

# 2001(平成13)年箱根群発地震活動の地震波形解析手法

村瀬 圭\*、棚田俊收\*

The analysis for seismic waveforms of the 2001 Hakone earthquake swarm

by

Kei MURASE\* and Toshikazu TANADA\*

## 1. はじめに

2001(平成13)年箱根群発地震活動は、温泉地学研究所の微小地震観測網内を活動域とし、観測点から数km以内の近傍で多くの地震が発生した。このため、観測された地震波形は、震源の情報をよく保存していると考えられる。

この群発地震活動において、当所の観測点で検出されたすべての地震は、P相とS相が明瞭に区別できる波形を持ち、断層運動により生じたものといえる(宇津, 1987)。断層運動で起こる地震については、地震波形と断層運動の諸要素(断層パラメータ:断層長・地震モーメント・応力降下量・滑り量)との関係が理論的に明らかになっている(例えば、Brune, 1970など)。村瀬、棚田(2002)は、この理論を利用して、2001(平成13)年箱根群発地震活動について、地震波形の周波数解析により震源断層の特徴の調査を試み、群発地震活動域の構造的な特徴を得た。

本稿では、観測された地震波形から断層パラメータを導き出すための、地震波に含まれるノイズ(雑振動)や解析対象波形の選別、波形周波数解析の処理方法について、その具体的な手順を主に報告する。

## 2. 波形の選別

地震波は、伝搬距離にしたがって波面が広がり振幅が減衰する。これを幾何減衰と呼ぶ。また、伝搬経路上の媒質により、地震波のエネルギーは散乱や吸収を受けて減衰する。これは、散乱減衰および内部減衰と呼ばれる(理論地震動研究会, 1994)。震源の情報を得るためには、これらの減衰を補正する必要がある。このとき、幾何減衰は震源と観測点の距離、散乱減衰と内部減衰では媒質の特性がわかれば補正できる。地震波の場合は、媒質の減衰特性は、 $Q$ 値によって定義される(宇津, 1984)。いずれの場合も、補正には震源距離が必要であり、震源の位置が決まっている地震のみを今回の解析の対象とでき

る。

さて、地震が発生したとき、地震計によって観測される地震波形は、地震により発生した地震波、別の地震で発生した地震波、地震以外の原因により発生したノイズ、観測機器の内部で発生するノイズなどが合成されたものである。ここで、目的である断層運動の情報を持っているものはのみであり、これが解析に必要なシグナル(信号)である。～はすべてノイズとなり、解析結果の有効性を失わせる原因となる。多くの場合、観測波形から完全に～を取り除くことはできない。したがって、と～との振幅比が十分に大きい地震波形が、波形解析に適している。この振幅比は、 $S/N$ (シグナル/ノイズ)比と呼ばれる。が小さい地震(マグニチュードが小さい地震である場合が多い)では、～の振幅が相対的に大きくなり、 $S/N$ 比が小さくなる傾向が見られ、波形解析には適さない。

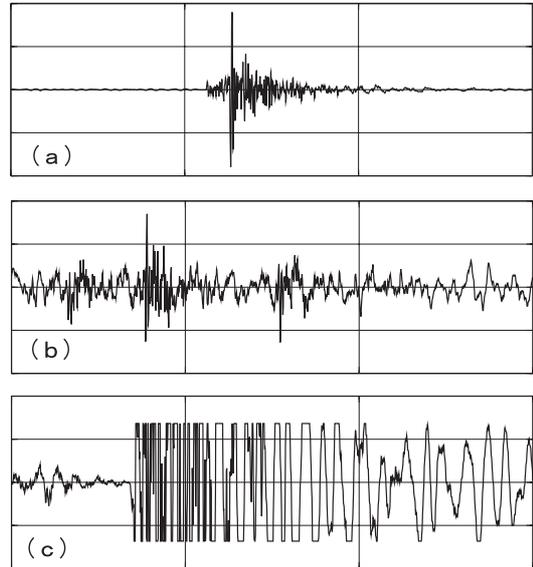


図1 地震波形データの例  
a: 解析可能な波形  
b:  $S/N$ 比が小さい波形  
c: 振幅が振り切れた波形

\* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586  
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第34巻, 45 - 50, 2002.

