

目的

「地震波による地球の内部構造の推定」は、図1のようにしてなされる。しかし、それに関する教科書の記述は形式的と思われるものがほとんどである。そこには、ジェフリーズの速度分布・地震波経路・走時曲線の絵が三種の神器のように掲載されているだけである。

我々はいかにして地球の内部構造を推定するのか、その推理のおもしろさ、自然科学の醍醐味はどこにも感じられない。特に、速度分布と地震波経路の関係が明確でないよう思われる。

そこで、任意の速度分布から地震波経路を自動的に描くシミュレーションを開発した。

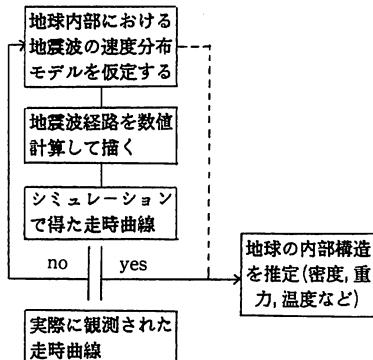


図1 内部構造の推定

概要

パソコンを用いて、地球内部における地震波の速度分布に応じた伝播経路が自動的に描けるようシミュレートした教材である。地震波速度の連続的な変化に対応して、伝播経路が屈曲していく様子が動的に表示され、シャドウ・ゾーンが生じることもひと目でわかる。

理科Iの学習における、地震波の速度分布と地球の内部構造の関係把握に役立つだけでなく、任意の速度分布から伝播経路を試行錯誤的に求め得るので、理科IIに活用できる。

アルゴリズム

図2で地球内部における地震波速度が、地球の中心

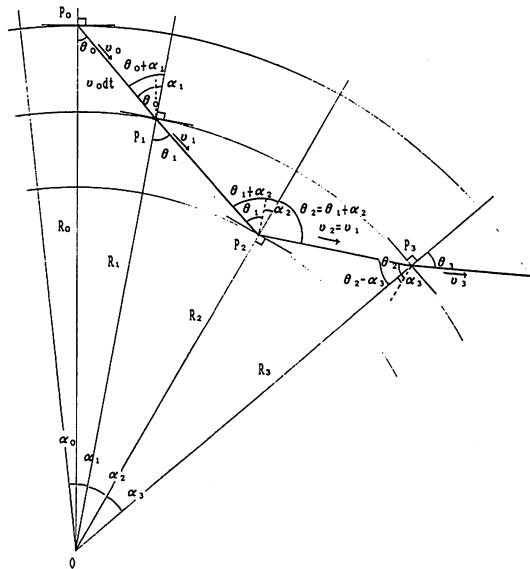


図2 経路の求め方

からの距離 R だけの一次関数として、 $v = kR + C$ で表わされるとする。

距離 R_0 、中心角 α_0 の点 P_0 を速度 v_0 、角度 θ_0 で出た地震波が時間 dt の間に点 P_1 まで達したとき、 $\Delta P_0 P_1$ において、

$$\overline{P_0 P_1} = v_0 dt$$

と近似すれば、簡単な三角関数の公式を用いて、

$$R_1 = \sqrt{R_0^2 + (v_0 dt)^2 - 2R_0(v_0 dt) \cos \theta_0}$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\{(v_0 dt) \cos \theta_0 / R_1\}$$

を得る。また、点 P_1 における地震波速度 v_1 は、

$$v_1 = kR_1 + C$$

である。ここで、点 P_1 において屈折の法則を適用すると、

$$\theta_1 = \sin^{-1}\{v_1 \sin(\theta_0 + \alpha_1) / v_0\}$$

が求められる。

同様の計算を繰り返せば、順次 R と α が定まり地震波経路を求めることができる。地球の外側へ向かう波、全反射する波についても同じである。そのフローチャートを図3に示す。なお、プログラム作成にはNECのPC-9801VM2を用いた。

