

空 中 磁 気 探 査

陶 山 淳 治

ま え が き

空中磁気探査法は第2次大戦後に急速な発達をとげた方法であり、現在もお発展の途上にある。このような発展は電子技術の発達と切り離すことはできないが、また産業面への寄与という点で石油・天然ガス鉱床の探査に役立ち、多くの実績をあげたことも一つの要因と考えられる。地質調査所では昭和39年度より構造性ガス調査研究の一環として、構造解明の一手段として空中磁気探査の研究をはじめている。現在、このような研究ははじめて間もない時期にあり、実例を掲げての詳しい説明は次の機会に譲らざるをえないので、ここでは空中磁気探査の概略について紹介しておきたいと思う。

空 中 磁 気 測 定 の 発 展

地球磁界を陸上に限らず、海上、空中でも測定することができれば、地球磁界の分布が立体的に詳しく求められるので、地球磁気の本質の究明に役立つばかりでなく、産業面でも寄与するところが少なくないであろうことは、多くの人に古くから着目されていた。そこで多数の学者および技術者は、このような目的に合致する測定装置の開発に努力を払ってきた。1936年にearth inductor型の磁力計を航空機にのせて、空中磁界の測定をLogachevが試みたのが、空中磁気探査の始まりとみてよいであろう。

earth inductor型の磁力計とは、発電機の原理を用いたもので、地球磁界のなかでコイルを回転するとき、コイルに誘起される電圧を測定することによって地球磁界の大きさを求めようとする原理の磁力計である。

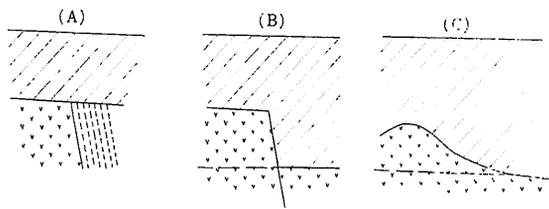
ところでLogachevの用いた空中磁力計は感度1000ガンマ(10^{-2} エスレッド)のものにすぎなかったが、同じ頃に磁性材料の研究の産物としてつくられた高導磁率合金を用い、Vacquierは飽和磁芯型の磁界測定素子の開発に着手し、約1ガンマの弱磁界を測定できるMAD(magnetic airborne detector)潜水艦探知器を完成した。戦後、物理探査に使用するために自動方位保持装置の技術的改良をほどこし、空中磁気探査用のFlux-gate型の磁力計を完成し、1946年頃より実際の探査作業が始められた。Flux-gate型の磁力計にはいくつかの型のものがあるが、おもにGulf型式のもの(地質ニュース101号参照)が使われていた。この種の磁力計が完成して以

来空中磁気探査は物理探査の分野で花形となり、研究および探査事業の両面で活発な活動がつけられてきた。

1956年、米国のVarian社がプロトンの自由才差運動を利用する空中磁力計を開発すると、これまでGulf型式のFlux-gate型の磁力計特許におさえられていたわが国および使用許可をえて探査を行なってきた英・仏・独の各国で、核磁気共鳴現象を利用した空中磁力計の研究が活発となり、それぞれ独自の方式の核磁力計を完成し、空中磁気探査はさらに活発になってきつつある。核磁力計はFlux-gate型磁力計と比べて、方位保持装置を必要としないこと、温度の影響をうけないこと、ドリフトがなく絶対値の測定精度が高いことなどの特色がある。宇宙開発の時代に入った今日では、ロケットによる大気圏および宇宙空間の磁界測定とともに、空中磁気探査についての各国間の競争はますます激しくなりつつある。