また、微小な地震波と大きい地震波を同一の地震計で観測するには、ダイナミック・レンジや、データ容量の問題があり、収録・再生・解析等の処理が困難となる。一般的には、観測対象とする地震の大きさによって最大振幅を決めた地震計を何種類か並べて観測する。今回の解析に用いたデータは、高感度地震計の記録であり、大振幅の地震波(マグニチュードが大きい地震である場合が多い)は記録が振り切れているものが多く、波形解析には適さない。図1に、地震波形の例を示す。

以上述べたように、S/N比の悪いデータや振り切れたデータを除去して、波形解析の対象とする波形データを選び出した。実際には、記録を再生して可視波形とし、これらを目視により選別した。当所の波形データは、winシステム(ト部、束田、1992)により収録・検出されている。したがって、この選別作業は、winシステムにより波形を表示しておこなった。

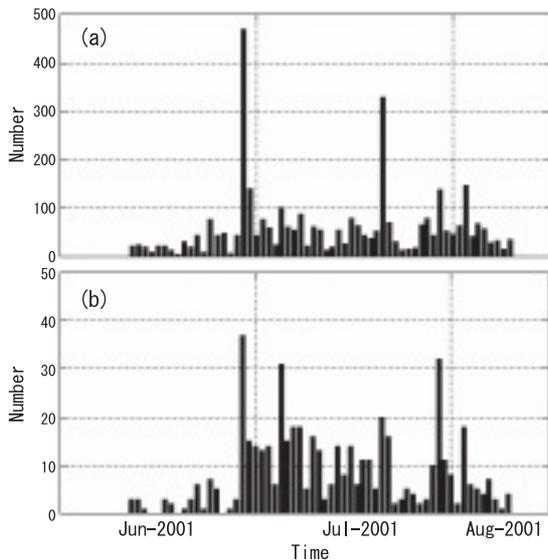


図2 震源が求められている地震(a)と波形解析処理をおこなった地震(b)の日別頻度の比較

選別の結果、今回の解析では、2001(平成13)年6月12日から同年8月10日までに起こった地震のうち499個について、震源断層の特徴を得ることができた。この期間で震源の決まった地震は3505個あり、その約1/7が処理できたことになる。また、解析された地震のマグニチュードの範囲は、-0.1~1.3である。今回の群発地震活動において震源の決まった地震の多くはこの範囲に含まれ、全体の約6/7におよぶ3005個である。したがって、今回の解析によって得られた震源の特徴は、数の上では、大半の地震を代表している範囲のものといえる。ただし、地表で有感地震となる程度のマグニチュードの地震では、記録が振り切れているため、これらの発生機構も同じで

あるかどうか、波形から直接は得られていない。図2および図3に、震源の決まった地震とそのうちで波形解析をおこなった地震について、日別頻度と震央分布の比較をそれぞれ示す。

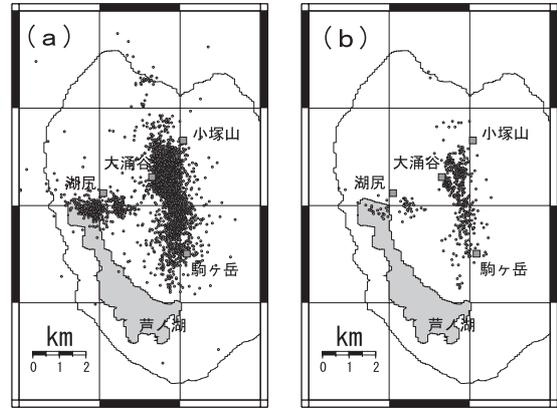


図3 震源が求められている地震(a)と波形解析処理をおこなった地震(b)の震央分布の比較  
図中の□は、解析に用いた観測点を示す

### 3. 断層パラメータを導き出す関係式

断層から放出される地震波の形状は、断層の大きさや運動様式により決まる。したがって、ノイズ等の混入が少なく、震源距離が短く減衰作用の少ない地震波形データがあれば、震源断層の大きさや運動様式を見積もることができる。今回の解析には、S波変位波形のスペクトルと断層運動のモデルの一つであるBrune(1970)のモデルを用いた。