* くわはら こうじ 徳島県立貞光工業高等学校 教諭 〒779-41 徳島県美馬郡貞光町字馬出63の2
TEL (088362) 3135

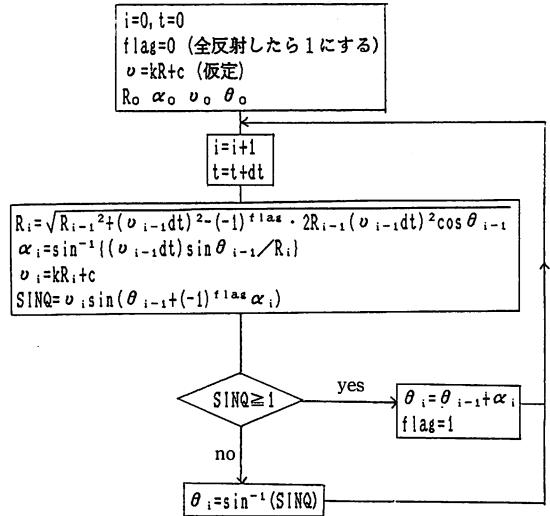


図3 経路の計算方法

操作方法

このシステムは、disk. write と disk. input の 2 つのモードより成る。前者は地震波経路を計算・表示しながらデータをディスクに書き込んでいく。後者はこれらのデータを読み込み再表示するだけのものであるから、経路の描画時間は前者の 5 分の 1 度に短縮される。以下、disk. write モードにおける操作を簡単に説明する。

1. 入射角の指定

図4で、まずデータディスクのドライブ番号とファイル名を答える。つぎに、同時に描かせる地震波の入射角は「何度ごとに何度まで」と指定する。

```

EARTH PC98disk.write

INPUT !

DRIVE# ? 2

NAME(9)? data31

INCIDENCE !

STEP[°]? 5

MAX [°]? 60
    
```

図4 入射角の指定

2. 速度分布の設定

図5の画面に、緑色の点（これをdotと呼ぶことにする）が現われる。画面下には、dotとその位置が表示されている。

ファンクションキーとカーソル移動キーを用いて dot を移動させ、速度分布曲線を描く。ここで言う曲線とは「折れ線」を意味しており、そのつなぎ目を画面にプロットするだけでよい。このときコンピュータ内

