

地質分野における電算機利用の現状

小川 克郎・津 宏治

第一期は地質学的データの統計処理にみられるように地質学における主要な仕事である記載・分類といった作業の客観化・効率化を目的とした利用法の発展期である。

第二期は地質現象のシミュレーションに見られるように数学的手法の導入によって地質学の分野での新しい研究の領域を創造してゆこうとする積極的な利用法の発展期である。

このような分野は数理地質学 (Mathematical Geology—同名の雑誌が1969年より発刊されている) とよばれている。この分野は歴史は新しいが将来の発展を大いに期待できる。

地球の表面に近い部分 (地表から数千メートルの深さまで) 一いわゆる地質学的現象として取り扱われている地球の部分—の地下構造を地球物理学的 (すなわち物理数学的) 手法で調べる学問の分野は “物理探査” と呼ばれている。この分野は 目的を地質現象の解明におく という意味で 広い意味での地質学の一つの分野であるといえよう。物理探査では地球物理学と同じく電算機の利用は日常化している。

本稿では §2で地質分野 (物理探査を含めて) における電算機利用を “データの流れ” という視点から要約し次いで §3ではその幾つかの例を示し最後に §4では電算機を中心として 観測・測定システムが組み立てられている近代的な地質調査の例として 地質調査船と空中磁気探査の例を紹介することにしよう。

§2 地質調査におけるデータの流れと電算機の役割

地球を調査・観察の対象として さまざまなデータを収集しこれに基づきさらにこれを解釈する理論を導くことによって地球の現在の姿やまた過去～未来の移りゆく姿を明らかにすることが地学の仕事であるにちがいない。このような作業の過程を一般化して示したのが第1図である。地質学における電算機の利用方法を 作業過程におけるデータの流れという視点からこのように分類することもできるだろう。

① 調査計画の設定と準備

調査は まず目的の設定と それにみあった計画の立

§1 はじめに

地質調査所でも最近ようやく電子計算機導入の気運が高まり 導入委員会の発足をみて 委員である著者は電算機メーカーと折衝することになったが ここで意外な現実に出会うこととなった。すなわち メーカーの営業マンはまず最初に 次のような質問をするのである。

“地質にどうして電算機が必要なのですか? どうもピンとこないのですが”

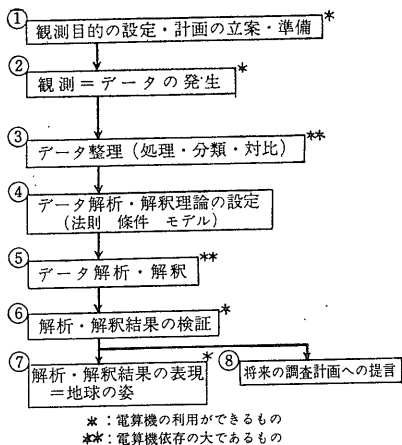
著者はこの質問に当って 当初は当惑の外なかったがよく考えてみると 人々が地質学を電算機から最も縁の遠い学問の分野とみなしている事情も解らなくはない。地質学といえば ゲートル巻いて リュックを背負ってトンカチ片手に 山深く石を訪ねてさまよう男の姿が人々の心象であろうからである。

そこで著者は 山なす電算機の出力表や一番長いプログラムをとり出して 地質の分野でもいかに電算機が多量に使用されているかを説明することになる。そして “これはだまされているのではない 商売になる” と安堵と緊張の表情が彼等にあらわれたところで はじめて本題に入ることになるのである。

このような体験を経た著者は 本紙をかりて地質分野における電算機利用の現状を紹介し またいささかの将来の展望を述べることによって こうした誤解 (?) を解いておきたいと願うものである。

地学 (地球科学) の分野はひろく 地震学をはじめとする地球物理学のように物理数学的手法をおもな手法とししたがって電算機利用によって学問自体の大きな変革をすでに経験した分野もある。一方地球の比較的浅い部分を学問の対象とする地質学では その用いる手法が伝統的に数学的ではないということもあって 電算機利用は比較的遅れていたといえよう。しかしこの分野でも近年電算機普及とあいまって 数学的手法の導入にめざましいものがある。地質学における電算機利用の歴史は 次の二つの発展の段階に分けられよう。

すなわち



第1図 地学における作業の一般的な流れ

案に始まる。石油の探鉱のように調査計画のシステム化の進んでいる分野では 計画自体が電算機によって制御されているが 一般にはこの段階における電算機の利用は 作業の準備に限られる。たとえば 海洋調査におけるナビゲーションチャートの作成計算などがその一例である。

② 調査・観測

野外あるいは実験室で調査・観測が始まる。近代的な物理探査におけるデジタル型磁気テープ（以下磁気テープ）へのデータの集録や実験室におけるオンライン処理にみられるように 電算機と直結したデータ集録システムを採用する事例が各方面で急増しつつある。

③ データ整理・処理・分類

集録されたデータは アナログ形式であれば A-D（アナログーデジタル）変換器あるいは人間の手でデジタル化されるし デジタルデータであれば必要に応じて編集（磁気テープの編集等）される。つづいて各種の補正計算*⁶（第1表）がほどこされ それが平面的に分布するデータであれば図化*¹される。またデータから所望する特定の特徴（周波数成分）だけを選択的に抽出したり ノイズを除去するために行なわれる傾向解析（Trend Analysis）*²を始めとするフィルター処理もこの段階で行なわれる。その他にデータの分類・同定・検索が行なわれりする*^{3,4}。

近年とみにデータ発生速度の高速化しつつある物理探査においては その膨大なデータを短時間で処理するためには この段階での電算機の利用は今や不可欠であるし またそれはほとんど例外なく電算機化可能であり したがってその実績も豊富である。またこの段階です

べての処理の終わるデータも少なくない。

④ データ解析・解釈理論の設定

データを解析・解釈する理論を設定する。解析に用いる物理・化学法則とその数値解法 境界条件・初期条件のような条件 および対象とする地球の部分のモデルの設定からなる。

地質学における地質現象の時間的変化を追跡する動的シミュレーション（Dynamic Simulation）*⁷や 物理探査における重力値・磁力値・熱流量のような観測値を合理的に説明し得るような地下構造を求める 静的シミュレーション（Static Simulation）*⁷などにおける理論設定などがその代表的なものである。

⑤ データの解析・解釈

④で設定された理論に基づいて計算を実行する。これらの計算では一般に収束演算が多く したがって長い計算過程を必要とし 電算機なくして考えることのできない作業である。

⑥ 解析・解釈結果の検証

⑤で得られた結果が他の地質・地球物理学的資料と矛盾しないかを検証する。この検証自体が④ ⑤の過程に含まれている場合もある。他の資料を選びだすために情報検索を行なうこともある。

⑦ 解析・解釈結果の表現

解析・解釈された結果は 何らかの方法で表現する必要がある。たとえば それが図面であれば計算機による図化が用いられる*¹。

⑧ 将来の調査計画への提言

以上の結果から将来の調査計画への提言が行なわれる。

§3 電算機利用の幾つかの例

本章では地質学（物理探査を含めた広義の）における電算機の利用の幾つかの例を紹介するとしよう。第1表は利用例を計算内容 目的 適用分野に区分けして示したものである。以下順次この表に基づいて説明を加えることにしよう。