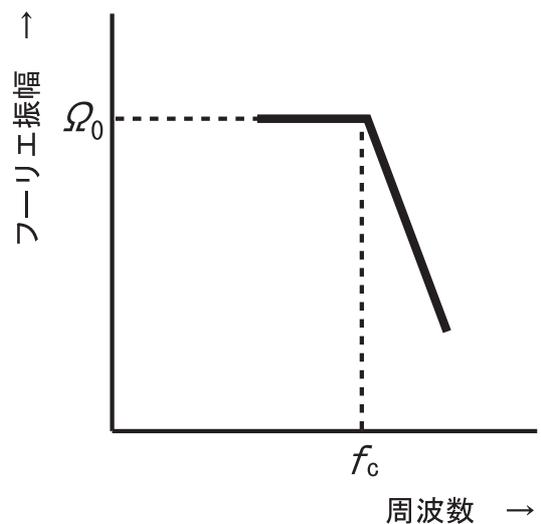


図4 S波スペクトルの模式図

このモデルでは、断層面が円形、断層面にかかる応力は断層面上のどの場所でも一定と仮定されている。今回扱ったような規模の小さい地震では、断層面が小さいので、この仮定を十分に満足すると考えた。

S波変位波形のスペクトルは、模式的に表すと、図4の太線のようになる。太線の屈曲点は、断層が有限の長さを持つために形成される。この屈曲点における周波数は、コーナー周波数と呼ばれ、断層の半径との間に次式の関係がある(Madariaga, 1976)。

$$a = 0.21 / f_c \quad (1)$$

ここで、 $a$  は断層の半径(単位:m)、 $c$  はS波速度(m/sec)、 $f_c$ はコーナー周波数(Hz)を示す。また、屈曲点より低周波部分ではフーリエ振幅はほぼ一定となり、ここではこれを低周波振幅と呼ぶ。低周波振幅(m·sec)から地震モーメント $M_0$ (N·m)を求めることができ、

$$M_0 = 4 \pi r^3 \rho c \quad (2)$$

である。ここで $\rho$ (g/cm<sup>3</sup>)は岩石の密度、 $r$ (m)は震源距離、 $c$ は地震波放射特性を表す係数である。今回の解析では、 $\rho = 2.8$ 、 $c = 2000$ 、 $\rho c = 0.85$ (Thatcher and Hanks, 1973)と仮定し、 $r$ は震源データから個々に求めた。なお、地震モーメントとは、地震を起こした断層運動の強さを物理的に表した量である。

さらに、 $a$ と $M_0$ から、応力降下量 $\sigma$ を求めることができる。

$$\sigma = 0.44 M_0 / a^3 \quad (3)$$

また、断層の滑り量 $U$ は、次式で定義される。

$$U = M_0 / (0.67 \mu a^2) \quad (4)$$

ここで $\mu$ (Pa)は剛性率を示し、 $\mu = 1.12 \times 10^{10}$ とした。なお、応力降下量とは、地震前後の応力差であり、通常は断層面の物性により決まり、地震のマグニチュードとは関連しないと考えられている(宇津, 1984)。

ところで、実際の地震波は、伝搬の過程で減衰するため、図4のようなスペクトルを得るためには補正が必要である。各種の減衰のうち、幾何減衰については(2)式で補正される。また、幾何減衰は周波数依存性がないため、スペクトルの形状には影響しない。これに対し、散乱減衰と内部減衰は、周波数依存性があるため、 $f_c$ と $a$ の読み取り前に補正をおこなわねばならない。これらは、以下の式で補正できる。

$$Amp_f(f) = Amp_f(f) \exp(-rf/Q) \quad (5)$$

ここで、 $Amp_f$ はフーリエ振幅、 $f$ は周波数、 $Q$ は減衰特性を示す量で、今回の解析では高原、小原(1994)を参考にして $Q = 200$ とした。

以上より、地震波形の周波数解析による断層パラメータの推定は、散乱減衰と内部減衰が補正されたS波変位波形のスペクトル図を作成し、その $f_c$ と $a$ を読み取り、(1)~(4)式を用いて算出できる。

#### 4. SACを利用した地震波形解析の手順

波形データ処理をおこなう総合的な解析ツールとして、SAC(Seismic Analysis Code)なるワーク・ステーション上で動くプログラムがあり、今回の解析ではこれを用いた。SACは米国のLawrence Livermore National Laboratoryにて開発されたフリーソフトウェアで、著作権はカリフォルニア大学が持つ。SACでは、速度波形から変位波形への変換、S波初動部分の抜き出し、スペクトル解析、減衰補正の一連の操作をおこなった。

