

三次元トラック長計測システムの試作

山下 透・岩野英樹・糟谷正雄・檀原 徹

(京都フィッション・トラック)

1. はじめに

これまで我々のラボでは、フィッション・トラック（以下トラック）の長さおよび方位を定量化する手段を持たなかった。今回の三次元トラック長計測システムは、顕微鏡の接眼レンズを通して長時間観察しなければならなかったこれまでの作業から測定者を解放するために、超高解像度白黒TVカメラ（ニコン HQ-1000M）および高品位モニタ（中央無線 THM-14A）を導入したことから、開発が模索された。

モニタ上に投影される像を透明シートにトレースすればXY軸方向（結晶面上）の計測がまず可能になった。さらに、レーザー変位計（キエンス LC-2100）の導入によって、Z軸方向（深さ）の計測が可能になった。これらのハードウェアの導入によって、トラックの長さ・方位が定量化できるハードウェアの基礎環境が整備された。

しかし、すべての作業を人力で行うには、かなり煩雑になることは否めない。例えば、トラックをトレースした透明シートからXY軸の変位を読みとるためには、デジタイザによる計測を行わなければならない。また、XYZ軸すべてのトラックの変位・方向を計算するためには、各トラックについてトラック両端の座標データをパソコンに入力しなければならない。

本論の主旨は、これらの煩雑な作業から測定者を解放するため、トラック両端の座標取得以降の処理をすべてパソコンに任せ、トラック両端の判断のみを測定者が行えばよい環境を構築することにある。その目的を達成するために、新たなハードウェアを製作した。以下、付加されたハードウェア、システム全体について述べる。

2. XY軸変位計

投影面上のXY軸の座標を計測するには、画像解析システムをはじめとする各種の手段が考えられる（升本・弘原海，1990）。しかし、新たなハードウェアを導入してもその機能の一部しか使用しないのであれば、それが高額なものであればあるほど導入する意欲は失われる。

今回、安価にXY軸方向の座標を計測するハードウェアを製作した。市販のXYプロッタの中央部（幅255mm×高153mm）を打ち抜き、そこに透明なガラス板（VDT7114）をうめ込んだ。さらに、XY方向に自由に動くペンホルダ部に赤色レーザー光源（キエンス LZ-155）を配置し、プロッタ面に対して垂直下方向にスポット光（最小径0.5mm）を照射させた。この改造したXYプロッタをモニタにぴったり合うように固定し、スポット光の焦点がモニタ面上に合うように高さ調整した。プロッタ面か

らモニタ上までの距離は10~20mmである。

通常のXYプロッタの機能を生かし、透明シートをプロッタ面上に配置すれば、透明シート上にモニタに映し出された像の座標をトレースすることができる。以下、このハードウェアをXY軸変位計と呼ぶ。

3. システム全体

自作したXY軸変位計、およびZ軸変位計はそれぞれパソコンと接続できる仕様になっている。

XY軸変位計は、元々が出力デバイスであるため、他のデバイスにより入力された値によってコントロールされ、ペンホルダがXY方向に移動する。すなわち、XY軸変位計はそれ自体では機能せず、入力デバイスにより入力された値がモニタ上の縮尺に変換されるだけである。入力デバイスはマウス(トラックボール)を使用した。最小読取値はマウス1ドット分の移動量となる。実像(実際の長さ)、XYプロッタ上の移動量、マウスの移動量の換算表を表1.に示す。

なお、顕微鏡はニコン製MICROPHOT FXとし、対物レンズ(CF Plan NCG 100x)、接眼レンズ(CFW 10x)を用いた。

次にZ軸変位計について述べる。顕微鏡ス

表1. 各座標系の換算表

| 実像 | マウス | プロッタ |
|--------------------|---------|---------|
| 1 μm | 4 dot | 1.89 mm |
| 0.25 μm | 1 dot | 0.47 mm |
| 0.53 μm | 2.1 dot | 1 mm |