地質学での電算機利用については 米国の地質学者グループによる二冊のテキストが出版されている。[Harbough & Merriam (1968) Harbough & Bonham-Carter (1970)]. これらはこの分野での最近の活動を知るに

第1表 地質・物理探査における電子計算機の利用例

項目	例	分野	計算方法	文献番号
*1 自動図化	磁気図 等層厚線図の図化	地・物	最小二乗法 (多項式 フーリエ級数)	1 2
*2 フィルター計算及びフィルター設計	坑井データの傾向解析 背斜軸 向斜軸の抽出 (傾向面解析) 重力図・磁気図の周波数解析 反射法地震探査における多重反射の除去	地 地 物 物	多項式 フーリエ級数 平滑化関数 2次元多項式フーリエ級数 たたみこみ積分 フーリエ変換 チェビシ ェフ変換 逆たたみこみ積分(デコンボリューション)	1 2 1 2 20 27 22 23
*3 分類・対比・相関	岩石の同定・分類・対比 地震発生の要因分析	地物	要因分析 "	1 17 18 19 20 16
*4 情報検索	化石 坑井の検索 岩石磁性データの検索	地物	ファイル "	1 28
*5 分析値処理・解析	ノルム計算 残留磁気測定値の処理 鉱物の結晶解析	地物地	解析計算 " "	
*6 データの補正	重力値のブーゲ補正 磁力値の日変化補正 反射法地震探査の諸補正	地 地 地	解析計算 " "	25 21 27 22 23
*7 シミュレーション 静的シミュレーション 動的シミュレーション	磁気・重力異常よりの地下構造解析 堆積盆の形成過程 自然-生態システムの進化 岩石の破壊過程 岩石の風化・統成・変質過程	物 地 地 地 地	非線形最小二乗法・モンテカルロ法 微分方程式の数値積分 " " + モンテカルロ法 " " 微分方程式	10 11 12 3 3 4 5 9 6 7 8
*8 観測・処理システム	地質調査船のシステム 反射法地震探査システム 空中磁気探査システム	物 物 物	多種 " "	24 25 22 23 12 26 27
*9 グラフィックディスプレイの利用	重力・磁気異常よりの地下構造解析 反射法地震探査における速度解析	物 物	ポテンシャル 図形処理 最小二乗法 モ ンテカルロ法 解析計算 図形処理	14 15 13

(注) 地:地質 物:物理探査(地球物理)

第2表 HARBOUGH et al. (1968) の目次

- 2 Information System (情報システム) ファイルシステムを含む
- 3 Mapping Techniques (図化の技法)
- 4 Time-Trend Analysis (時間傾向解析)
- 5 Polynomial Trend Analysis (多項式による傾向面解析)
- 6 Harmonic Trend Analysis (調和函数による傾向面解析)
- 7 Classification System (分類システム) 因子分析法を含む
- 8 Simulation (シミュレーション)

はよいテキストである。 参考のために前者の目次を第2表に掲げておこう。

第2表の7つの項目は 現在地質学で用いられている電算機利用の手法をほぼ網羅しているといえよう。 また これらの手法はいずれも物理探査においても普段に用いられている手法でもある。 たとえば 著者の携わっている物理探査の一種である空中磁気探査においても3)~8)のすべての項目にわたって何らかのプログラムが用意され その多くはルーチ的に用いられている。

以下第2表の各項目に順じてその内容をやや具体的に述べることにしよう。

1) 電算機による図化 (Automatic Contouring)

重力値・磁力値のような 地球物理学的図面や構造図 (Structural Map)・岩相図 (Lithofacies Map)・等層厚線図 (Isopachous Map)・地化学図 (Geochemical Map) のような地質・地化学的図面は 平面的に分布している数値データの表現法として普遍的に用いられている。

熟練者による手書き図面は美しいものであるが 測定装置の近代化に伴うデータ量の膨大化 (物理探査では一回の調査で10万点を超える測定値を得ることも珍らしくない) とこれに伴う膨大な作業量となりつつある図化作業の省力化 (時間 労力 経費) は 電算機による図化を必要不可欠なものとした。 また図化の電算機化は従来個人差の大きかったデータ点間内挿を特定の数学式によって定式化 (必ずしも客観化ではない) し得るに到らした。

データ点 (測定点) からコンター (等高線) を描くに当っては まずデータ分布域に正方格子網を適当に設定してその格子交点の値 (格子点値) を適当な内挿法を用いて決めてやる (ステップ1)。 次いで この格子網をさらに幾つかの小格子群に分割し 小格子点値を先きに求めた格子点値から内挿する (ステップ2)。 これはコ

第3表 自動図化におけるデータ内挿補間法

最小二乗法補間 (Surface Fitting)	多項式回帰解析 (等重み 不等重み)
	フーリエ級数
次補間	小格子点間補間
	三角形網による測定データ間補間*

* 例外的手法

ンターを滑らかに表現するために行なり。最後にコンター位置を小格子点間で一次補間してコンターを描く(ステップ3)。この他にラインプリンターで描くコンターもしばしば用いられる。特定のコンター幅に対応した記号でコンターが示される。この場合ラインプリンターの印刷の都合で縦横のスケールが異なることが多い。また静電式プロッターを用いた場合にはコンタ

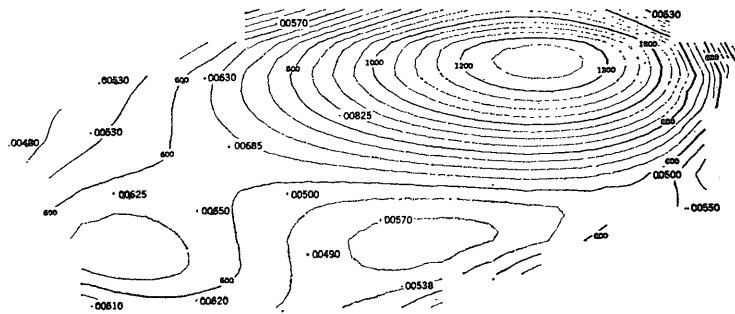


```

CALL PLOT (XXA,YYA,IPEN)
IPEN=2
IF (LL.EQ.NPL) GOTO 9991
9999 CONTINUE
9991 CALL PLOT (XXB,YYB,IPEN)
C RETURN TO AUTOCONP
IF (IFH.EQ.0) GOTO 341
N=1
CALL HATCHIN (N,NPL,0.2,0.6,CVAL,HMAX,HMIN,KIND)
341 RETURN
345 IHALF=LF=NPL/2 $ LS=1
346 IPEN=3
DO 350 L=LS,LF
CALL PLOT (PX(L),PY(L),IPEN)
IPEN=2
350 CONTINUE
IPEN=3
    
```

第2-a図 自動図化の例 (石狩-礼文海域空中磁気図 本図は2-b図に示すようなフォートラン言語ですべて描かれる) (地質調査所 1971)