また、SACで得たスペクトル・データは、作図ツールプログラムGMT(The Generic Mapping Tools)を用いて図化し、スペクトル・プロットを作成した。GMTはハワイ大学で開発されたフリーのプログラム・ツール群で、数値データを様々な条件でpostscript型画像ファイルとして出力する。

最後に、これから読み取った $f_c$ と $a$ をスプレッド・シート(今回はMicrosoft Excel)で処理し、断層パラメータを得た。以下順を追って、処理の過程を記す。SACの具体的な操作内容については、付録として末尾に添付した。なお、UNIX操作の記述に際して、ここで扱ったコマンドやデータは、検索パス上あるいはカレント・ディレクトリにあるものとし、これらのファイルを使用する環境が整っているものとする。

##### (1) win形式からSAC形式へのデータ形式変換

地震波形データをSACで処理する場合、SAC形式のデジタル波形データが必要である。当所の波形データはデジタル方式であるが、験測システムであるwinシステムの形式となっているため、変換しなければならない。今回は、win2sacを用いて変換をおこなった。win2sacは、東京大学の卜部氏により作成された、win形式からsac形式へのファイル変換ツールである。(付録1参照)

##### (2) SACの準備

SACによるデータ処理の前に、SACプログラムの起動、設定、データの読み込みという準備作業をおこなう。(付録2参照)

##### (3) 速度波形から変位波形への変換

Bruno(1970)のモデルを適用する解析では、S波初動部

分の変位波形を用いる。当所の地震波形データは、地動速度波形であるため、S波変位波形を得るための処理が必要である。

波形データを速度波形から変位波形へ変換するには、時間について積分すればよい。SACでは、区分求積法による数値積分ができる。積分の際には、波形データに含まれる直流および低周波成分をあらかじめ除去しておく必要がある。直流および低周波成分を残したまま積分をおこなうと、変位波形にドリフトや大振幅長周期の波形が重なることがある。これらの除去には、トレンド(直流成分)除去、またはハイパス・フィルターを使用する。

なお、今回の解析には、地震波形のうちS波初動部分以外は不要である。したがって、波形データからS波初動部分のみを切り出す処理をおこなう。(付録3参照)

#### (4)スペクトル解析と減衰補正

次に、そのデータに対してフーリエ変換をおこなう。SACでは、高速フーリエ変換ができる。さらに、ここで得られたスペクトル値に対して減衰補正をおこなう。

(付録4参照)

#### (5)スペクトルの平滑化

通常、スペクトルは、ギザギザしていて特徴を読み取りにくい。このため、平滑化処理をおこなう。スペクトルの平滑化では、一部区間(スペクトル・ウィンドウ)を重み付き平均する手法がとられる。今回は、次式で示す2サイクルのHanningウィンドウを用い、自作のプログラムにより平滑化をおこなった。

$$(G_k)_{avr} = 0.0625G_{k-2} + 0.25G_{k-1} + 0.375G_k + 0.25G_{k+1} + 0.0625G_{k+2}$$

ここで $G_k$ はある点におけるスペクトル値、 $(G_k)_{avr}$ はウィンドウ内での重み付き平均値である。

#### (6)スペクトル図の描画・読み取り・断層パラメータの算出(GMT・他)

以上の手順で作成されたスペクトル・データをプロットして可視化する。データのプロットはSACでもできるが、SACの画像編集機能が貧弱なため、細かい描画設定が可能な別種のツールを使う方がよい。ここでは、GMTを用いてpostscript型の画像ファイルを作成し、これをディスプレイ上に表示、あるいは紙面に印刷して、値の読み取りに用いた。

スペクトルは、両対数軸上で表示させた。また、参考のため、元データ(速度波形)と切り出された変位波形も共に示した。例を図5に示す。これより、 $f_c$ と $\Omega_0$ の読み取りをおこなった。

断層パラメータの算出は、読み取り値と第3章に示した式をスプレッド・シートに入力しておこなった。これにより、各観測点の波形ごとに断層パラメータが見積もられる。ここで、地震波の振幅の大きさは、断層運動の方向性のため、震源からの方位によって変わる性質がある。したがって、各観測点での値を相加平均して方向性の影響を除去し、最終的な結果を得た。