空 中 磁 気 探 査 の 目 的 お よ び 特 色

空中磁気探査の目的は、短期間のうちに広大な面積の磁気図を作成することだけではない。地表探査とちがい、空中磁気探査では地球磁界の連続測定ができるという点で重要な意味をもっている。少なくとも、測線方向については連続記録がえられるため、測定値の内挿を必要としないので、測線上に存在する地球磁界の変化を見逃すことがないという大きな特色をもっている。もう一つの大きな特色は、地表にある建物その他の諸施設による磁気異常を避けることができることにある。磁気異常は一般に異常物体(磁気異常の発生源)よりの距離が増すにつれて急速にその振幅が減衰する性質がある。大まかな近似として、小異常物(双極子で近似されるたとえば球状物体)に対しては、中心よりの距離の3乗に逆比例して減衰し、1方向に伸びる物体(単磁極で近似されるか、または線状双極子源に近似される。たとえば円柱状の物体)に対しては、距離の2乗に逆比例して減衰し、2方向に広がりのある物体(線状単磁極で近似されるたとえば板状の物体)に対しては、距離の1乗に逆比例して減衰する。したがって測定する高度を高くとることによって、地表にある諸施設による磁気異常を除き、所要の地下構造による異常を抽出することができるという利点がある。このように空間フィルターを利用し、種々この高度についての連続記録をえ



第1図 構造の断面図

ることによって 地下構造に関係のある情報を直接求めることができることが空中磁気探査の利点といえる。

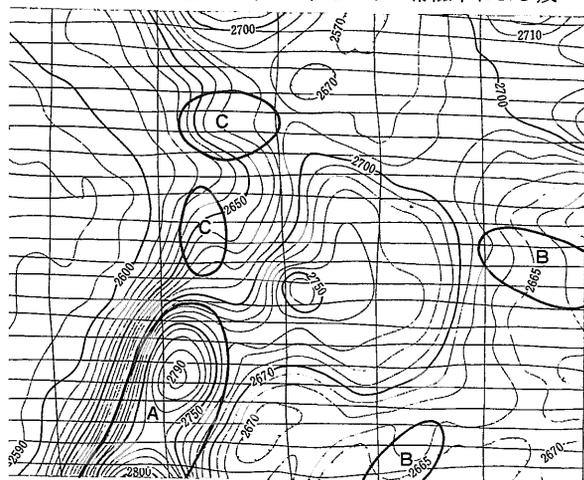
なお 地表では到達できない地域の探査を行なえることも空中探査の特色の1つであることはいままでもない。

石油・天然ガス鉱床探査への利用

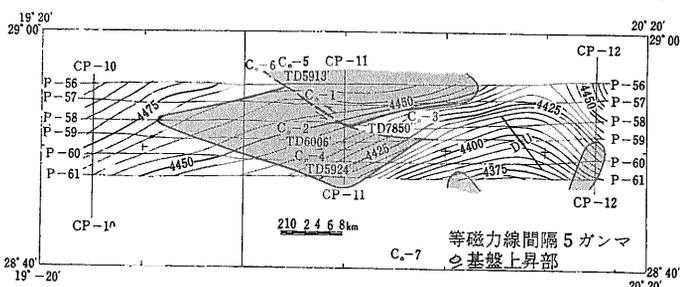
諸外国では 石油・天然ガス鉱床の探査に空中磁気探査が大へん多く使われているが それは地下構造解明の手段として使われているもので その考え方は次に述べるようなものである。石油・天然ガス鉱床の賦存する地域では 大まかにいって 堆積物は非磁性物質でできており そこに現われる磁気異常は基盤岩体の磁性の不均一によって起こるものとまず考えることができる。もちろん 地域内に火山岩および塩基性侵入岩が存在する場合には その厚さ 深度および岩体の形状にしたがって変化に富む種々の磁気異常があらわれる。堆積物の基盤岩体内の磁性の不均一 すなわち 帯磁率および残

留磁気の強さの変化は岩体の組成の変化を反映するものと考えられるが 一般に 基盤岩体内の組成の変化は岩相の変化に伴って起こるものと考えられるので このような原因で起こる磁気異常の分布は基盤岩体の構造 (たとえば 基盤岩体内にある構造を反映する場合が多い (第1図(A)). 基盤と堆積物との不整合面の深度が断層によって急激に変化する部分でも 同様な磁気異常が現われるが これは基盤岩と堆積物の岩相のちがいがその原因で 前に述べた場合(第1図(A))と類似の現象とみなされることができる。(第1図(B)). また 基盤と堆積物との不整合面に起伏がある場合にも 第一図(B)の場合の不整合面の深度の変化が連続的に該当し 磁気異常の原因となる。