第2-b図 空中磁気図の図化に用いられているフォートランによるプログラム(部分) (“CALL PLOT”の部分がペンを走らせる命令である)



第3図 不規則分布データの最小二乗法による図化例 (HARBOUGH et al. 1968)

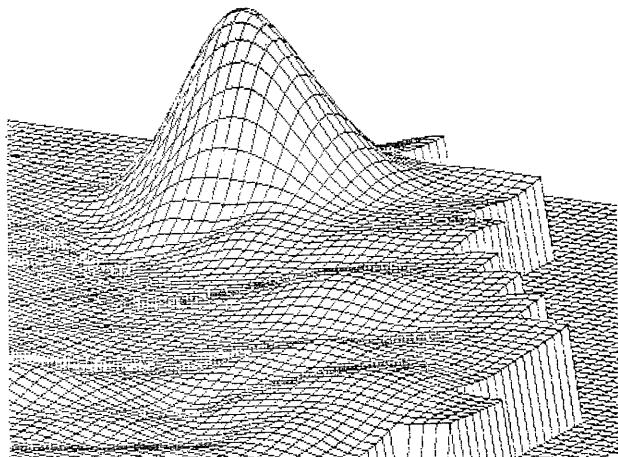
一を模様で描き分けることもできる。その他にコンターを鳥瞰図の形に描くこともある。さらに二つの視点の異なる鳥瞰図を用いてコンターを立体視することもできる。

第3表にデータの内部補間法を分類して示した。また第2～5図に自動図化の幾つかの例を示した。

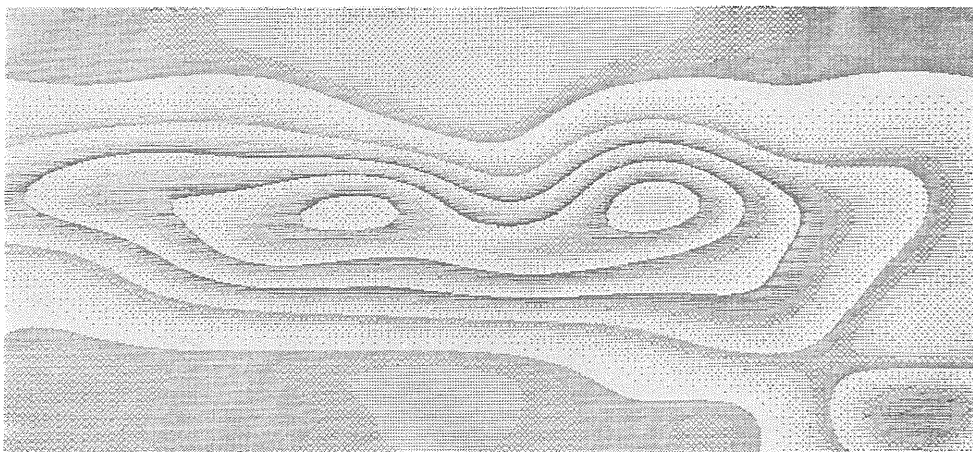
2) 傾向解析 (Trend Analysis)

(イ) 時間傾向解析 (Time Trend Analysis)

今ここに幾つかの坑井で測定されたデータ (密度孔隙率 電気抵抗 帯磁率等) があるとす。ある特定のデータに基づいてこれら坑井間の地質層序を関係づけることにする。ところで 測定値は一般に各地層のもつ一般的・有意かつ大きい変化 (傾向) と局所の変化 (ノイズ) との混じり合った複雑な分布を示すものである。今 後者をランダ



第4図 鳥瞰磁気図 (指定した視点から立体的に見た磁気図 この場合静電プロッターを用いている)



第5図
濃淡表示磁気図
(静電プロッター
で描いた濃淡表
示による磁気図)

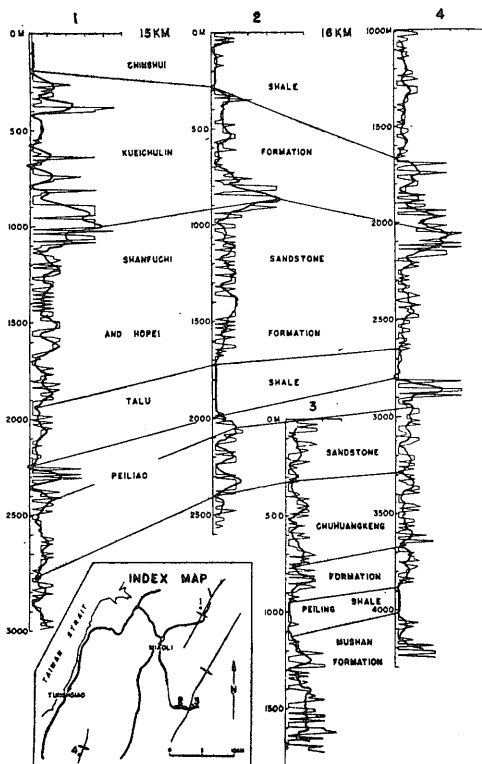
ムな分布であるとすれば 測定値にある種の平滑化を施すことによってこれを除去することができ したがって地層本来のもつ傾向 (Trend) が浮びでてくるはずである。第6図は4本の坑井における 岩石の粒径 (Grain size) の測定値に平滑化を施すことによって各地層のもつ粒径の傾向を選択的に抽出し これに基づいて坑井間の層序の相関をとった例である。周期の短い変化を示す粒径分布から 各地層のもつ個有の特徴が周期の長い変化として浮び上がってきていることがよくわかる。このように時間傾向解析は時系列的あるいは1次元空間系列的に変化するデータに対して用いられる。

(ロ) 傾向面解析 (Trend Surface Analysis)

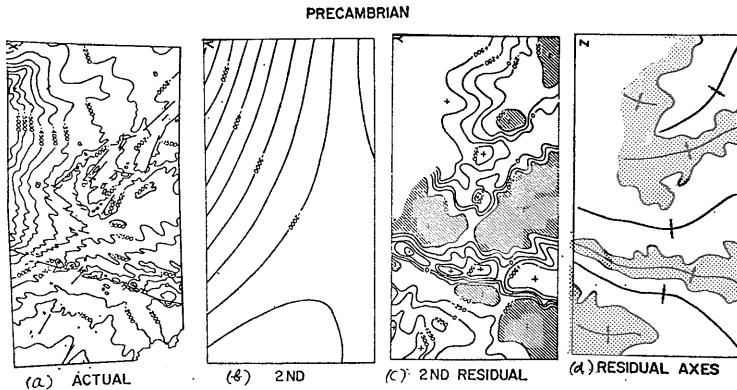
今度は平面的に分布する測定値 (物性・化学分析値 等層厚線・岩相・重力図・磁気図等) から平面的な傾向 (Trend Surface) を選択的に抽出する。