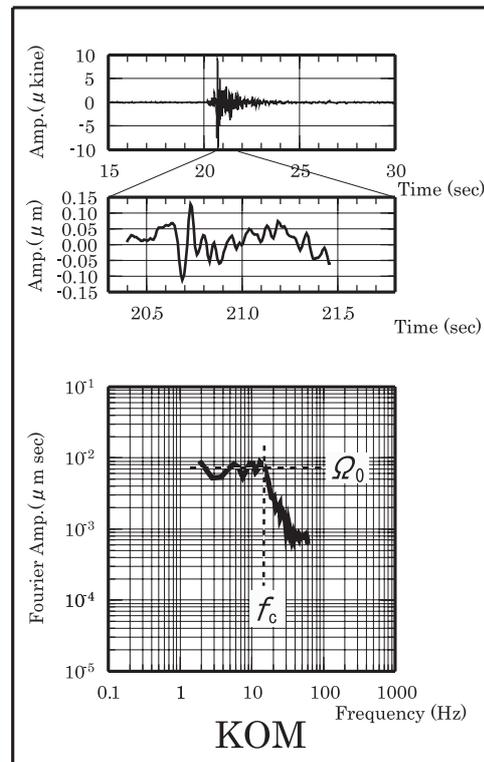


図5 駒ヶ岳観測点(KOM)で記録された地震波形(上)、S波変位波形(中)とスペクトル(下)の表示例

### 5. 解析結果の検討例

図5で求められた解析結果は、個々の地震についての断層パラメータである。今回のような群発地震では、大地震と異なり、個々の地震を個別に扱うよりも、集団として扱った方が特徴を明らかにできる。そこで、断層パラメータの分布図を作成し、その形状から活動全体の特徴を簡単に述べる。

図6に地震のマグニチュードに対する断層長、および応力降下量の分布を示す。これらに認められる特徴として、まず断層長は40 m程度のもが多い。また、マグニチュードは、 $-0.1 \sim 1.3$ の範囲について、断層長に依存しないが、応力降下量と関係があることが認められる。図7には、応力降下量の空間分布を示す。ここでは、活動域中央浅部には応力降下量の小さい地震が密集し、活動域縁辺および深部には応力降下量の相対的に大きい地震が多く分布することが、特徴として見られる。

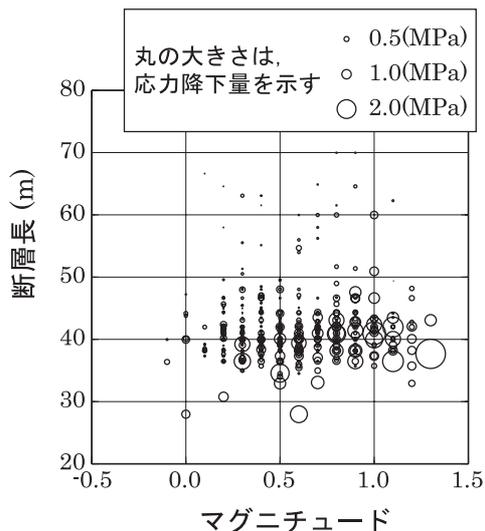


図6 マグニチュードと断層長・応力降下量の関係

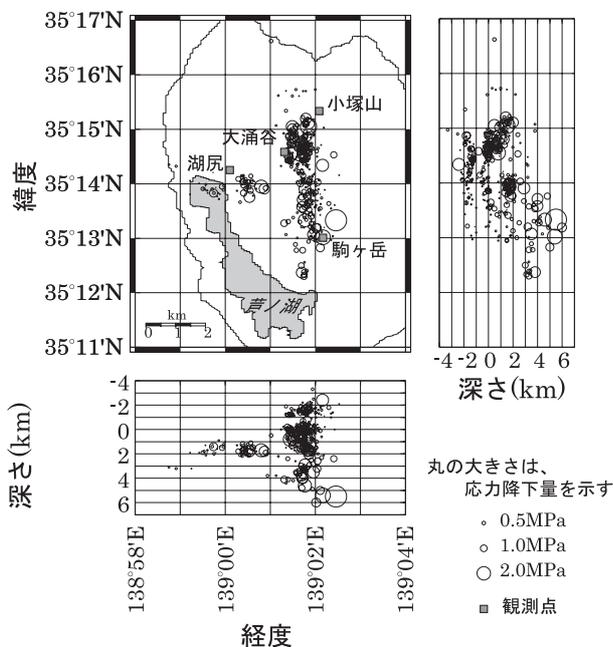


図7 応力降下量の空間分布

## 6. おわりに

デジタル波形からSACやGMTというパッケージ・ソフトウェアにより効率よく断層パラメータを推定する手順について、2001(平成13)年箱根群発地震活動で得られた波形で説明した。さらに、個々の地震における断層パラメータを集団として扱うことで、群発地震全体の特徴を明らかにできることを示した。この他にも、断層パラメータの時間変化傾向など、波形からの震源情報をより多く読み出すことで、より多面的な地震活動解析が可能となるであろう。