ところで 堆積物と基盤との磁性鉱物の含有量の違ひすなわち 磁性のコントラストはわずかな値であるため 基盤の凸部および基盤内の岩相のちがひによって起こる磁気異常は 一般に 50ガンマ以下の小さな値しか示さない。また 基盤の凸部は第1図(B) (C)の破線より上部の基盤岩の部分による異常とほぼ同じ異常を呈するために 異常の大きさは数ガンマ~20ガンマ程度で その形状もノーズ状か または 磁気勾配が わずかに変化する部分か ある広がりをもって分布するというようなもので 余り明瞭な形状をもたぬことの方が多い(第2図(A) (B)). 第2図(A)の部分は基盤岩体内の組成のちがひ または 塩基性侵入岩体による顕著な異常であり 空中磁気図を一べつするだけで異常の形状をとらえることができるが 堆積物と基盤との不整合面の凹凸は空中磁気図上では 第2図(B)および第3図のような形であられる。このように 地域的磁気勾配のなかに基盤構造を反映する磁気異常がうもれた形であられるのは 地域的磁気勾配と基盤構造を反映する磁気異常の勾配とがオーダーとして余りちがわないことによるものとみなせる。第4図は 地球磁界の全磁力強度の分布図を参考までに掲げたもので 日本付近では 緯度方向に対して 1km 当り約9ガンマ (9γ/km) 経度方向では 1km当り約6ガンマ程度の変化がみられる。一方 上記のような磁気異常の幅 または 山と谷との幅は深度の2倍以上となるので 深度1km以上(測定高度よりの深度)で異常の振幅が数ガンマの磁気異常の勾配は地域的



↑第2図 空中磁気図の例【I】



第3図 空中磁気図の例【II】

磁気勾配と同じオーダーのものとなることが予想される。したがって この種の目的で行なう空中磁気図作成のためには 高感度でかつ連続測定が可能なものか または測定間隔がじゅうぶん短い測定装置を使わねばならない。

空中磁気探査用磁力計について

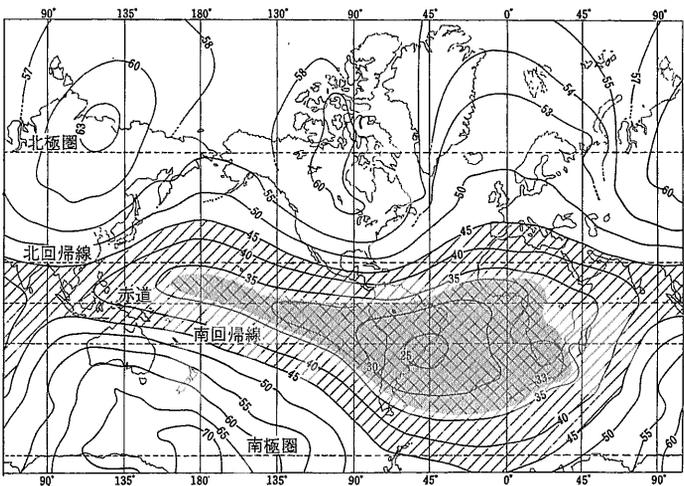
空中磁力計として使われる磁力計は (i) 航空機の動揺が測定値に影響しないか または その影響による誤差が測定精度以下であること、(ii) 高感度で かつ連続測定 ないし 準連続測定が可能であること (サンプリング間隔の充分小さいもの) が必要である。このような条件をみたすものとして われわれは米国のVarian社によって製作された V4914 型空中磁力計を選んだ。この磁力計は核磁力計(プロトン磁力計)の一種である。

