する知見を提供するけれども それはあくまでもトレンドのズレとか 不連続線のパタンから間接的に解釈する場合の方が多くのものであって 磁力変化それ自体はむしろ岩相に支配されることが根本的な相違点である。

なお同図で すべての VLF 異常を地上電磁法でチェックしたところ そのほとんどが良好な一致を示したと報告されている。しかもそのうちの若干は 送受信器間隔400フィートの地上電磁法では土台 検出不可能だったくらいの深部導体だったとのことだから 頼もしき限りである。同社はヘリコプタだけではなく Queen Air のような固定翼機にも EM-18 を取付けられるよう努力していたから 今頃はもう仕上って実動しているかも知れない。

かつて Hunting や Huntec にあつて豊富なキャリアをもち 現在は independent geophysicist として活躍している N. PATERSON は 今や各種物理探査技術の実験場化しているトロント近郊の Cavendish で EM-18 の実用性テストを行ない その効用に折紙をつけた(1970)。彼の結論はこの EM-18 だけでなく すべての空中 VLF 法にほぼ 共通して適用できると思われるので 前述した内容と重複する面もあるが 以下に要約しておく。

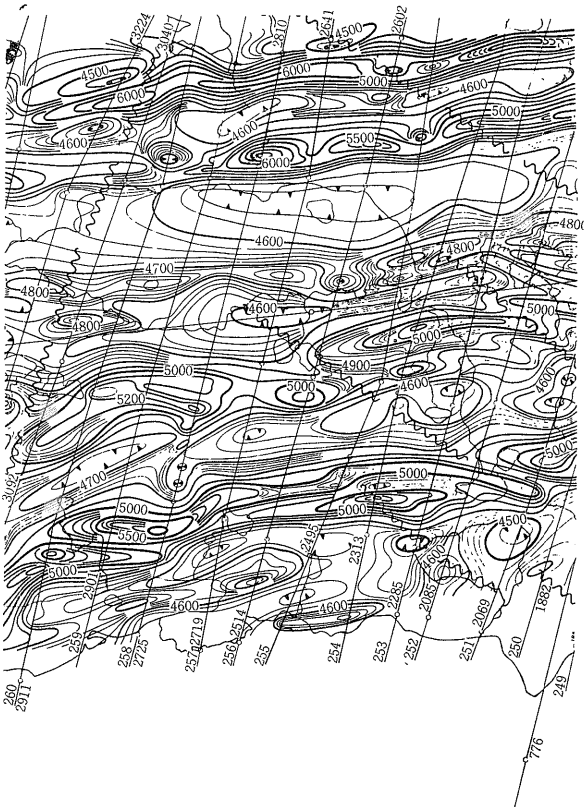
- (1) 大気擾乱による雑音レベルは 全 AEM 中最小に止まると見込まれるからほとんど全天候性である。この Cavendish のテストでは 使用したヘリコプタ (Hiller 1100) の飛行限界とも考えられる風速 30mph でも 雑音レベルは ±2 パーセントにすぎなかった。
- (2) mapping と prospecting の双方に適應性を兼備。
- (3) 自らは一切のエネルギーを放射しない passive な方式だから

小型軽量の受信装置のみですみ 他方式との integration に最適。

- (4) 通常の AEM の応答は飛行高度の 3~4 乗で減衰してゆくが 一次磁場が均一な VLF 法ではせいぜい 2 乗以下に抑えられる。標準対地高度としては 200~300 フィートを推奨するが 電波高度計などは無用となろう。地形が急峻な山岳部では (1) の長所と併せてヘリコプタによる調査が理想的である。もちろん 条件に恵まれれば固定翼でもよい。

ただこの PATERSON にかぎらず 他の空中 VLF 法の熱心な信奉者でも 明言はさせているものの VLF 法単独の空中調査の意義は経済的に認めにくいようで あくまでも他方式との integration を強調しているのは おおむね共通している。 実際 公表されている範囲内での空中 VLF 法単独のラインマイルコストは 他の AEM に比較して格別安価という訳でもない。 空中調査の経費の大部分が vehicle の運航費である以上 当たり前ともいえる。 PATERSON は “ideal accompaniment to air-mag for reconnaissance” と さすがにうまい表現をした。

