

断裂系評価のための光学—電子フーリエ解析法

村岡 洋文*・長谷 紘和 (地殻熱部)
Hirofumi MURAKA, Hirokazu HASE

1. ま え が き

一昨年度は 埼玉県鳩山村に Landsat データ受信局が完成し わが国でも同データの入手がきわめて容易となった。また 国産の資源/陸域観測衛星打ち上げ計画が 1980年代半ばを目標に進められようとしている。さらに 資源エネルギー庁の新政策として 全国地熱資源総合調査計画が今年度より開始され 本計画では合成開口レーダー (SAR) データと Landsat データによる全国の地熱資源概査が予定されている。

このような情勢から 今後 衛星 航空機等 様々なスケールのリモート・センシング映像データが急増することは確実とみられる。この種のデータを解析・評価する任務の一部を分担している地質調査所においては 地質評価のためにそれらから最大限の地質情報を引き出すべく 解析手法の系統化を急ぐ必要がある。

ここに紹介する光学—電子フーリエ解析法は 従来主観的要素を排除し難かったリニアメントの解析をきわめて客観的 且つ迅速に行い得る方法として注目される。本法の基本的特徴は光学系と光検出器との組み合わせによって ローズ・ダイアグラムを作成し 複数のリニアメントの存在形態を規定する重要因子を定量的に明らかにする点にある。そして 解析過程には 従来定量的に評価し得なかったがゆえにあまり重視されなかったリニアメントの卓越間隔を抽出することが含まれる。また 各種のフィルターを使用することで 多様な画像処理も可能である。

現在 我々は本解析法による地質評価研究に着手したばかりであり ここでは解析例は試験的なものを例示するにとどめ 本方法の原理や装置を中心に述べて 我々が今後目指している研究の一端を紹介したい。

カンタム KK の渡辺真一氏には試験にあたってレーザー—光回析パターン解析装置を快よく使用させていただいた。地質調査所の正井義郎技官には本装置用のスライドを作成していただいた。記して両氏に謝意を表したい。

2. 情報としてのリニアメント

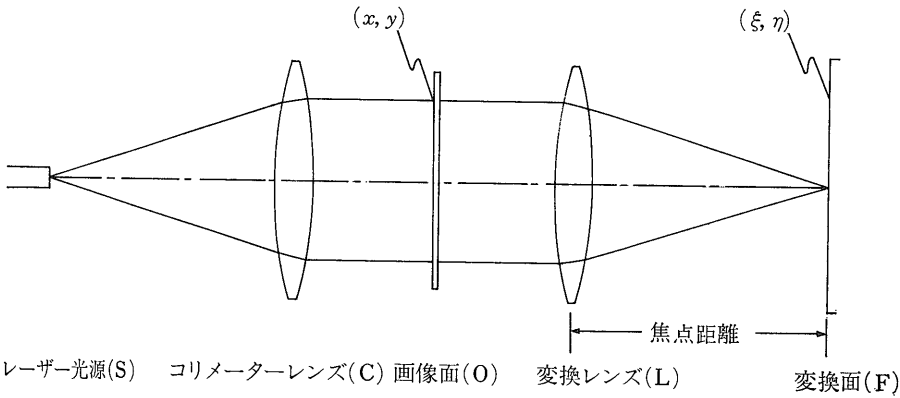
映像データの2次元面上に記録されている個々のリニアメントは 位置と方向と長さによって記述される。この情報は 画像上で判読すれば容易に得られる。しかし 成因的に同一グループに含まれるリニアメント群の記述には さらに次のような特性に関する情報が必要となる。

- 1) 卓越方向
- 2) その方向をもつものの積算の長さ
- 3) その方向をもつものの卓越間隔

このような情報は リニアメント群の存在形態を規定する重要因子であり このような情報を得なければ あるリニアメント群と他のリニアメント群とを識別できない。また このような情報は多数の分割された領域で得ることによって 初めて領域間にわたるリニアメント群の系統的変化を評価し得る。しかし 一般的にはこのように複数のリニアメントの情報となると簡単に処理し得ない上に 判読時における主観が入り易いことから客観性を欠いた評価につながりかねない。

地質学分野で多用されるローズ・ダイアグラムは種々のベクトル量を極座標上に示す図法で 例えば上記因子の中で 様々なリニアメント群のそれぞれの1)に対する2)のような量や2)の代りに本数のような量の分布を示すのに適している。しかし ローズ・ダイアグラムの作成に当たっては多大の労力を要し かつ1)に対する3)のローズ・ダイアグラムなどに到っては方向も位置も微妙に異なるリニアメントのどの間隔を測定するかといった測定上の限界も生じてくる。また ローズ・ダイアグラムの作成に先立って まず生の画像データからリニアメント分布図を作らねばならず この過程で抽出者の個人的地質観が関与することは避けられない。