プロトン磁力計は すでに知られているように プロトン(陽子 すなわち 水素原子核)の磁気回転特性を利用した磁力計である。すなわち 陽子は自転(スピン)に伴って磁気能率と角運動量とをもち そのベクトルは同じ向きをもっている。いま 外部より陽子に磁界が働くと 地球の才差運動(みそすり運動)と同様に 磁界の方向を軸とする才差運動を起こし(第5図) その才差運動の周波数 f_p は自転軸と磁界のなす角度に無関係で外部磁界の強さに比例する。さて 陽子 すなわち 水素原子核の豊富な供給源として 水または炭化水素の試料を考えると 正規の状態では試料に含まれる多数の陽子の合成磁化の方向は地球磁界の全磁力の方向をもっているが そのうちのいくつかの陽子が地球磁界の方位を向いているだけで 他のはそれぞればらばらな方位を向いている。そのために 全体としての磁化の大きさは検出可能な程度の才差信号を発生するほどに大きなものではない。いま 地球磁界より一段と大きく(約200倍 すなわち 100エルステッド程度) かつ これと直交する方向をもつ磁界を試料に加えると かなりの

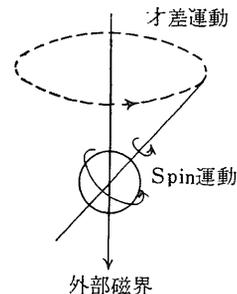
数の陽子は励起磁界の方向に整列する。そこで このよな励起磁界をじゅうぶんな時間加えて陽子はその方向に多数整列せしめておいたのちに励起磁界を除去すると これら多数の陽子は同一の位相で地球磁界のまわりに才差運動を行なうことになり 検出可能な程度にじゅうぶん大きな才差信号を発生する。この才差信号の周波数を測定すれば先に述べたように地球磁界の強さを知ることができる。ただ これまでの説明によってじゅうぶん想像がつくように 励起磁界を除去したのちは スピンとスピンの相互作用によって陽子の才差運動の位相は時間の経つにしたがって もとのようにばらばらとなるので 観測される才差信号の振幅も時間と共に減衰する。その減衰はほぼ指数的であって 才差信号の振幅が初期振幅の $1/e$ に減衰する時間を横緩和時間 T_2 (スピン-スピン緩和時間ともいう) とよんでいる。プロトン磁力計によって準連続測定を行なうためには 上記の励起時間と測定時間とをできるだけ短くすることが必要であるが 初期振幅は励起時間に左右される(縦緩和時間 T_1 すなわち スピン-格子緩和時間によって励起磁界の方位にスピンの整列する時間が左右される) ために 励起時間があまり短いとじゅうぶんな大きさの初期振幅がえられなくなる。したがって 測定精度を高める(S/N比をよくする)ためには 励起時間および測定時間はじゅうぶん長い方がよい。

Varian 社の V4914型 磁力計は空中磁気探査用として特に設計されたもので 測定間隔をじゅうぶん小さくし 準連続記録をえるため 試料は T_1 T_2 の小さい灯油 または灯油とモーター・オイルの混合を用いており 測定間隔および測定精度を試料の混合比を変えることによって調整できるようになっている(公称測定間隔は0.6秒 測定精度は0.5~1 ガンマであり これらの値は全磁力の大きさによって左右される)。測定間隔を 0.6 秒とした場合 航空機の対地速度を192km/時間(これは120

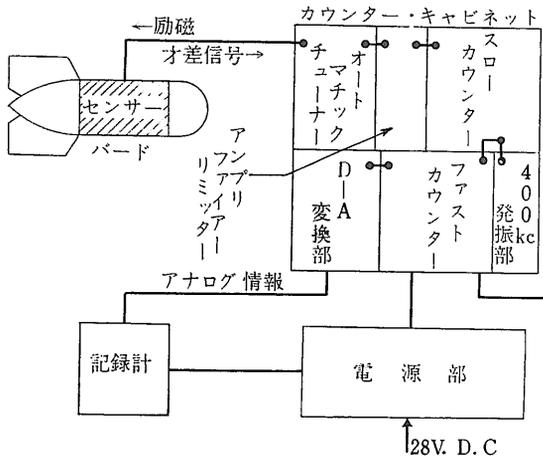
マイル/時間に相当し 空中磁気探査の規準対地速度とされている)とすれば 0.6秒は距離にして 31.8m(106フィート)にすぎない。通常 空中磁気図は5万分の1地形図を基本図とし その上に等磁