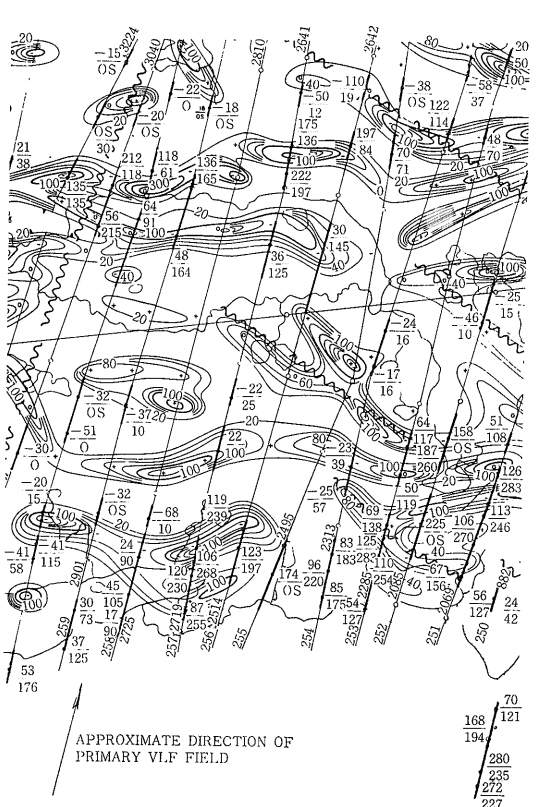
Radio phase E-Phase (Barringer Research)



第 6 図 AEM (EM-18 LHEM-200) との同時測定による等磁力線図

トロントにある BARRINGER の社長室には “ノーベル賞受賞者を含む一流の学識経験者 100 名が構成する審査委員会によって 1969 年度の重要発明に選定された Radio Phase” と彫り込んだ立派な楯が颯爽とかかげられてある。 だからといって数ある空中 VLF 法のなかで Radio Phase が一頭地を抜いたと早呑込みすることもなかろうが 1961 年の創立以来 同社の製品はかの INPUT をはじめ比類なき独創性を以って鳴らしていることも事実である。 その伝統は Radio Phase もさることながらむしろ弟分の E-Phase の方により鮮明な形で具現した。 この E-Phase は VLF 法の諸方式中でもとくに異色の存在で電界成分を徹底的に利用しているところが変わっておりアイデアマン BARRINGER の面目躍如たるものがある。 開発に当っては巨費を要したらしいが 今後 充分にモトをとれるだけの金の卵に報いられたといえるだろう。

先に 平面波のところで簡単にふれたが 双極子源による電磁場はきわめて局所化されているため 波面はもちろん曲面となり しかも電界の成分が磁界に比してごく微少にすぎなかったから 通常の AEM がすべて磁界の測定に徹してきたのは自然であった。 Radio Phase をも含めて VLF 法の他方式はこの点だけは全部軌を同



第 7 図 EM-18 による等強度線図と LHEM-200 の結果

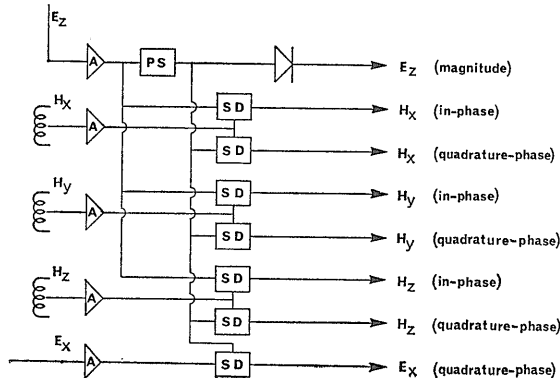
じくしている。ただし Radio Phase だけは 参照基準として垂直電界を利用しており 原理上 これは必須の要素になってはいるけれども 直接 地下の情報に対応する最終表示を与える物理量は やはり磁界の方である。

しかし VLF 信号では 電界もまた全エネルギーを磁界と折半しているから これを遊ばせておく手はない。しかも E_x/E_z の測定から 表皮深度ぐらまでの見掛け比抵抗を定量的に求める理論は 遠く1937年 NORTON らによって見出されていた。すなわち 均質の半無限媒質上では

$$\frac{E_x}{E_z} = \left(\frac{i\omega\epsilon}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

これは MT 法と類似の形であるが こちらの方はあらかじめ周波数が判っているから簡単きわまりない。この E_x/E_z は (complex) wave tilt と呼ばれる量で 同相・離相両成分とも比抵抗の平方根に比例するが 半無限均質媒質にかぎれば 後者のみで充分であり かつ有利ともされる。ただ一般的な成層構造の場合には 同相成分も記録しておかないと情報の一部が失われるが 離相成分をいくつかの周波数で測定しておけばこれはカバーできるし 前掲の放送周波数帯の利用などはその一例である。