光学—電子フーリエ解析法においては いくつかの技術的問題を解決すれば こうした抽出者の個人的地質観に起因する要素をチェックすることが考えられ リニア



第1図
光学的フーリエ変換の
光学システム

メント分布図を用いてリニアメント群の解析に必要な上記1)~3)の情報を迅速に得ることができる。すなわちリニアメント分布図の代りに生の画像データを直接処理することによって1)と2)に関してデータの客観性をチェックすることができる。この場合には処理・解析の時間効率が極めて高いことも大きな利点である。

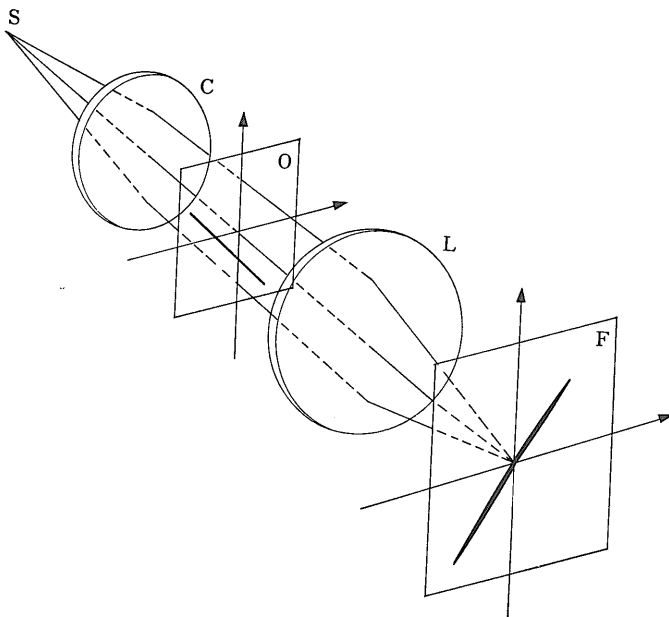
3. 光学系によるフーリエ変換の原理と解析装置

単レンズで複雑な2次元フーリエ変換ができるという事実は比較的古くから知られていた。この現象がパターン情報の解析に応用されるようになったのは1960年にレーザーが発明されて以来のことである。これが地球科学分野に導入されたのは1965年で地震探査の濃淡表示地震図の解析に利用されることから始まった

(JACKSON, 1965; DOBRIN et al., 1965)。次いで1966年には空中写真に記録された断裂系の解析に有用であることが示された (PINCUS & DOBRIN, 1966)。また1970年代半ばから Landsat データ利用の一般化と結びついて断裂系の解析に応用した具体例が現われ始めている (PINCUS & DOE, 1974; CORREA & LYON, 1974)。

3.1 原理

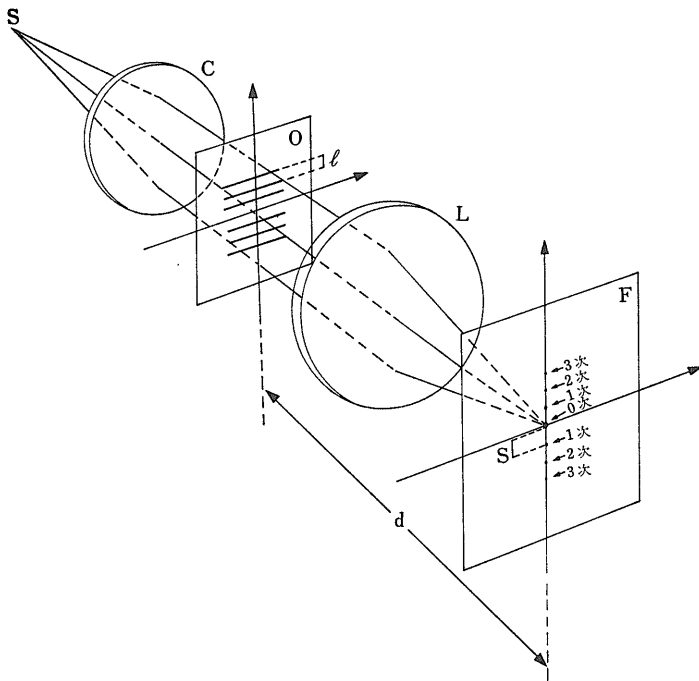
周期性をもつ現象は三角関数の級数和で表わされるフーリエ級数で記述されるがこれをもとに一見非周期的にみえる面的データを周期性をもつデータとして扱う変換処理はフーリエ変換と呼ばれる。いいかえれば原データがある点を中心としてその点からの距離の関数 (Spatial domain) で表わされるものとすればそれを周期性をもつ関数 (Frequency domain) に変換することを意味する。このような変換は光学系を通してなされることが数学的に裏づけられている。