ある量に着目した時その量の分布が特定の地層の個有にもつ有意かつ大きな変化 (傾向面) とランダムに分布する局所的ノイズとの和であるとすれば 時間傾向面解析の場合と同じく 測定値に平面的平滑化を施すことによって ノイズを除去できる (また別な観点に立てば ノイズの方がある種のシグナルである可能性もあることに注意)。この平滑化には 平滑化フィルターの他に 2次元多項式や2次元フーリエ級数等による最小二乗法的平滑化法が通常用いられる。多項式やフーリエ級数の場合には むしろノイズ (局所的变化) の方がある種のシグナルとみなして抽出する場合に用いられることが多い。第7図には Kansas 州における Precambrian の頂部深度分布図 (7-a) に対して2次の多項式を用いた傾向面解析を行ない その回帰面(7-b)及び残差 (7-c) —測定値から2次回帰面を差し引いた残り—及び残

差からよみとれる局所的なおもな構造傾向(背斜 向斜) (7-d)をそれぞれ示す。この場合 むしろ残差がおもに使われている。残差はこの地域の Precambrian 頂部のおもな傾向面 (8-b) からの偏差を表わしており 正值の部分は相対的な隆起に 負値の部分は沈降に一致するからである。このように 全体的にゆるやかに変化するバイアスがかかっている判読しにくい図面(7-a) が 傾向面解析によって判読しやすい図面 (7-c) に変



第6図 時間傾向解析を坑井データの対比に用いた例 (HARBOUGH et al. 1968) (細線は測定された堆積岩の粒径分布 太線は傾向解析によってノイズが除かれた粒径分布を示す)



第7図
地層の等深度面への傾向面解析の応用例
(HARBOUGH et al.1968)

- a) カンサス州プレカンブリアン層の頂部深度分布図
- b) a) に2次元2次多項式をあてはめてえた回帰面
- c) 傾向面の残差 $[= a) - b)]$
- d) c) を用いて描いた構造の軸 ←→ 背斜
→← 向斜

換されていることが明らかであろう。

傾向解析はいうまでもなく 地震波や重力・磁気値のような地球物理学的のデータに対して常用されているフィルターの一種である (第1表)。

3) 分類・同定・対比・検索

“地質学分野では 層序 鉱物相 化石 岩石等の分類は常に重要な課題である。これら(層序等)は常に漸移的であるが 地質学者はこれら連続体を不連続なカテゴリーに分類する必要がある。分類とはこのように人為的なものである。メンデレーエフの周期律表がその後の精密化をまったにしても 原子構造の概念を導くことに多大の影響をもったことを思い出すべきである” と HARBOUGH (1968) は述べている。

実際 地質学や物理探査の分野における分類はその重要さの認識が深いにもかかわらず 個人の判断にまかされている面が多く 電算機を用いた数学的分類の方式は試案の域を出ないのが現状である。

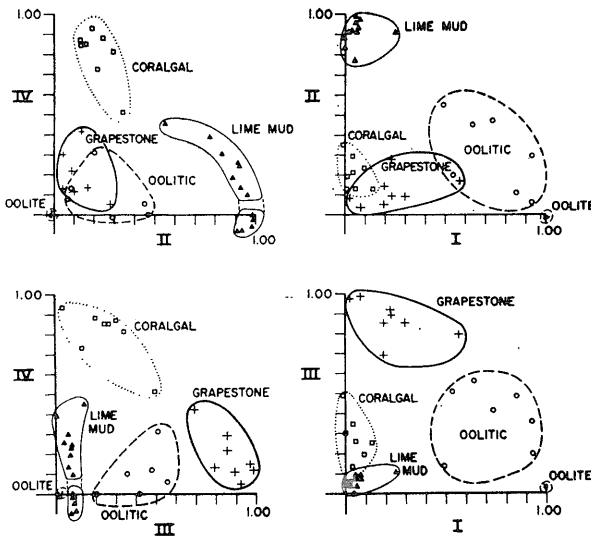
分類に用いられる数学的手法としては 一般に要因分析法 (Factor Analysis) 群集解析 (Cluster Analysis) をはじめとする統計的方法が用いられる。これらの手法では ある測定値と一定の基準値あるいは他の測定値との類似の程度をある基準に従って定量的に表現しようとするものである。

第8図はある地域の40個の堆積岩をその組成によって5つのグループに分類し 次にそのグループ間の関係を組成に基づき要因分析した結果が示されている。この結果 図のように各グループは4次元的な factor loading (芝1967 における構造ベクトルに対応) と呼ばれる座標軸の中で鋭く分離され これによって上の分類法が妥当であったことが証明されている。

また分類することは同時に同定・対比を行なうことでもあり またある種の信頼性を検定することでもある。たとえば 物理探査においてある測定値からさまざまな方法で解析した地下構造を概知の地質構造(坑井データ等) と要因分析法等を用いて対比し その結果から解析法の信頼性 あるいは妥当性を定量的に検定すること(小川 1972) などはその一例である。

要因分析法は 地震予知などの災害科学へ適用(杉山等1970) されているのを始め 今後のあらゆる分野で広範に用いられるであろう。

分類の延長線上に情報検索が考えられる。地質学においても 化石や坑井資料のような収集されている膨大なデータの中からある特定の情報を取り出したい場合がしばしばある。これを電算機で行なわせる場合 化石



第8図 The Great Bahama Bank の現世堆積物の要因分析 (HARBOUGH et al. 1968) (この堆積物は組成の要因分析によって次の五つの相に分類された)
1. Oolite 2. Oolitic 3. Grapestone
4. Lime-mud 5. Coralgal

大地域区分コード	大地域名	国名コード	国名	鉱業所コード	鉱業所名	海陸区分	地域コード	地域名	坑井名コード	坑井名	坑井番号	検鏡年月日	調査者名	会社名コード	会社名	深度	サンプルの重量	サンプルの種類	岩質	FAMILY NO.	FAMILY NAME	GENUS NO.	GENUS NAME	SPECIES NO.	SPECIES NAME	SUBSPECIES NO.	SUBSPECIES NAME
2	6	2	5	2	7	1	2	6	4	6	4	6	2	3	15	4	3	1	2	3	10	3	10	5	10	1	10

第9図 坑井の有孔虫記録のコード化例(石油開発公社 1969)

第4表 地学におけるシミュレーションの分類とその例 (HARBOUGH 1970 よりアレンジ)

	静的モデル	動的モデル
決定論的モデル	重力値・磁力値よりの地下構造の解析 *10 11 12	デルタ堆積作用*3
確率論的モデル	多数の坑井データによる油層の評価 *3	海洋性堆積作用と有機物の関係 *3 5

* 分岐番号

や坑井の情報を分類整理し 後でさまざまな要求に応じた取り出しができるように 上手にコード化することが重要である。

第9図は坑井の有孔虫記録のコード化例である。たとえば「秋田県下の全坑井に基づき有孔虫Aの分布上限深度を等深度線としてコンター間隔 500m 縮尺50万分の1で図化せよ」という問題には このようにコード化されて電算機にファイルされている情報を検索し 次いで自動図化することによって すべて自動的に電算機が回答してくれる。地質学・物理探査いずれの分野でも電算機による情報の管理は 今後の課題であろう。