これまでも再三くり返してきた通り 主として直接探鉱用として設計されるすべての AEM は 地下導電体がかんりの急角度で切立っている状態を暗に意識している。すなわち垂直的構造に対する水平探査法と考えてよい。これに反し E-Phase はむしろ表層の横方向への比抵抗変化に強い。だからどちらかといえば前者の用法に属する Radio Phase を併用した場合 その記録がまったく平坦で何の変化を示していないところでも E-Phase はしばしば顕著な異常を示すことがあり 対象

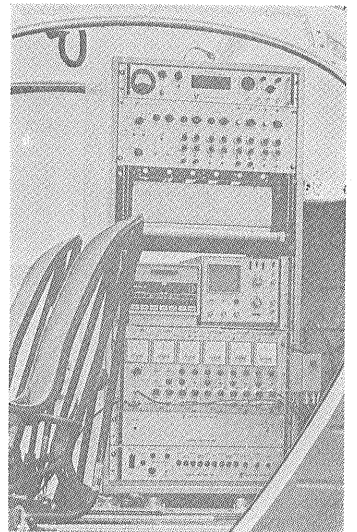


第8図 Radio phase 受信機概念図 (これは E-phase が分離独立する前のもので E_x が含まれている なおSDは同期検出器)

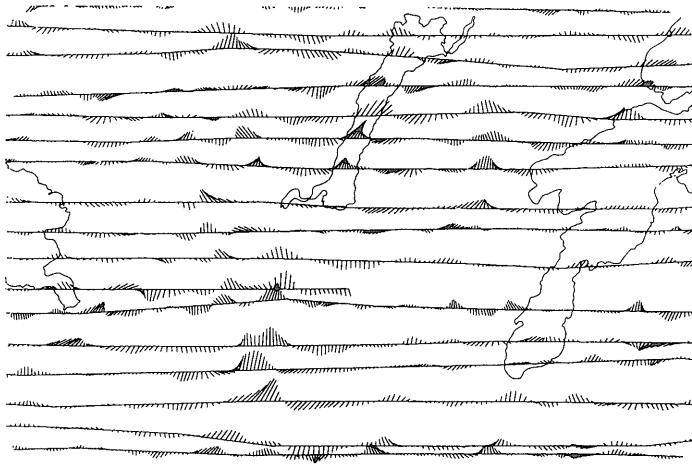
地域の立体的総合解釈に資することが可能であろう。換言すれば 他の諸方式がみな正攻法ではあるにしても 磁界測定による垂直的構造の比抵抗変化の検出という既成の枠から一步も踏み出さなかつたのに対し E-Phase は電界成分の利用という飛躍によって未踏の領域を開拓したといえる。最近のニュースによれば E-Phase におけるすべてのデータのコンピューター処理は すでに完全にルーチン化したという。

E-Phase による比抵抗mappingの実例は 前号の第2図にかかげた。次に Radio Phase に移ろう。Radio Phase は前述のごとく垂直電場を参照基準とし 直交三軸の受信コイルによって磁場の X Y Z 成分を測定するが そのおのおのがまたさらに同相・離相成分に分れるから 記録計はこれだけですべて7チャンネルを要する(第8図)。もっとも常にこの全部の量が必要という訳ではなく 調査目的に応じて適宜 省略してもよいし 逆に X Y 両成分から水平磁場を合成したりする。これまでの経験によれば水平磁場の同相成分がもっとも有用で これと離相成分との比もある種の制約は受けるが 比抵抗や異常体の埋没深度の推定に寄与できるといわれている。

Radio Phase が期待されている分野は広い。mapping にももちろん悪くないが 比較的 浅くてよいマンガ ン ポーキサイト鉱床 あるいは AEM が IP 法の前に完全に兜を脱がざるをえなかつたポーフィリイカップ ー鉱床や鉱染状の鉛・亜鉛鉱床などのように とにかく大規模で比抵抗コントラストの小さい場合の探査には 在来の AEM をしのぐ効果が予測されている。ただし



第9図 小型ヘリコプタにおさめられた integrated system (上から磁気計 Radio phase と E-phase 多チャンネルアナログ記録計 デジタル磁気記録装置 モニタ用オシロスコープ ガンマ線スペクトロメーター および電源部)