第1図のようなコヒーレントな光源をもつ光学装置を用いてO面に何らかのパターンをもつフィルムなど透過性の画像を置くとレンズLの焦点距離の位置にあるF面上に回折像ができる。ここで画像面Oを通過する光の分布をO(x, y) そのF面上における変換像をF(ξ, η) とそれぞれ2次元座標で表わすとき次のような関係が成立つ。

$$F(\xi, \eta) = C \iint O(x, y) \cdot e^{ik[(\xi/f)x + (\eta/f)y]} dx dy \quad (1)$$

第2図 光学的フーリエ変換の性質-(1)単一のリニアメント 英字記号は第1図参照



第3図
光学的フーリエ変換の性質—(2)単一のリニアメント
群 l: リニアメントの間隔 S: 回折斑点の間隔 d: D
面と F 面との距離 他の英字記号は第1図参照

ント群の光学的フーリエ変換ができる。
その性質について単純な例から説明しよ
う。

第2図のように 1本のリニアメント
のみが写った画像をO面に挿入したとし
よう。 そうすると フーリエ変換の一
般的性質からF面上には原リニアメント
と90°を成す直線が生じる。 この場合
O面上でリニアメントがどのような位置
にあると F面上では必ず原点(光軸
点)を中心として両側にのびる線として
表現されることが重要である。

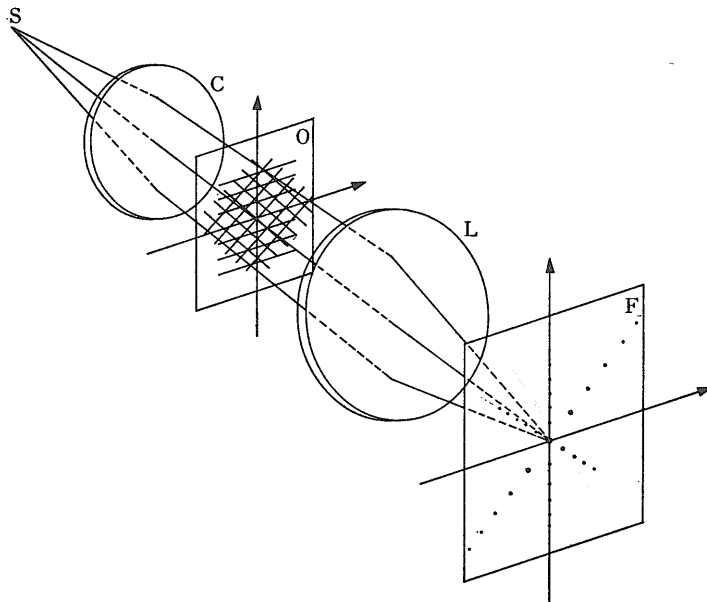
次に第3図のように 平行等間隔のリ
ニアメント群が写った画像をO面に挿入
したとしよう。 この場合には これらリニアメントが
典型的な回折格子の役割を果たすため F面上に原点を中
心とし 原リニアメント群と90°を成す直線上に断続的
に回折斑点が並ぶことになる。 それは原点の0次のも
のが最も明るく 1次 2次 3次……と順次暗くなる。
ここで重要なことは 回折斑点の間隔は等間隔であり
間隔を s とすると次のような関係が成立
つことである。