部では、速度分布が地球の中心からの距離 R だけの一関数として自動的に計算される。

3. 地震波経路の描画

入射角に対応した経路が自動的に描かれてゆく（図6）。図中の同心円は、そこで速度勾配が変化することを示している。また、経過時間が右上に 2 秒ごとに表示される。

4. 走時曲線のプロット

図7のように走時曲線も自動的に描くことができる。

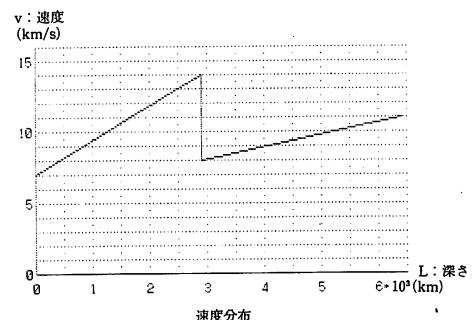


図5 速度分布の設定

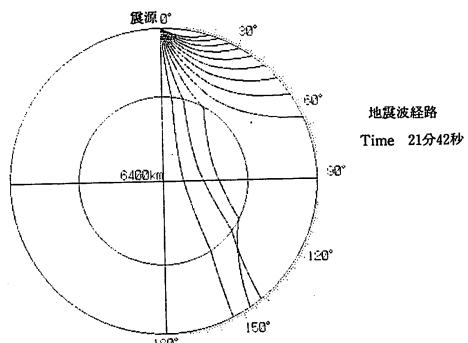


図6 地震波経路の描画

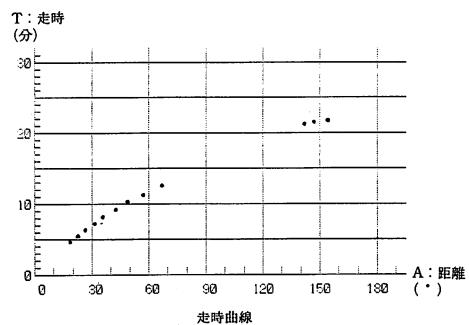


図7 走時曲線のプロット

ジェフリーズの速度分布モデル

図8-1はジェフリーズの速度分布モデルを折れ線で近似したものであり、図8-2、図8-3はこのモデルから得られる地震波経路と走時曲線である。

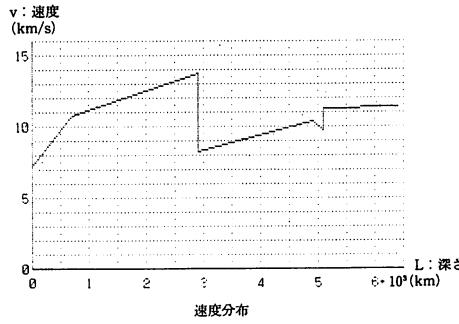


図 8-1 ジェフリーズの速度分布

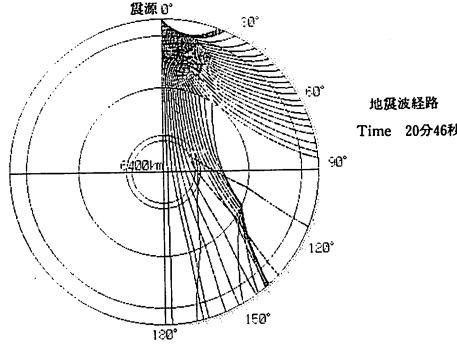


図 8-2 ジェフリーズの地震波経路

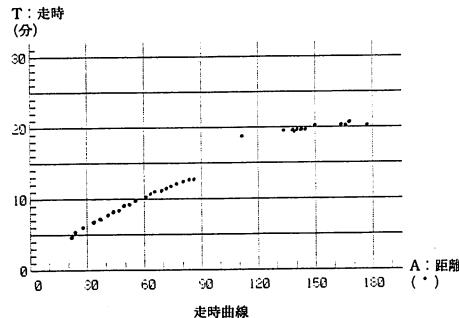


図 8-3 ジェフリーズの走時曲線

入射角が 1° ごとに 40° までの地震波が40本描かれている。これを全部描画するには、disk. write モードでは約37分、disk. input モードであれば約7分かかる。また、ディスクに格納されているデータ量は約 280 kB である。

授業への活用

このシステムは活用範囲の広い、柔軟性を備えたものである。例えば、次のような利用法・効果を考えられる。

1. 地震波経路の描画をデモするだけでも、波面の進行の様子などをダイナミックにとらえることができる。
2. いろいろな速度分布に対する地震波経路を描くこ

とにより、速度分布と経路の関係を明確に視覚化できる。

3. 地震波経路の描画中、キーボードの[CTRL]キーと[S]キーを同時に押すと描画が一時停止する。これを利用して、生徒自身に走時曲線をプロットさせることもできる。
4. アルゴリズムは簡単であり、用いた物理や数学の公式も高校教科書の範囲内である。パソコンも普及しつつあるから、理科の探究的課題にも取り入れられる。