第10図 Radio phase のベクトル表示

この場合でも 表土の比抵抗変化や水分を含む破砕帯等からの弁別は困難だろうから 何らかの complement を必要とする事情は変るまい。

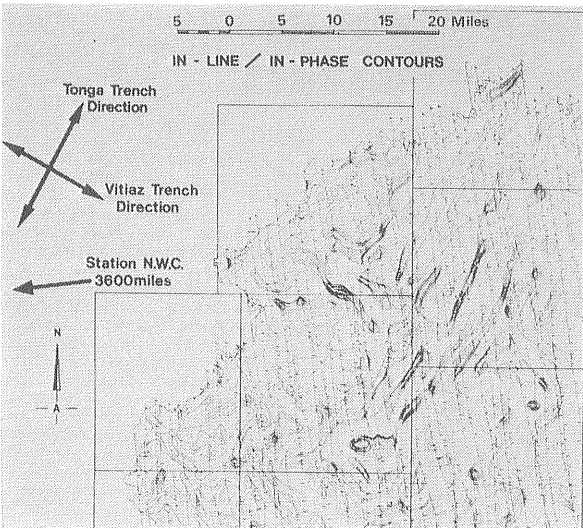
ここで Radio phase で採用されているやや特殊な表示法による調査例を第10図に示す (Lake Dalembert Quebec)。

今 機体軸に直角と平行に設置された水平コイルの出力から一次磁場を差引くと 同相・離相両成分とも各基準点における二次磁場の変化分をベクトルとしてプロットすることができる。この各ベクトルの頭を連ねた包絡線は 水槽実験でえられる典型的な標準曲線—中央にピークがあり 両端になだらかな翼部をもつ形状とよく似た形になる。この表示法によれば Radio Phase でえられる全情報量を最大限に包含しているだけでなく

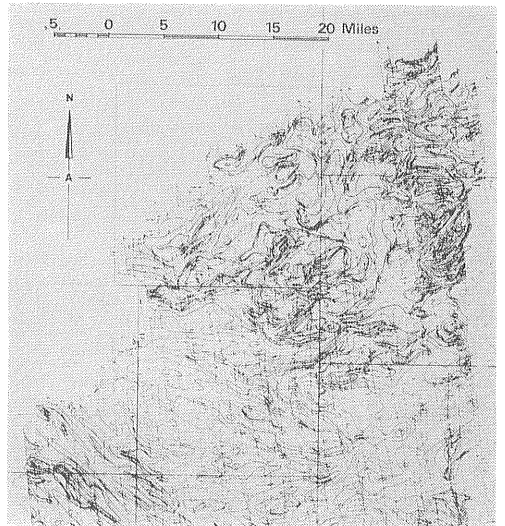
ベクトルの矢を時計方向に 90° 回転させてプロットしてやると 一般に飛行測線は主要な構造線の走向と直角にとられることが多いから 各測線間の対比が一躍明確になるという副次的な利点も生ずる。その代り 解析にはかなりの熟練を要する上に 作図費も相当 割高となるのがさげられないから やはり特殊な場合以外は等強度線図を主体とする編集は欠かせない。

なお同図には含まれていないが このとき併用された磁気図と対照すると 一本の大構造に沿って比抵抗がはげしく変化してゆく模様が歴然で これまた integration の効用が余すところなく発揮された好例であった。

一方 第11図は0.05% (一次磁場に対して) 間隔で引かれた Radio Phase の等強度線図で Fiji 諸島の例である。Barringer 社が同島で1969年に開始した四年がかりの空陸一体の総合プロジェクトは 地化探までを含めた大規模なもので Radio Phase もその一翼を担った。周知の通り Fiji 諸島は 太平洋を取巻く “火の輪” に沿って火山 海溝 地震等 活発な地殻変動にいろどられ最近は例の海底拡大説がはなやかな議論を展開する焦点のひとつともなっている。金属鉱物資源も期待のもてる地域で 現に金 銅の鉱山が稼行中であり さらに 1,500 マイルほど離れてはいるが 西方ソロモン群島は ブーゲンビル島で開発されたボーフィリイ銅型鉱



第11図 Fiji における Radio phase の等強度線図



第12図 同地域の等磁力線図

床と地表地質が酷似しているところから 彼等が物探としては既存の資料が皆無にひとしい同島をえらんで自社の保有する最高の技術を結集し 一発 派手なホームランを狙った意図は理解に難くない。