$$s = \lambda d / l \quad (2)$$

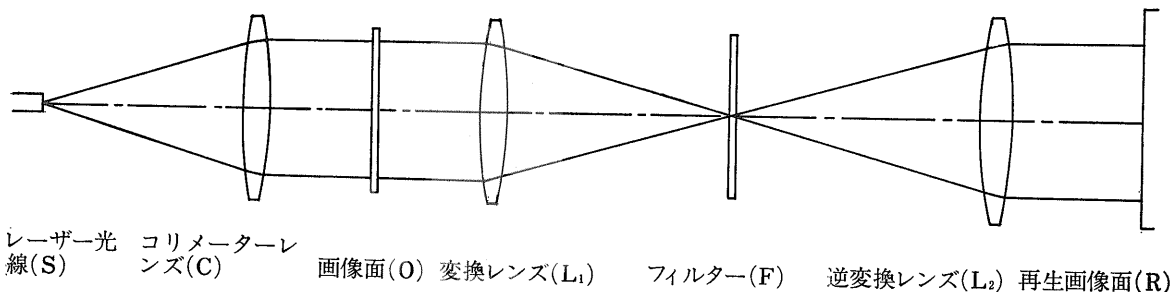
この式で λ は光の波長 dはO面と
F面との距離 lはリニアメントの間隔
である。 λ とdとは定数であるから
回折品析斑点の間隔はリニアメントの間
隔と反比例することが明らかである。
また 定数 λ とdさえ既知であれば s
から lを容易に導びくことができる。
これが より複雑なリニアメント分布図
において リニアメントの卓越間隔を看
破する際の基本原理となる。 すなわち
リニアメントの間隔がより不規則である
場合にも その中で最も卓越する間隔の
回折斑点が一層明瞭に現われるため 卓
越間隔の解析が可能となるのである。

この式で Cは定数 kは光の振動数 fはレンズの焦点
距離である。 これは $F(\xi, \eta)$ が $O(x, y)$ の2次元フー
リエ変換関数であることを示し このような変換は光学的
フーリエ変換と呼ばれる。

このO面に リニアメント分布図または生の画像デー
タなどのネガ・フィルムを置くことによって リニアメ



第4図 光学的フーリエ変換の性質—(3)複数のリニアメント群 英字記号は第1図参照



第5図 画像処理再生用の光学システム

次に第4図のように平行等間隔であるがいくつかの方向のリニアメント群が重合している画像データを考えよう。この場合にも個々のリニアメント群については第3図の場合と全く同じでそれぞれの群はF面上で90°変換された方位上に回折斑点を生じる。そしてそれら全体は全て原点から放射状にのびる。ここで注目すべきことは各々原点からのびる回折斑点列の長さは各々のリニアメント群の頻度(その方向のもの積算の長さ)を反映している点である。従ってこのようなF面上の像は90°回転させればローズ・ダイアグラムと全く同様の特性をもっていることになる。しかもこの光学的ローズ・ダイアグラムにおいては卓越間隔を得ることができる点でより情報量大きい。ここにリニアメント解析の極めて迅速な処理法の可能性が生まれる。

以上単純な例における光学的フーリエ解析の基本的特性はより複雑なリニアメント分布図や生の画像データにおいても失われない。ただし生の画像データを用いた場合はリニアメント以外の部分にも種々の濃淡模様が存在するためにその光学的ローズ・ダイアグラムの鮮明度は低下する。

光学的フーリエ変換のもう1つの利点は逆変換が容易な点である。画像上での光の分布の諸要素は全て変換像においても何らかの形で含まれている。事実第5図のように光学的フーリエ変換の後全く逆の光学過程を経て逆変換すれば再び原画像が完全に再生される。この性質を利用して第5図のF面の位置に種々のフィルターを挿入すれば様々な画像強調処理や特定方向の系統的ノイズの消去などが可能となる。後者はLandsat画像のリニアメント解析を困難にしている走査線などを消去する際に威力を発揮するであろう。

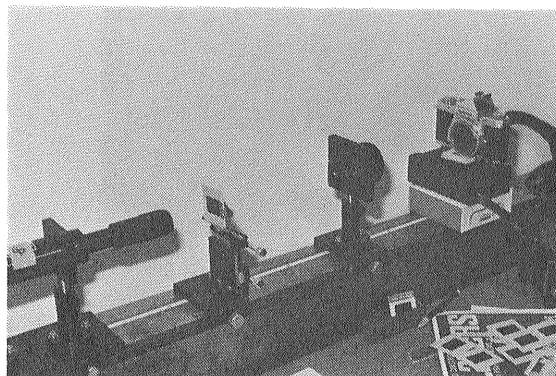
3.2. 解析装置

光学的フーリエ変換を用いた情報解析は地球科学分野では1960年代の半ばにおいてすでに注目され大きな

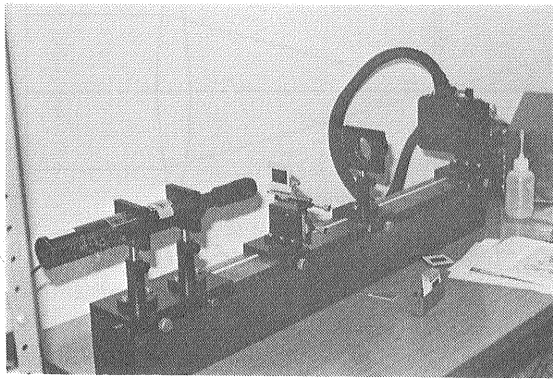
利点が認められてはいたものの実際の利用はそれほど進まなかった。その最大の理由は技術的な点に求められると言ってよいだろう。写真撮影によって記録された回折像はローズ・ダイアグラムほど鮮明な結果は得られずぼやけた像としての印象はぬぐえない。この欠点を改良するために光検出器を用いたデジタル解析装置が開発されたがそこには非常にスマートなセンサ応用技術が適用されている。この光学フーリエ変換による原理と電子技術との結合が本方法を実利用の面で大きく前進させたといえることができる。