テージ上方(約30mm)の鏡基に固定し、顕微鏡ステージ上にスポット光を当てる。顕微鏡ステージの上下動により、Z軸変位計の読取値が変化し、逐次パソコンに入力される。最小読取値は0.2 μm である。以上のハードウェアの概略を図1.に示す。

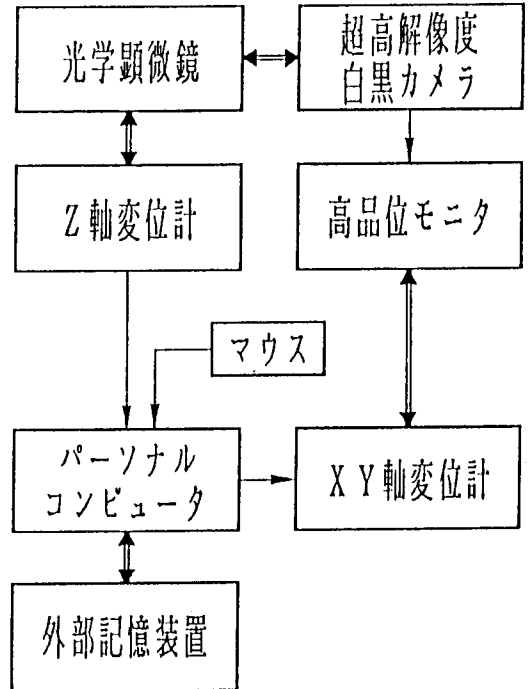


図1. ハードウェアの概略

トラックの両端座標の判断は測定者が行き、マウスのボタンを押すことによってトラック端部の座標としてパソコンに取込まれる。1トラックについて両端の座標をペアとする。結晶表面と結晶内部の区別は、Z軸変位の大関係により自動判断される。結晶中の実際のZ軸変位は、読取値にその結晶の屈折率をかけた値とする。さらに、結晶軸c軸とトラックとを区別するための命令を指定するメニューを設け、結晶軸を基準とした各トラック

の実長・投影長・偏角・伏角・c軸からの立体角が求められるようになっている。

使用言語はN88-BASIC(86)(MS-DOS版)である。作業の流れを分かりやすく表現するために次のことに注意してプログラミングを行った。各作業ルーチンを部品化するために、GOTO文はエラー処理以外は一切使用しない。条件分岐にはWHILE……WEND文を多用し、特に他言語にあるブロックIF文は、論理化された変数とWHILE……WEND文で表現している。GOSUB文は独立した機能としてまとまった場合以外は使用しない。操作性をよくするためすべての作業をマウスで指定できる構造にした。

データの解析は、他のソフトで行った。例えば、PC-9801ではマルチプラン・MSチャート・ロータス1-2-3等、MacintoshではCricket Graph, StatWorks等である。

4. 測定精度

実際の測定精度を吟味するうえで、1トラックについて60回の繰返し測定を行った。サ

ンプルは、Buluk Member Tuffのジルコン結晶である。測定結果を表2. に示す。

XY軸(投影長)における誤差は、すべてXY軸変位計の最小読取値 $0.25\mu\text{m}$ 以内に含まれる。さらに分解能を上げるためには、観察倍率を大きくするか、高解像度のパソコンを使用すれば良い。

一方、Z軸(深さ)については、Z軸変位計の最小読取値 $0.2\mu\text{m}$ よりも大きく、 $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ の範囲にある。これには、2つの要因が考えられる。まず焦点深度があげられる(後述)。もうひとつは、Z軸変位計の読取値の偶発的なゆらぎである。結晶内での最小分解能は、[Z軸変位計の最小読取値]×[結晶の屈折率]で表されるので、ジルコン結晶の場合、最小分解能は $0.4\mu\text{m}$ となる。トラック両端でそれぞれの偶発的なゆらぎが起こるとすれば、結晶内で $\pm 0.4\mu\text{m}$ の誤差が生ずる。この読取値のゆらぎの頻度をチェックすると、全体の30%が $\pm 0.2\mu\text{m}$ の誤差を生じていた。そのうちの半分を $\pm 0.1\mu\text{m}$ の誤差内に入るよ