第4図 全磁力分布図



第5図



第7図 V4914 磁力計ブロック・ダイアグラム

力線が描かれるが 上記の31.8mは 5万分の1地形図上では0.63mmにすぎず 航空機の航跡の最終標定誤差より小さくなる。

V4914 空中磁力計では 全磁界の測定は512サイクルの才差信号 (スロー・カウンターで計測する) を水晶発振器によって発振された400キロサイクルの参照周波数をもって計測する(ファスト・カウンターを用いて行なう)ことによつて 才差信号の周波数を決定し これをD-A変換回路を通して記録計に書かせる方法で行なわれる(第6図)(第7図)。

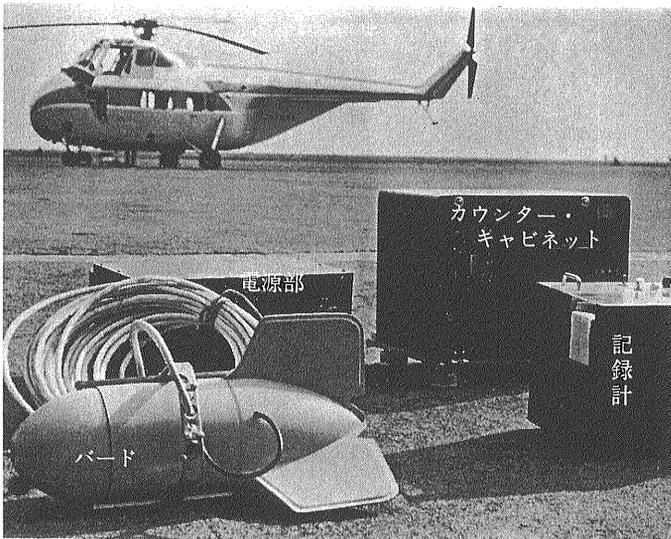
したがつて 磁力計の感度は全磁界の大きさに左右されることになるが 全磁界の大きさが約48000ガンマの区域(新潟付近)では約0.5ガンマである。なおこのような高度の装置であるため 磁界測定素子(センサー)に雑音消去回路をつけ さらに S/N比を向上させるため

に自動同調回路(オート・チューナー)が そなえられている。 航空機にのせた場合には 航空機のもつ磁界影響をうけると共に 航空機が発生する電磁界との誘導結合による雑音レベルの上昇をこうむることが予測されるためセンサーはプラスチック製のノーズ・コーンおよび尾部を前後にとりつけたバードに収め航空機より約18~30m降下せしめ これを曳航しながら測定を行う(第8図)。バードと機上の測定器とは2芯シールド・ケーブルでつながれているが 曳航時はバードに約50ポンドの張力がかかるので バードは切断力が約1000ポンドのナイロン・スリーブによって引く張られるようになっている。

空中磁気探査の方法

空中磁気探査の方法についての詳しい説明は 新潟地区の測定結果の取まとめを行なった上で述べることにしここでは概略を述べることにする。

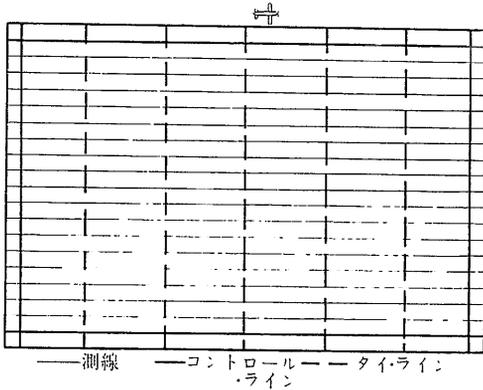
空中磁気探査の測定飛行の方法はその目的によつてちがってくるのであるが 鉱床探査の場合には おおむね対地高度150m~300m 測線間隔 250m~1kmであり石油・天然ガス鉱床探査のための構造調査の場合には海面上150m~2kmの高度で 測線間隔500~2kmで行なわれる。いずれの場合でも 測線間隔は2km以上に広げることが好ましくない。地球磁界は常に時間と共に変動しているために それぞれの測線を飛行している時刻に対応する基準磁界は同じではない。地球磁界の時間的変動による影響を消去して すべての測線の測定値