ここでは光検出器による情報処理過程は省略し光学系についてのみ説明する。

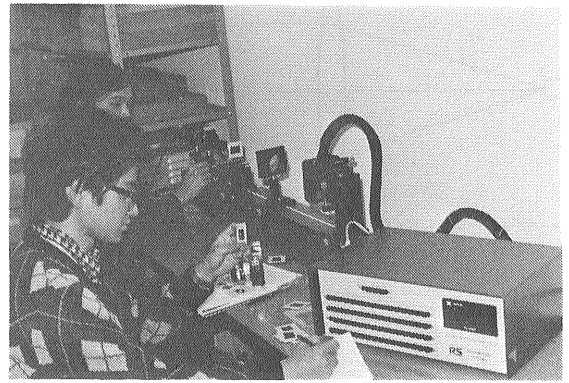
解析装置の最も基本的な構成はすでに第1～5図に示される通りである。すなわち光源部、光学系、検出部から成る。光源部には単色光でかつコヒーレント光が容易に得られるレーザーが用いられる。光学系としてはレーザー光線を平行にするコリメーターレンズ、対象フィルムの装着部、回折光を結像させる変換レンズ等が必要でありこれらを載せて光軸上をスライドできるレール状のマウントがあるとさらに効率的である。検出部は光学系装置のみの場合スクリーンを置いて回折像を直接観察したり一眼レフカメラで撮影記録し



第6図 検出部がカメラの場合の解析装置



第7図 ㉓ 光源部 光学系は第6図と同様
検出部（左端）に特殊な検知装置が装備されている



第7図 ㉔ 手前は手動ボタン式のデジタル表示装置

たりする。第6図に結像部にカメラを用いた場合の解析装置の一例を示す。この結像部に特殊な仕様をもつ検知装置を配置し、光学的なアナログ量を数値化することを可能にしたのが第7図に示すカリフォルニアの Recognition Systems Inc. 社の光学一電子回折パターン解析装置である。すなわち本装置の最大の特色は検出部の半導体光検出センサ・アレイにある。第8図に示されるようにこのアレイは64個の素子から成り、32個は半円部にウェッジ状に、32個は他の半円部にリング状に配列している。これら各素子はその部分に入射する光量を電気信号に変換し、変換された信号はさらにデ

ィジタル化されて、手動ボタン式の表示装置（第7図㉔）に数値表示されるか、またはミニコンピュータ連動の自動記録装置に記録される。

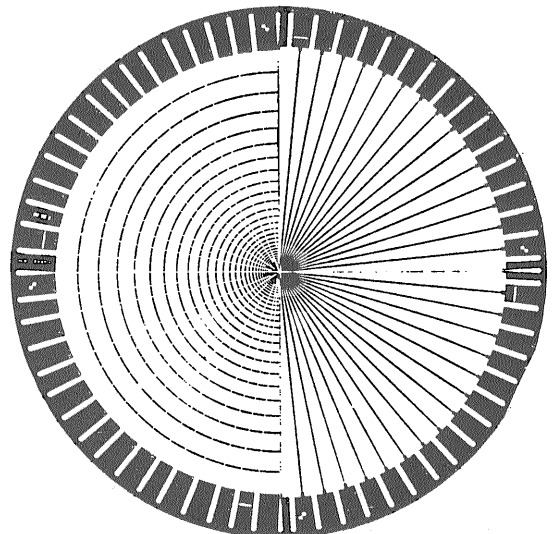
従って本装置を用いるならば、約 5.6° 幅ごとに積算されたリニアメントの方向成分ならびに発達間隔の周波数成分を数値としてとり出すことができ、様々な定量的処理を広範な用途について行うことができる。