4) シミュレーション

(イ) シミュレーションの分類

これまでデータの整理を中心として電算機の利用方法を述べてきたが 本項ではデータの定量的解析・解釈の考え方にふれる。前にも述べたように この段階での主役はシミュレーションである。

シミュレーションは ある現象をまねる (simulate) することであり 地学におけるシミュレーションは第4表のように分類される。

シミュレーションは 決定論的モデル・確率論的モデルと静的モデル・動的モデルの組合わせによって分類することができる。決定論的モデルとは解を規定する要素が決定的であり任意性を有しないことを意味し 確率論的モデルとは それが任意性をもちながらもある確率関数として定義されていることを意味する。静的モデルではプロセスは時間的に変化しないことを また動的

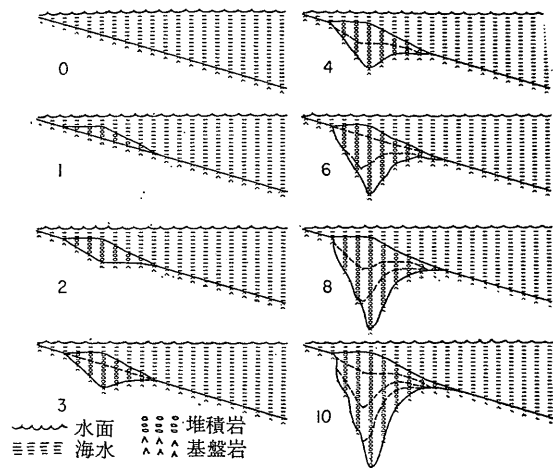
モデルはそれが変化することを意味する。

(ロ) 地質学におけるシミュレーションの例

一 堆積盆の形成過程の動的シミュレーション

この分野では HARBOUGH をはじめとする米国の地質学者グループによる精力的な仕事がある。これは最近まとめられて出版された (HARBOUGH et al 1970)。ここでは 堆積作用のシミュレーションをはじめとしてさまざまな地質現象—たとえば岩塩ドームの形成過程有限要素法による岩石・地層の応力場解析 貝の生態学—がプログラムを折りこんで論じられている。その一部を紹介しよう。

第10図は 比較的簡単なプロセスを仮定した場合の河口付近における堆積作用のシミュレーションの例を示す。図の左から右へ一様に傾斜した基盤面上へ左端の河口から 一定速度で砂が供給されている。この砂は基盤面上へ堆積するが この堆積の量は河口から遠ざかるにつれてある一定の形式で減少するものとする。また堆積作用は砂と基盤岩の間で静水圧平衡を保ちつつ しかも海底面(堆積層の頂部)がある一定の水深より上に来ることはないという条件の元で行なわれるものとする。この図では このような条件下での堆積盆の形成過程が



第10図 堆積盆形成過程の動的シミュレーション (HARBOUGH et al. 1968)

一定の時間間隔毎に示されている。このモデルはやや単純に過ぎるが、しかしデルタにみられる異常堆積が一応シミュレートされていることは明らかである。地質学におけるシミュレーションの可能性を示すものとしては、これはわかりやすい例であると思われる。

堆積盆地 特に海域に分布する堆積盆地の物理探査に携っている著者にとっては、この例は特に興味をそそられるものである。すなわち物理探査(地震、重力、磁気等)データおよび抗井データによって知られる海域の地下構造を合理的に説明し得る堆積作用のプロセスを見出すことによって、このプロセスを支配する理論(法則・条件・モデル第1図④)を求めることが可能であろうからである。

なおシミュレーションの過程に物理探査データ(重力)を取り入れた例として、岩塩ドームの形成過程が本書に述べられている。また堆積作用についてはこれを山→河川→海→堆積の一連の岩石の輸送の過程とこれに地殻変動及び生物相の分布変化とをからませたトータルな自然のシステムの中でとらえるシミュレーションが(SHIMAZU et al 1970)によってこころみられている。

その他に地質現象のシミュレーションの例として二、三の例を次に簡単に紹介しておこう。

- 岩石の風化・続成・変質過程のシミュレーション (水谷他 1971, MIZUTANI 1970)

岩石の風化変質、熱水変質などの変質過程をこれまでのような平衡論の立場だけからではなく、反応速度論的な立場からシミュレートしている。

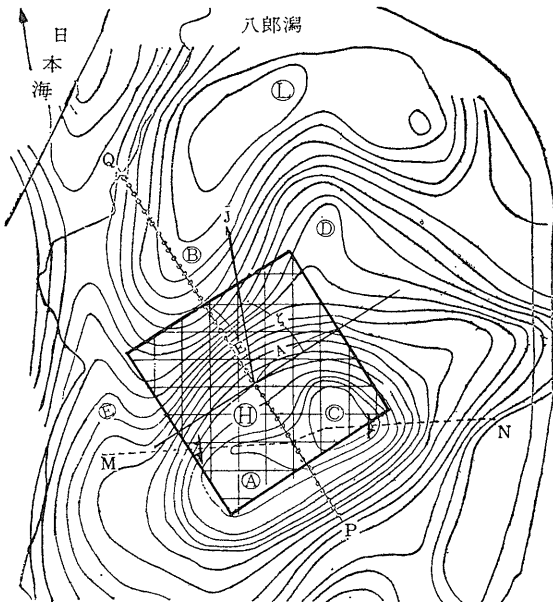
- 岩石の破壊過程のシミュレーション (HATTORI et al. 1971) 非静水圧的圧縮下での層状岩石の破壊過程をシミュレートしている。岩石が弾性定数の異なる微細な立方体の集合であると考えて、立方体の弾性定数を確率関数で与えた結果破壊は“まよい歩き”の形で進行する。従来の岩石資料を用いた破壊実験を電算機で実験(数値実験)してみたものである。

地質現象の電算機によるシミュレーション(デジタルシミュレーション)は、特に最近の5ヵ年間に著しい発展をみせつつある。これは大学、研究所においてのみならず、石油会社や鉱山会社においても資源探査の新しい手法としてもとり入れられつつある。

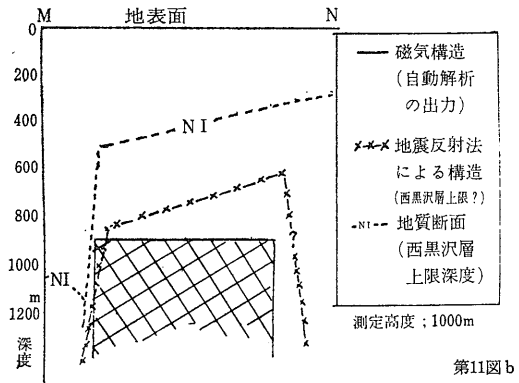
(ハ) 物理探査におけるシミュレーションの例

—磁気異常から地下構造を求める静的シミュレーション—
次に著者の携わっている磁気探査において、磁気異常(あるいは重力異常)から地下構造を求める場合に用いられる静的シミュレーションについて紹介しよう。