表2. 1トラックについて繰返し測定

| トラック番号 | 測定回数 | 投影長(μm) | 深さ(μm) | 実長(μm) | 偏角(deg.) | 伏角(deg.) | 備考 |
|--------|------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------|--------------|
| 4 | 60 | 6.0 ± 0.2 | 6.7 ± 0.5 | 9.0 ± 0.3 | 5 ± 1 | 48 ± 2 | c軸平行. 深い. 細い |
| 7 | 60 | 9.0 ± 0.2 | 2.6 ± 0.5 | 9.4 ± 0.2 | 69 ± 1 | 16 ± 3 | c軸直交. 浅い. 太い |
| 9 | 60 | 2.2 ± 0.1 | 7.5 ± 0.6 | 7.8 ± 0.6 | 56 ± 4 | 74 ± 2 | c軸直交. 深い. 細い |
| 16 | 60 | 6.4 ± 0.2 | 7.0 ± 0.5 | 9.5 ± 0.4 | 66 ± 1 | 47 ± 2 | c軸直交. 深い. 太い |

サンプル: Buluk Member Tuff (Zircon) / BMT89 910826-2 ED2

うにソフトウェアを改良したが、標準偏差は $1\sigma = \pm 0.1\mu\text{m}$ と変化せず、その効果は認められなかった。さらに精度を上げるためには、最小読取値の小さな機種に変更すれば良い。しかし、非常に振動の少ない環境で、かつかなり堅牢な顕微鏡ステージに取り替えなければならぬ。

トラック実長の誤差は、両者が複合され、ジルコン結晶の場合 $\pm 0.2 \sim 0.6\mu\text{m}$ となる。

5. 焦点深度

顕微鏡の焦点深度あるいは分解能は、対物レンズの開口数にもっとも影響される。たとえば、開口数が大きくなれば分解能は向上し、焦点深度は短くなる。乾燥系対物レンズ (CF Plan NCG 100x) と接眼レンズ (CFW 10x) の組合せでは、 $0.5\mu\text{m}$ となる。油浸対物レンズを用いても $0.4\mu\text{m}$ となり、わずかに短くなるだけである。したがって、100倍の対物レンズでは、ジルコン結晶内では約 $\pm 0.5\mu\text{m}$ の範囲で焦点が合っていることになる。これに測定者がトラック両端を判断するときの誤差を考慮すると、今回の繰返し測定結果の標準偏差と良く合っている。

以上のことから、深いトラックで、かつトラック両端が判別しにくい場合は、測定精度は悪くなる傾向にある。対物レンズの開口数を上げて、焦点深度を $0.3\mu\text{m}$ 以下に非常に浅くすることは、原理的にはほとんど不可能であるから、さらに精度を上げるためには、もっと根本的に見直す必要がある。

6. まとめ

顕微鏡直接観察からモニタ観察へのアプローチは、三次元トラック長計測システムの門を開かせた。また、安価な機器の製作と、操作性の良いマンマシンインターフェースをもつソフトウェアの開発によって、トラックの三次元データが焦点深度レベルの精度で容易に取得できるようになった。特に、マウスを用いた GUI (グラフィカル・ユーザー・インターフェース) は、数々のパラメータの変更が即座にしかも容易に試行錯誤的に行える利点がある。

一方、本システムの開発によって、トラック長計測の精度が焦点深度に非常に依存することが明らかになった。

7. 展望

さらなる高精度計測を追求するには、①高解像度、②Z軸の高精度読取り、③画像のZ軸方向における多重処理、④光学系 (共焦点、暗視野、レーザー光源) 等の改良とともに、画像処理という手法を用いなければならないであろう。

8. 文献

升元 眞二・弘原海 清 (1990) フィッシュョン・トラック画像計測システム, 情報地質, 1, 93-102.