4. 解析例

すでに述べたように、我々は本装置を短時間試験的に使用する機会を得たばかりであり、具体的な解析例を述



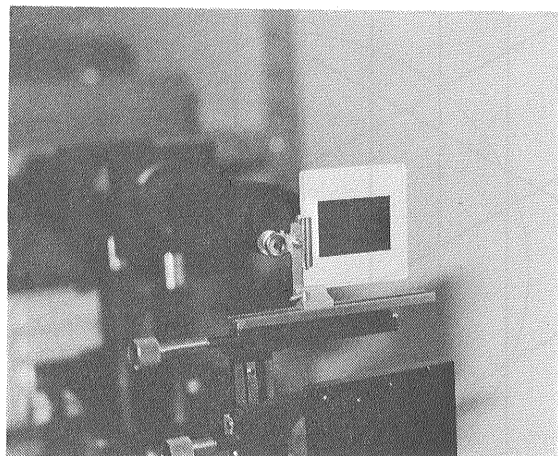
第8図 ㉕ 半導体光検出センサ・アレイを装備した検出部



第8図 ㉖ 半導体光検出センサ・アレイにおける素子の配列

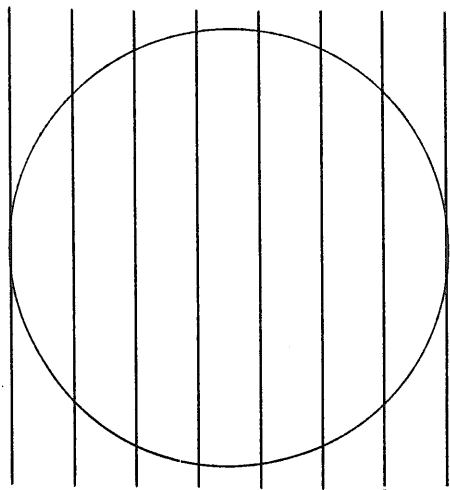
べるのは本文の主旨ではない。 実際の所 我々が現在試験的に得ている変換像は不充分なものであり 撮影の露出時間等 初歩的な技術的問題を解決することから始めなければならない状況にある。 このことを銘記した上で 若干の試験例を紹介し ここではその結果の詳細には立ち入らないことにする。

コリメーターレンズを通過したコヒーレント光は 第9図に示すように直径1 cm 程度の光束としてフィルムに入射するため この範囲のみ画像が変換されることになる。 第10図④のネガ・フィルムにおける円内の部分の変換像は 90°回転しない状態で第10図⑤のようになる。 これには回析斑点が明瞭に現われている。 同様にして 第11図④の変換像は 第11図⑤のようである。 この場合には 原画像におけるリニアメントの頻度が射出部分の長さに反映していることが相対的に読みとれるが 定量的な検討には全く不充分と言わざるを得ない。

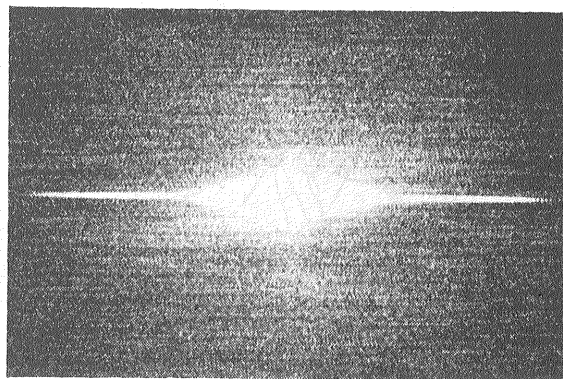


第9図 フィルムを通過する光束

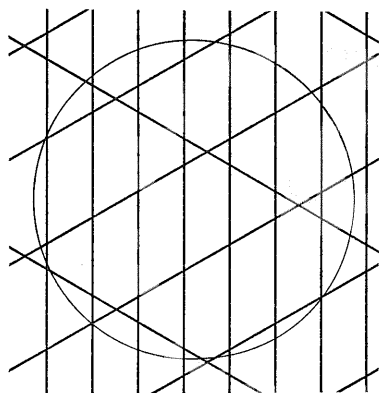
これとほとんど同一の原画像—表裏が逆であるだけの—を用い半導体光検出センサ・アレイによって数値解析した結果はよりシャープなローズ・ダイアグラムを示して



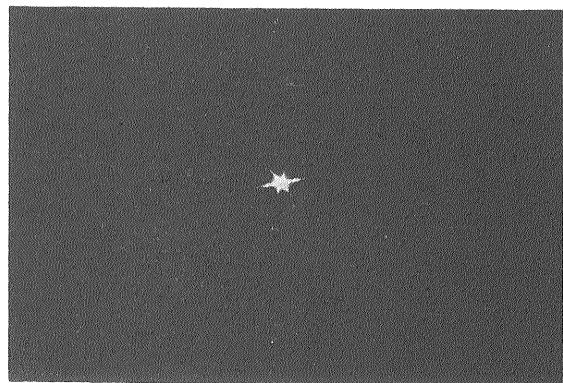
第10図 ④ 原 画 像
円内がレーザー光通過範囲であり解析の対象となる
以下図11~13も同様