磁気図(第2図はその一例)に示される磁気異常は地下の磁氣的構造のレスポンス(応答)であると考えることができる。地球磁場のようなポテンシャル場ではレスポンスから地下構造を求めるには、地下構造を特定の形状に抽象化(モデル化)しておき、しかる後このモデルの形状(地表からの深度・岩体の幅・長さ・傾斜・



第11図 a



第11図 b

第11図 空中磁気異常分布から静的シミュレーションによって求めた地下構造(秋田県八郎潟の例)

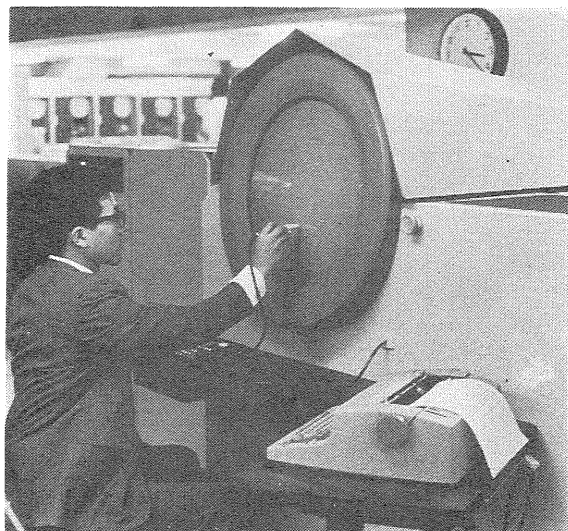
- a) 磁気異常図および計算された貫入岩体の平面形状(網目模様)
- b) a) の M-N に沿った断面 貫入岩体(網目模様)は地震反射法によって得られた構造(×印)とよく一致する(小川 1972)

走向等)や磁化などの変数を定量的に決めてやるという過程がふまれる。この場合 特殊なモデルを除いてこの変数を解析的に求めることができない。貫入岩断層のような地質学的によくある構造は解析的に解けないモデルである。そこで これを解くには モデル変数を定量的に仮定し その理論的レスポンスを計算し測定されたレスポンスと比較して相違があれば モデルの変数を修正して再び以上の操作をくりかえす。この相違があらかじめ定められた量以下になれば モデルは定量的に決定され したがって地下構造も決定されたとする方法を用いる。

この操作は数学的には最適化問題の範疇に属する。具体的には非線型最小二乗法を反復法(収束法)によって解くか 解の存在する確率分布であらかじめ予想される場合にはモンテカル法によって解くことができる。いずれの場合も電算機の利用なくては 不可能に近い計算であるといえる。

秋田県八郎潟の中央部に分布する磁気異常を非線型最小二乗法で解いた例(津 小川 1971)を第11図に示す。この場合 磁気異常を発生させる地下構造を長方形の垂直に貫入した火成岩であると仮定して その位置 長さ 幅 頂部深度 磁化率を計算した。結果は坑井データおよび地震反射法記録と比較され 西黒沢層が砂質凝灰岩から玄武岩質集塊岩に移行する部分であるとすればすべて合理的であると推定された。当所の HITAC—10ミニコンピューター(8K語)が用いられたが 計算時間は約5時間であった。

この例でもみられるように 比較的簡単な地下構造モデルの場合でも演算に膨大な時間を必要とするのであり

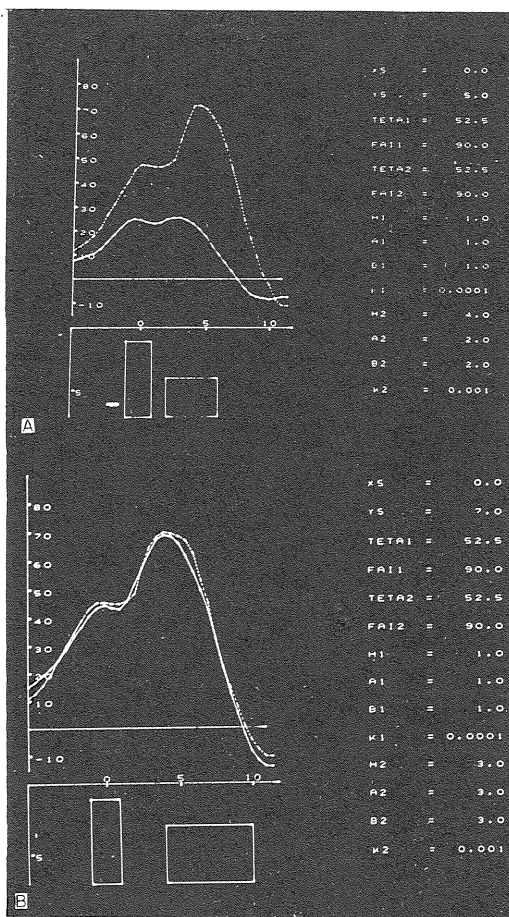


第12図 グラフィックディスプレイ(CRTにライトペンをあてて図形を入力している)

さらに多数の貫入岩体が相近接して分布するような複雑なモデルでは この方法ではほとんど無限の計算時間を必要とするだろうし しかも得られた解の信頼性も低下するものである。このようなシミュレーションには最新の電算機利用技術であるマン—マシン会話(MMC)を可能とするグラフィックディスプレイの利用が適している。次にそれを紹介しよう。

(二) グラフィックディスプレイを用いたマン—マシン会話型シミュレーション

アポロ宇宙船が初めて人間を月に運んだ時のテレビでのことだが ブラウン管のような画面を前にした解説者が画面に映っているマンガの月着陸船に鉛筆のような棒(ライトペンという)でちょっとふれると それは途端



第13図 グラフィックディスプレイによる磁気異常の解析
 ……実測磁気異常断面
 ———モデルによる理論磁気異常断面
 □地下の火成岩体(タテ軸は深度)
 右側の数値は火成岩体の変数

- A) 初期モデル 実測値と理論値は著しく異なっている
- B) 修正モデル A)の右側の火成岩体位置を変更したら両者よく一致した

にチカチカと焰をはきながら月面に着陸していった。

第12図を見て思い出された方も多いであろう。これがグラフィックディスプレイである。これは電算機の入出力装置の一つであり、その特徴は画面 (CRT—Cathode Ray Tube) を通じて図形で入出力ができることである。ライトペンは入出力に用いる道具である。

このグラフィックディスプレイの地学への応用範囲は広い。第13図はこれを磁気異常から地下構造を解析するのに用いた例である。

画面の下半にはモデル地下構造 (ここでは二個の貫入岩体) が、上半には測定磁気異常値 (破線) とモデルによる理論的磁気異常値 (実線) とがディスプレイされている。このモデルの位置と形状と磁化率はライトペンで簡単に変更できるようになっている。第13-a図では測定値と理論値がかなりくい違っている。そこでモデルの位置、形状、磁化率をライトペンで変えてみる。修正したモデルによる理論値がディスプレイされれば再び測定値との比較を行なう。以下この操作をくり返して両者がほぼ一致するまでくり返す。b) 図はa) 図の一つの修正モデルである。測定値と理論値の差は小さくなってきている。この操作の過程に非線型最小二乗法やモンテカルロ法を随時とり入れることによって計算時間は短縮される。またこの方法では、計算結果を視覚によって検証することができるから、結果の信頼性も優れている。