第11図中に明瞭に浮き出ている導電率の lineament をスクリップス海洋研究所が発表した精細な海底地形図と比較検討した結果 Tonga Vitiaz の両海溝との関連性が明らかに認められた。注目されるのは同一地域の等磁力線図(第12図)にみられる構造パターンとは部分的にしか相関のないことで これも前記の EM-18 や Lake Dalembert の例と同じく 比抵抗と磁性というまったく異質の物理量の融合によってはじめて実りうる所産といえよう。

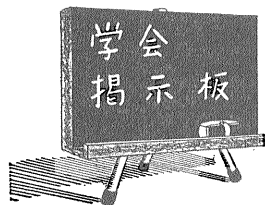
なお地形の影響は通常の AEM では 電波高度計の記録によって補正するのが常道だが ここでは垂直電界の散乱が山岳部で変動を受ける現象を利用し これまたコンピュータを持ち出して自動補正しているのも興味を引く。一時この Fiji 調査は 一部で失敗をささやかれたこともあったけれども 72年にいたり ボーリングを担

当する AMAX との joint venture の契約締結にまでこぎつけたと報じられている。

もう一度 E-Phase にもどって その応用面の一に地熱探査が考えられていることを付記しておく。ニュージーランド アイスランド あるいは東アフリカなどにおける地表調査の結果によれば 地温の高い地熱地帯では比抵抗の激減が知られており いくら貧弱とはいえ 赤外線などよりは E-Phase の方が浸透力があるから これと Radio Phase とを組合わせて構造規制を さらに水銀スペクトロメータをも動員して地熱異常の探知に有効と Barringer 社は PR にこれつとめている。

一方 この地熱探査とまさに正反対の極に立つのは 日本ではあまり縁がないが 比抵抗が 10,000Ωm 前後にも達する永久凍土帯(Permafrost)の調査で 極地方でのパイプライン建設に関する基礎資料となることが期待されているというから AEM の応用範囲もずいぶん拡大したものである。(つづく)

(筆者は 物理探査部)



・日本岩石鉱物特殊技術研究会

1. 昭和48年 8月 4日 (土)~6日(月)
2. 第16回研究発表会 (金属 非金属 構造地質 耐火物等の薄片 研磨片の作成に関する講演会)
3. 東北大学理学部地学

第2 (岩石鉱物鉱床学教室 仙台市青葉山字青葉)

4. 日本岩石鉱物特殊技術研究会
5. 神奈川県川崎市高津区久本135 地質調査所内
日本岩石鉱物特殊技術研究会
☎(044) 86-3171 (内線 211)

・International Symposium on Volcanism and Associated Metallogenesis

1. 昭和48年 9月 3日~8日
2. 火山活動および鉱床生成に関する国際シンポジウム
3. プカレスト ルーマニア
4. ルーマニア鉱山・石油・地質省 文部省
5. Prof. D. Radulescu, Fac. Geologie-Geografie, Bull. Balcescu 1, Bucuresti, ROMANIA

・International Symposium on Underground Waste Management and Artificial Recharge

1. 昭和48年 9月 26日~30日
2. 地下廃棄物処理および 人工地下水に関する国際シンポジウム
3. ニューオルレアン 米国
4. アメリカ石油地質学会 米国地質調査所 国際水理地質学

会

5. American Association of Petroleum Geologists, P. O. Box 979. Tulsa, Oklahoma 74101, U.S.A.

・日本地球化学討論会

1. 昭和48年10月 1日(月)~3日(水)
2. 1973年地球化学討論会
3. 秋田大学(秋田市手形学園町)
4. 日本地球化学会・日本化学会
5. 東京都杉並区高円寺北4-35 (〒166)

気象研究所地球化学研究部内 日本地球化学会事務所
☎(03) 337-1111 内線75

◎課題討論

1. 黒鉛鉱床の地球化学
 2. 有機性鉱床の地球化学
- 招待講演のみ
他に一般討論

・日本地学教育学会

1. 昭和48年 7月 30日(月)~8月 2日(木)
(大会 7月 30日・31日)
2. 昭和48年度全国地学教育研究大会・日本地学教育学会 第27回全国大会
3. 鹿児島市中央公民館・鹿児島文化センター
4. 日本地学教育学会 ほか
5. 鹿児島市上之園町23-1

鹿児島県立甲南高等学校 地学教室内
大会準備事務局

今村 隆夫 ☎(0992)54-0175

- [注] 1. 開催年月 2. 会合名 3. 会場 4. 主催者
5. 連絡先(掲載順位は原稿到着順)