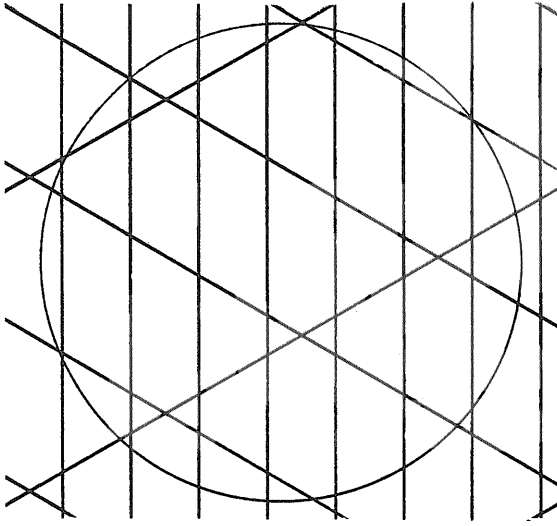
第10図 ⑤ 変 換 像
これを 90° 回転させると第10図④の光学的ローズ・ダイアグラムとなる。
この関係は以下図11~13も同様



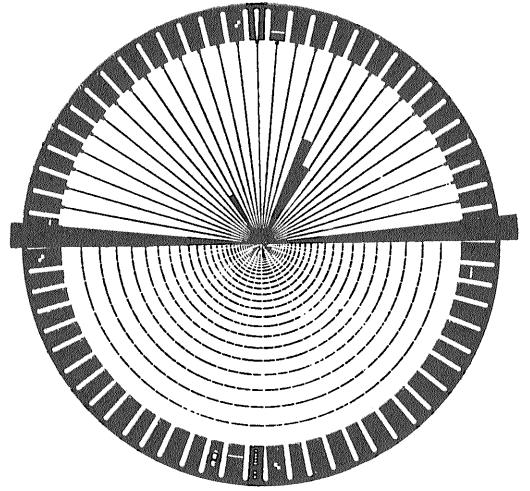
第11図 ④ 原 画 像



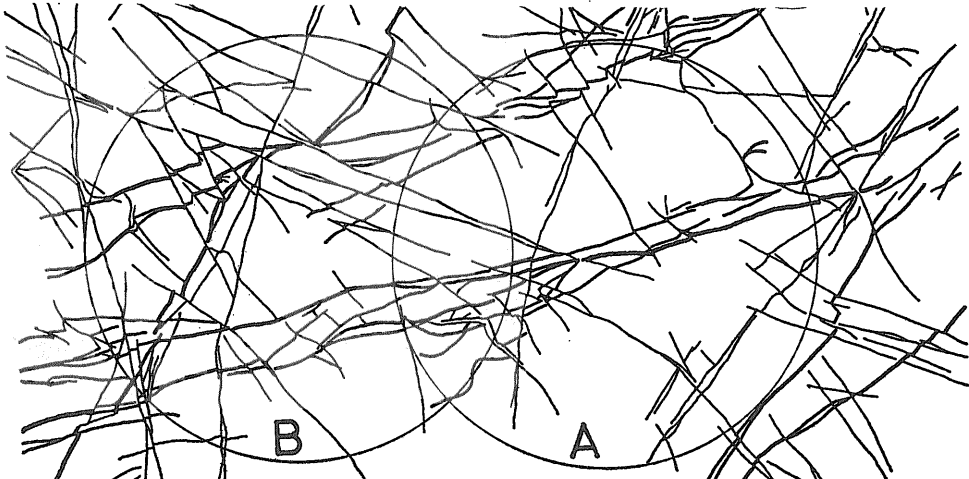
第11図 ⑤ 変 換 像



第12図 (a) 原画像



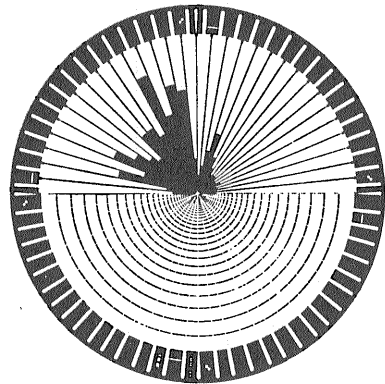
第12図 (b) 光学的ローズ・ダイアグラム
第8図(c)と同じアレイの模型上に表わす