PC-9801VM2 用の「1本の地震波経路を描くアルゴリズムが一番わかりやすい基本プログラム」を、図 9 に示す。

```

100 14*ノシシハロヲエカクキンアラム PC9801VM2
110 *INITIAL CONDITION
120 CONSOLE 0.25.0.1:WIDTH 80.25:SCREEN 2.0:CLS 1
130
140 *DIMENSION
150 H=10 : DIM VS(H),VE(H),L(H),K(H),VC(H)
160 I=1000 : DIM RI(H),AI(H),V(H),Q(H),X(H),Y(H)
170
180 *READING_JEFFREYS
190 NMAX=5
200 P=0.1 TO NMAX
210 FOR J=0 TO NMAX
220 READ VS(J),VE(J),L(J),K(J),VC(J)
230 VC(J)=VS(J)-K(J)*L(J)-L(J-1)
240 NEXT J
250 DATA 7.2,10.8,700
260 DATA 10.8,13.8,2900
270 DATA 8.2,10.4,4900
280 DATA 10.4,9.8,5100
290 DATA 11.2,11.4,6400
300
310 *EARTH DRAW
320 WINDO(V,-L(NMAX))-(L(NMAX),L(NMAX))
330 VIEW(0,-L(NMAX),-L(NMAX))
340 FOR J=0 TO NMAX-1
350 CIRCLE(0,0,-L(NMAX))-L(J),...
360 NEXT J
370 LINE(0,-L(NMAX))-(0,L(NMAX)),1
380 LINE(-L(NMAX),0)-(L(NMAX),0),1
390
400 *INPUT_QSTART
410 WHILE INKEY$>":WEND
420 LOCATE 60,3:INPUT "コマチャケ":QSTART
430
440 *PARA_INITIAL
450 PAI=3.14159 : DT=2!: T=0 : I=0 : A=0
460 R(0)=L(NMAX) : A(0)=0 : V(0)=VS(1): Q(0)=QSTART: 800*PAI
470 X(0)=-L(NMAX) : FLAG=0 : CI=0 : C2=0
480
490 *WAVE
500 I=1
510 T=DT
520 GOSUB *CALC_OF_R,A
530 GOSUB *CALC_OF_V,Q
540 GOSUB *DISPLAY
550 GOTO *WAVE
560
570 *CALC_OF_R,A
580 R(I)=SQR(R(I-1)^2+(V(I-1)*DT)^2-(-1)^FLAG)*2*R(I-1)*V(I-1)*DT*COS(Q(I-1))
590 C(I)=ATN(C1/SQR(1-C1^2))
610 RETURN
620
630 *CALC_OF_V,Q
640 FOR J=NMAX TO 0 STEP -1
650 IF R(0)-R(I)>L(J) THEN *TRAP
660 NEXT J
670 *TRAP
680 V(I)=K(J)+((R(0)-R(I))/C(I))*VC(J-1)
690 A(I)=V(I)+SIN(Q(I-1))+(-1)^FLAG*A(I)/V(I-1)
700 IF C2>-.999 THEN Q(I)=Q(I-1)+A(I):FLAG=1:RETURN
710 Q(I)=ATN(C2/SQR(1-C2^2))
720 RETURN
730
740 *DISPLAY
750 LOCATE 60,5:PRINT USING "Time ##0.##";T Y GO.T MOD 60
760 LOCATE 60,6:PRINT USING "#0.##km Radius ##0.##km":R(I)
770 LOCATE 60,7:PRINT USING "#0.##km/s Velocity ##0.##km/s":V(I)
780 LOCATE 60,8:PRINT USING "V= ##.##km/s":V(I)
790 LOCATE 60,9:PRINT USING "Q= ##.##":Q(I)*180/PAI
800 A=A+4*(I-1)
810 X(I)=R(I)-SIN(A):Y(I)=R(I)*COS(A)
820 LINE(X(I-1),Y(I-1))-(X(I),Y(I)):I
830 IF R(I)>R(0) THEN *INPUT_QSTART
840 RETURN

```

図 9 基本プログラム

その他補遺事項

本研究のプログラムは、現在 PC-9801VM2 (日本電気)、FM16B-FDII (富士通) で動作している。僅かな修正で他機種へも移植できるが、8 ビットのパソコンでは処理速度が遅い。

参考文献

- 1) 牛来正夫：地球内部の物理・化学、東海大学出版会 (1980)
- 2) 坪井忠二：地球物理学、岩波書店 (1976)
- 3) 田治米鏡二：弾性波による地盤調査法、楨書店 (1981)