第7図 空中磁気探査器機類



第8図 バードを曳航して測定を行なう

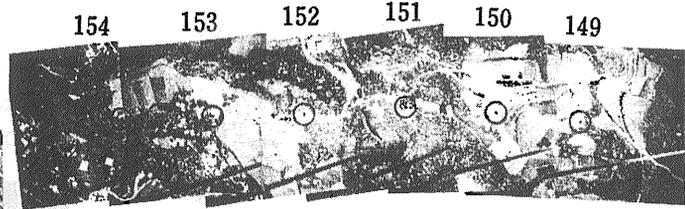


第9図 測線 コントロールライン タイラインの配置を同一の基準磁界に対応する値に換算するためには 通常 探査区域を20km~30kmの正方形の区域に分割しこれを囲んでコントロール・ラインを配置する。コントロール・ラインは磁氣的に静穏な時刻を選んで測定を行ない 同一基準磁界に対してコントロールライン上の値を決定する。この外 測線に直交するタイ・ラインを 5~8km に設け 測線上の測定値に介入する磁界の時間的変動の影響をチェックすると共に コントロール・ライン上の測定値に介入する磁界の時間的変動の影響をチェックする。タイ・ラインおよび測線とコントロール・ラインとの交点でのコントロール・ライン上での値にタイ・ラインおよび測線上での測定値を換算すれば 全測線

および全ライン上の値はすべて同一の基準磁界に対応するものとなり このようにして作成された空中磁気図は磁界の時間変動による歪みをうけないものとなる(第9図)。コントロール・ラインおよびタイ・ラインは局部的異常が発達しない部分に設定することが望ましいので 必ずしも正確に区域の周縁に設ける必要はない。

これらの航跡の標定は 35m/m フレーム・カメラによって機上より対地撮影を行ない(第10図)。写真の焦点を1万~3万の空中写真簡易集成モザイク上に転写したのち(第11図) さらに5万分の1地形図上に標定(第12図)する方法によって行なわれている。この方法はもっとも簡便なものであるが 基本図のない場合 または地物の判読が困難な場合には 電波測量法が使われる。第13図は第12図に記した測線に対して得られた記録であり 第14図はこの記録よりつくられた全磁力の変化図である。

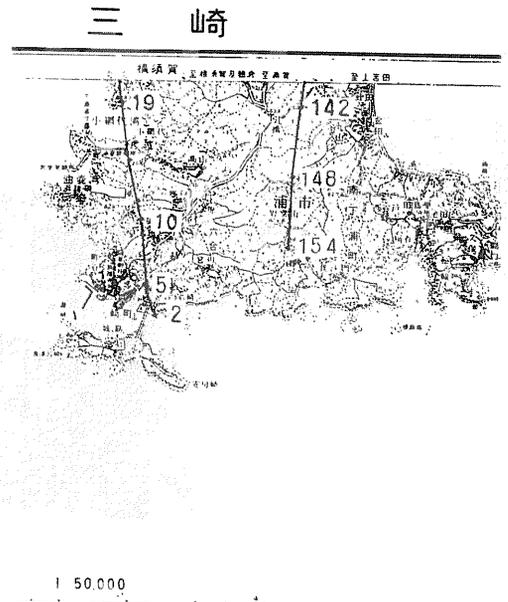
(筆者は物理探査部)



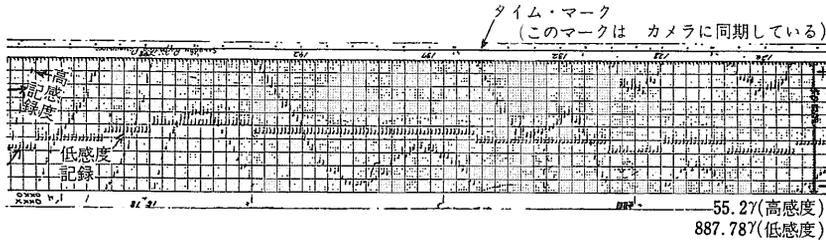
第10図 35mm フレーム・カメラによる対地撮影結果とその地物集成モザイク(手札型)