第13図 (a) 円Aは第13図(c)の原画像を 円Bは第12図(c)の原画像をそれぞれ示す 同図は小玉(1968)による



第13図 (b) 円Aの変換像 上方の孤立した線はノイズ



第13図 (c)
円Bの光学的ローズ・ダイアグラム
第8図(c)と同じアレイの模型上に表わす

いる。すなわち アレイのウェッジ状半円部分の各素子について光量を定量的に求め その量の方位分布をローズ・ダイアグラムとして示したものが 第12図である。これには 方位の集中度がきわめて良い点とともに 約 3 : 2 : 1 というリニアメントの頻度の比がほぼ読みとれよう。この事実はアレイの感度の高さと 第11図の場合の不備が純粋に写真撮影上の不備に根ざしていることを物語っている。第13図④は小玉(1968)による断裂系分布図である。この円Aに関する変換像が第13図④であり 円Bに関して 第12図と同じ方法でローズ・ダイアグラムを作成したものが第13図⑤である。これらについても 原画像とのよい対応性がみられ 細部については第13図④よりも第13図⑤の方が精密に読みとれる。以上の結果は 不十分なながらも本方法実用の可能性を裏づけており 特に定量評価に半導体光検出センサ・アレイの導入が有用であることを示唆している。

5. まとめと今後の展望

断裂系の光学的フーリエ解析法の用途は 主に次の3つに絞ることができる。

- 1) リニアメント分布図から光学的ローズ・ダイアグラムを作成する。
- 2) 生の画像データから光学的ローズ・ダイアグラムを作成する。
- 3) 各種フィルターを使用して 生の画像データについて画像強調処理やノイズの消去を行う。

1)の用途の場合には より鮮明な光学的ローズ・ダイアグラムを得ることができ 回折斑点の間隔からリニアメントの卓越間隔も算定可能であるが リニアメント分布図は人為的に作成されねばならない。2)の用途の場合には 光学的ローズ・ダイアグラムの鮮明度は落ちるが きわめて迅速に処理でき 主観の介入する余地がない。3)の用途は 1)や2)など断裂系解析の前処理段階で併用することができる。

なお 本文ではあまりふれなかったが 本解析法の対象としては どのようなスケールのものであってもかまわない。従って 露頭スケールや顕微鏡スケールのもので画像であっても同じように処理し得る。また 汎用性の一例として 粒状物の粒度分布なども解析可能である。本解析法の用途の広範さは 先に述べた光学—電子回折パターン解析装置のマーケットとして地質分野

はほとんどとるに足りないものである事実を述べるだけで自ら明らかであろう。

しかし それにもかかわらずリニアメントが 解析対象として最も適したものの1つであることは確かである。従来 断裂の地表トレースを意味するリニアメントは 断裂の性格を推定することが主目的で解析されてきたが 今後我々は断裂の密度という観点からのアプローチも進めて行きたいと考えている。また そこに質的に新しい何らかの地質学的知見を得ることを期待している。広域を解析する場合にも ローズ・ダイアグラムを作成する個々の領域は可能な限り小分割された方が良いことは言うまでもない。それによって 断裂系地質区を識別し得るであろう。断裂系地質区ごとの境界の不連続から 大断層の潜在を推定することも可能となるかもしれない。

断裂系の光学—電子フーリエ解析法はまた 迅速で客観的な処理法であるという原理的な利点に加わえ 扱いが容易で野外を重視する地質家にとっても使いこなせる道具となりうる。また 地殻表層のグローバル規模の調査を可能にする手法であると言える。

参考文献

- CORREA, A.C. and LYON, R.J.P. (1974): An application of optical fourier analysis to the study of geological linear features in ERTS-1 imagery of California, Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics, pp. 462-479.
- DOBRI, M.B., INGALLS, A.L., and LONG, J.A. (1965): Velocity and frequency filtering of seismic data using laser light, Geophysics, vol. 30, pp. 1144-1178
- JACKSON, P.L. (1965): Analysis of variable-density seismograms by means of optical diffraction, Geophysics, vol. 30, pp. 5-23.
- 小玉喜三郎 (1968): 城ヶ島における小断層解析 地質雑 74, pp. 265-278.
- PINCUS, H.J. and DOBRIN, M.B. (1966): Geological applications of optical data processing, Jour. Geophys. Res., vol. 71, pp. 4861-4869.
- PINCUS, H.J. and DOE, T. W. (1974): Spatial analysis of basement and cover linears by optical diffraction-methods, results, and interpretation, Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics, pp. 423-436.