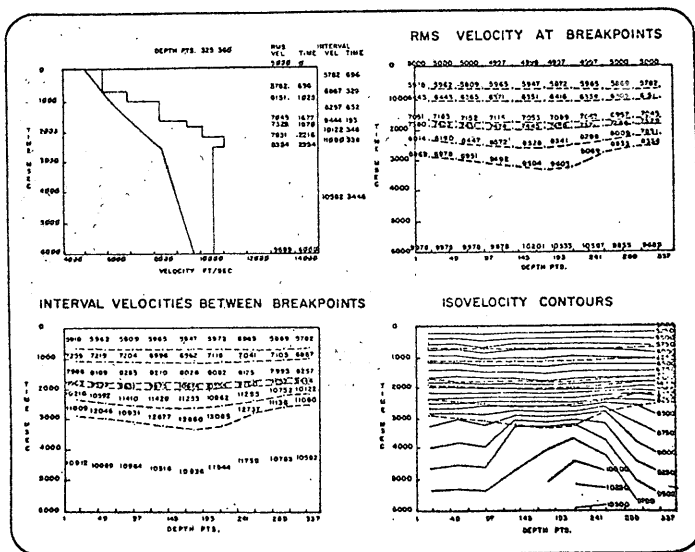
以上のようにグラフィックディスプレイでは人間の持つ二者の類似性に対する最小二乗法的な識別能力と地質構造の物理的性質 (上の例では磁気的性質) に対する理論的・経験的な洞察力とを計算過程に随時有効にとり入れることができる。いわば人間と電算機とが対話(MMC)をしながら計算が進行してゆく。これによって従来の方法に比べて計算時間の大幅な短縮と結果の信頼性との向上が導かれるのみならず、さらに従来の方法では計算 (収束) 困難とされていたような複雑な地下構造の解析が可能となるのである。

特に資源探査を対象とする物理探査では、地下資源の対象となる地殻の浅い部分 (地下数千メートルまで) では地下構造が一般に複雑で、従来より地球物理学で用いられている比較的簡単なモデルからの脱皮が期待されている。その意味ではグラフィックディスプレイの利用は探査技術の飛躍的な発展とその結果としての地域地質構造のより良い解明と地下資源ポテンシャル評価の精度向上とを導くことになる。

またグラフィックディスプレイはシミュレーションのみならず地学の広範な分野で将来広く用いられるにちがいない。第14図は物理探査における電算機利用の最先端を行く反射法地震探査法におけるグラフィックディスプレイ利用を示す一例である。

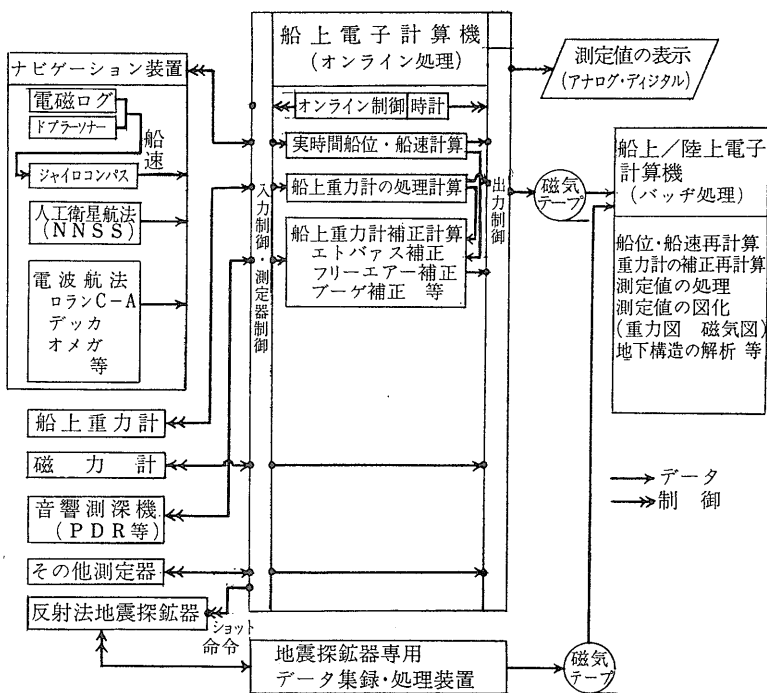
§4 海洋地質調査 空中物理探査における電算機の役割

Hard-copy printout, on-line displays



船舶や航空機に測定器を搭載して各種の地球物理学的・地質学的データを連続的に測定する作業は“Sea Going Laboratory”あるいは“Flying Laboratory”と呼ばれて汎世界的に行なわれている。これらの作業の特徴はデータが多種でありかつその生成速度が高速であることであり、その膨大なデータを迅速に処理するために調査システムが電算機を中心に設計されて

第14図 地震反射法によるグラフィックディスプレイの利用例 (VALENTINE 1972)
〔反射地震探査における各地層の弾性波速度を求める (Velocity Analysis) 方法として4個のCRTによるグラフィックディスプレイシステムが提案されている。この図はCRT上の図形をハード的にコピー (ハードコピー) したものである〕



第15図
地質調査船の観測処理システムにおける電算機の役割
(通産省が建造中の地質調査船で予定されているシステムはほぼこれに近い。ただし反射法地震探鉱器のデジタル処理は現在のところ具体化されていない)

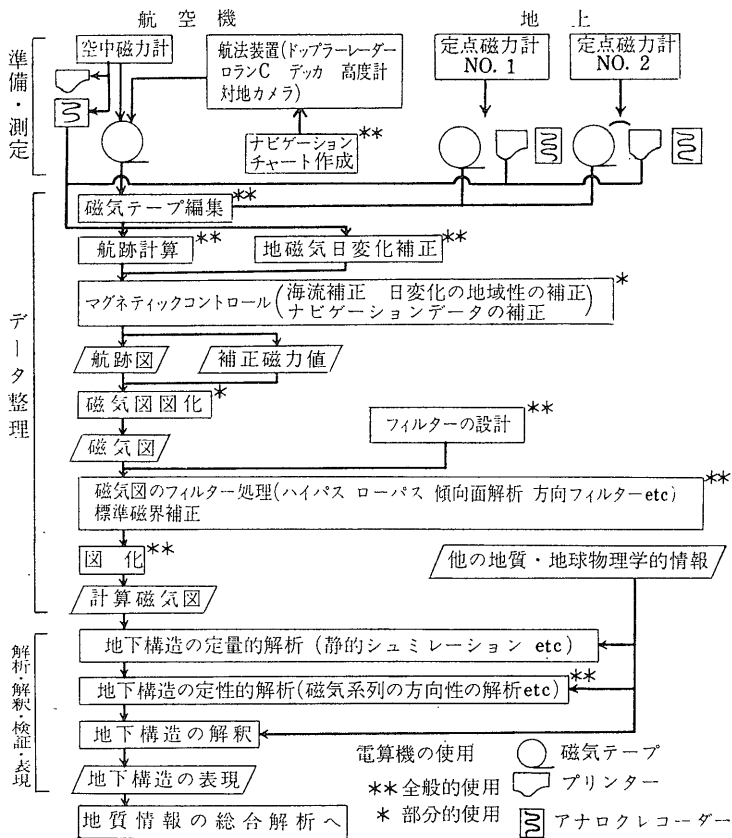
いることである。次に空海における観測・処理システムを電算機利用という視点から簡単にフローチャーにして示そう。