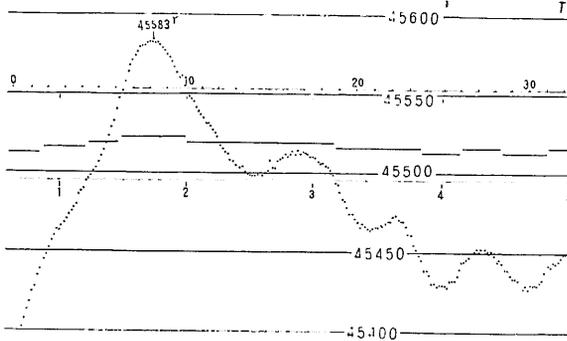
第11図 撮影されたフィルムの焦点は1万分の1空中写真へ移写される



第12図 5万分の1地形図へ航跡が標定される(標定は約1kmごとに行なわれる)



第13図 空中磁気測定記録



第14図 全磁力変化図



第11回太平洋学術会議のお知らせ(第3回)

1964年4月地質ニュース 116号でお知らせした以後太平洋学術会議についての準備状況は次のようである。

1965年4月7日大阪で地質部門の委員会が開かれその席上学会後の見学旅行の計画内容が紹介された。その計画によれば地域別に6班にわかれるが生物学・地学・人類民族学各分野の合同旅行が原則となっている。しかし途中より分野別に見学個所が多少ことなるところもある(以下の内容は地質部門のみ)

- IV 近畿班 (第1日) 東京—名古屋—新宮
(約300名 第2日) 新宮—湊八丁—白浜
池辺展生他) (第3日) 白浜—東和歌山—大阪
(第4日) 大阪—二上山—京都
(第5日) 京都—比叡山—京都(解散)

- V 中国・ (第1日) 東京—広島
四国班 (第2日) 広島—柳井—道後温泉
(約100名 児島丈児他) (第3日) 道後—別子—新居浜
(第4日) 新居浜—高松—岡山
(第5日) 岡山—新見—倉敷—岡山(解散)

- VI 九州班 (第1日) 東京—福岡
(約200名 (第2日) 福岡—長崎—雲仙
森本良平他) (第3日) 雲仙—三角—阿蘇
(第4日) 阿蘇—別府
(第5日) 別府付近(解散)

- I 北海道班 (第1日) 羽田—千才
(約100名 (第2日) 札幌—神居古譚—旭川—
世話人 近文—層雲峽
渡辺武男他) (第3日) 層雲峽—札幌—洞爺湖
(第4日) 洞爺湖—昭和新山—登別
(第5日) 登別—樽前山—千才(解散)

- II 東北班 (第1日) 上野—仙台—松島
(約100名 (第2日) 松島—松川—松尾鉱山—八幡平
竹内常彦他) (第3日) 八幡平—十和田湖
(第4日) 十和田湖—湯瀬温泉
(第5日) 湯瀬—小坂鉱山—大館(解散)

- III 中部班 (第1日) 東京—松本
(約100名 (第2日) 松本—黒四ダム—富山
小林国夫他) (第3日) 富山—立山—神岡鉱山
(第4日) 神岡—富山
(第5日) 富山—名古屋(解散)

野外見学用の案内書は各班の世話人が主となって作り地質調査所としては随時これに協力することおよび地質部門の外来参加者の東京における種々の行動に便宜を供与することになった。

すでに海外の研究機関のみに対しては内容予告(Preliminary announcement)と招請状が送られたが個人に対しては未だ連絡は行っていない。

目下各シンポジウムの内容決定に仕事の重点がおかれており外来講演者の決定および各個人講演受付については41年予算規模が明らかになる今年秋ごろになる予定である。(松井 寛・徳永 重元)