1) 地質調査船の測定・処理システム

地質調査船に電算機を搭載することは今日では常識になっている。おもな測定器は電算機に直結され、観測・処理は電算機による制御により自動化され、研究者はルーチンワークから開放される。ここでは電算機のオンライン多重処理能力が威力を発揮する。また現在では船舶の震動にも耐えられ、かつ上のような能力をもつ小型電算機が開発されている。第15図は近代的な地質調査船の観測・処理システムとデータの流れとを示す。

2) 空中物理探査の処理システム

空中物理探査は、航空機のもつ迅速性と機動性を武器として、磁気探査(空中磁気探査)をはじめとして電磁探査、放射能探査、重力探査といった分野で著しい発展をみせてきた。空中探査では海洋調査と異なり電算機を搭載することはないが、データはデジタル型磁気テープに収録されるのが普通である。このテープは陸上の電算機によって処理(バッチ処理)される。これらの作業は第1図に示した作業の流れに順ずる。第16図はこれをさらに具体的に示す。これらの計算のうちのいくつか(自動図化、フィルター処理、静的シミュレーション)については § 3 ですですに具体的に述べた。



第16図 空中磁気探査の作業システムにおける電算機の役割 (これは地質調査所の空中磁気探査システムである。ただし磁気テープを用いた処理のルーチン化は48年度に予定されている)

以上二つの調査の特徴はデジタル型磁気テープにデータを集録することであり 磁気テープが互換性のないことなどから 一般には専用電算機が使用されることである。

§5 あとがき

これまでみてきたように 地質学の方野でも電算機の利用は発展の途上にあるといえよう。

この小稿ではそれらのほんの一部を紹介し得たにすぎない。著者の目にふれながら紹介し得なかつた分野もあるし また著者の知らないでいる分野も多いであろう。この分野での仕事は将来系統的に紹介される必要があるだろう。わが地質調査所においても著者の属する物理探査部のみならず 地質部をはじめとする 地質学の方野の各部でも 電算機導入に積極的な若手の研究者の少なからざることをお伝えしてこの稿を終えることにしよう。

〔謝辞〕

本稿は陶山淳治地質調査所物理探査部長との討論に負うところが大きい。また名古屋大学水谷伸治郎助教には地質学の方野での電算機利用の現状について教えていただくことが多かった。またグラフィックディスプレイによる計算は東芝電算機部のご協力を得た。写真撮影は企画室正井技官によるものである。謝意を表したい。

(筆者らは 物理探査部)

文 献

全体として

- 1) HARBOUGH, J. W. & MERRIAM, D. F. (1968): Computer Application in Stratigraphic Analysis. John-Wiley & Sons, Inc, pp 282.
- 2) MERRIAM, D. F. (1966~): Computer Contributions. Kansas Geological Survey. (地質学における様々なプログラム)

地質学におけるシミュレーション

- 3) HARBOUGH, J. W. & BONHAM-CARTER, C. (1970): Computer Application in Geology. Wiley-Interscience. pp 575.
- 4) SHIMAZU, Y. & URABE, T. (1968): Dynamic simulation of planetary evolution. J. Phys. Earth, 16; 129—136.
- 5) SHIMAZU, Y. & INAYOSHI, M. (1970): Computer simulation and ecological environment in Nobi alluvium delta central Japan. J. Phys. Earth, 18; 143—155.
- 6) HATTORI, I. & MIZUTANI, S. (1971): Computer simulation of fracturing of layered rock. Eng. Geol. 5; 253—269.
- 7) 水谷伸治郎・都築芳郎 (1971): 風化 続成ならびに母岩

の変質 地団研専報 17 79—94.

- 8) MIZUTANI, S. (1970): Silica minerals in the early stage of diagenesis. Sedimentology. V. 15, 419—436.
- 9) 島津康男 (1970): 地球を設計する 情報科学社 pp.195

物理探査における静的シミュレーション

- 10) ISSACS, K. N. (1967): The simulation of magnetic and gravity profiles by digital computer. Geophys. 31; 773—778.
- 11) 津宏治・小川克郎 (1971): 三次元角柱による磁気異常の自動解析 物探協会秋期講演会 予講集 p.10
- 12) 小川克郎 (1972): 空中磁気図解析・解釈法の研究・地質調査所特別報告 (準備中)

グラフィックディスプレイの利用

- 13) VALENTINE, T. & DAVIS, R. (1972): Velocity analysis of seismic data using interactive computer graphics. Oil & Gas Jour. Feb 21, 102—106.
- 14) 杉山公造・浦部達夫 (1970): グラフィックディスプレイによる地殻構造解析 地震 23; 205—212
- 15) 三重野博司編 (1971): 自動設計とグラフィックス 大河出版

要因分析・多変量解析

- 16) 杉山公造・浦部達夫・島津康男 (1970): 地震発生の要因分析 地震 23; 166—169.
- 17) 鍋谷祐夫 (1972): 化学的・物理的探査における因子分析 物探協会 春期講演予稿集 p. 7
- 18) ISHIZAWA, K. (1970): Ostracodes from Aomori bay, Aomori Prefecture, Northeast Honshu. Japan Sc Rept Tohoku. Univ. 43; 59—97.
- 19) 推川誠・芝祐順・若狭喜作 (1971): 地球化学データの多変量解析 [1] —因子分析の適用—日本鉱物学会講演
- 20) 芝祐順 (1967): 行動科学における相関分析法 東大出版会 pp. 259.

海洋地質調査・空中物理探査

- 21) 石和田靖章 (1970): 大陸棚の石油探鉱 海洋科学 V. 2 n. 9 47—52.
- 22) 竹内均 (1970): コンピューターを用いて海底下をさぐる 海洋科学 V. 2 n. 1 57—63.
- 23) 石井吉徳 (1971): 海洋地震探鉱のデジタル処理 海洋科学 V. 3 n. 4 25—31.
- 24) 浅田正陽 (1971): 船位決定システム 海洋科学 V. 3 n. 4 32—37.
- 25) 友田好文 (1970): 現代の観測船 海洋科学 V. 2 n. 4 19—24.
- 26) 陶山淳治・小川克郎 (1970): 空中磁気探査におけるデータ処理と電子計算機の役割 石油技術協会誌 35 N. 6 23—33.
- 27) 陶山淳治・小川克郎他 (1969): 海域における空中磁気探査技術の研究—能代沖及び佐度海峡北部の例 地質調査所 pp. 40.
- 28) 石油開発公団編 (1969): 海洋石油開発 pp. 365.