## 参考文献

- Brune, J. N. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
- Madariaga, R. (1976) The dynamics of an expanding circular fault, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 639-666.
- 村瀬 圭、棚田俊收 (2002) 2001年箱根群発地震の地震波形解析について, 地球惑星科学関連学会 2002年合同大会予稿集, S041-P006.
- 理論地震動研究会 (1994) 地震動 - その合成と波形処理 -, 鹿島出版会, 256p.
- 高原元昭、小原一成 (1994) 富士・箱根地域の  $Q_e^{-1}$ , 地震 2, 47, 85-88.
- Thatcher, W. and Hanks, T. C. (1973) Source parameters of southern California earthquakes, J. Geophys. Res., 78, 8547-8576.
- ト部 卓、束田進也 (1992) WIN - 微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), 日本地震学会講演予稿集, No 2, 331.
- 宇津徳治 (1984) 地震学 第2版, 共立出版株式会社, 310p.
- 宇津徳治編著 (1987) 地震の事典, 朝倉書店, 568p.

## 付録

### (付録1)

win 2 sacの実行には、UNIXのコマンド・ラインから、  

```
% win 2 sac xxxxxx xxxxxx↓
```

と入力する。xxxxxx xxxxxxの部分には、win形式のデータ・ファイル名が入る。なお、変換後には、波形データのチャンネルごとに新ファイルが生成されており、それらのファイル名は、観測点コードと波形成分より自動生成される。例えば、駒ヶ岳観測点(KOM)の上下動成分はKOM\_uerとなり、大涌谷観測点(OWD)の東西成分ではOWD\_eer、小塚山観測点(KZY)の南北成分ではKZY\_nerとなる。これらは元のwin形式時のファイル名と無関係に決まるため、わかりやすい名前に変更するなどの注意が必要である。

### (付録2)

SACの起動は、UNIXのコマンド・ライン上で、  

```
% sac↓
```

と入力する。すると、以下のプロンプトが現れる。  

```
SAC>↓
```

この状態で、SACコマンドを入力し、各種処理をおこなう。SACコマンドには標準形と省略形があるが、ここで

は省略形を主として用いる。

なお、この状態では、通常のUNIXコマンドは受け付けない。これらを使う場合は、コマンドの前にscを加える。例えば、ファイル名一覧を表示する場合は、

```
SAC > sc ls
```

と入力する。

まず、データファイルを読み込む。ファイル読み込みにはrコマンドを用い、例えばKOM .uerを読み込むには、

```
SAC > r KOM .uer
```

と入力する。

次に、この波形をディスプレイに表示する。波形を表示する前に、表示先の指示をおこなう。これは、bdコマンドとqdpコマンドによる。

```
SAC > bd x
```

これは、表示先としてX-windowを指定することを示す。入力後、ディスプレイ上に新しいウィンドウが開く。波形等のプロットは、すべてこの新ウィンドウ内に表示される。

```
SAC > qdp off
```

これは、高速低画質描画モードを解除することを示す。SACの描画は、標準では高速低画質描画モードであり、目視判定に差し支えるほどプロットが粗い。したがって、このコマンドで高画質モードへの変更をおこなうべきである。この後、pコマンドを用い、

```
SAC > p
```

とすると、波形がディスプレイに表示される。

なお、処理済みのデータを保存する場合には、writeコマンドを用いる。例えば、メモリ上のデータをtemp .datなるSAC形式ファイルとして保存するには、

```
SAC > write sac temp .dat
```

と入力する。

#### (付録3)

トレンド除去にはrtrendコマンドを用い、

```
SAC > rtrend
```

と入力する。ハイパス・フィルターの場合、hpコマンドを用いる。ここで、フィルターの条件によりパラメータが必要になり、例えば2 Hzのバターワース型ハイパス・フィルター処理をおこなうときは、

```
SAC > hp co 2
```

とする。積分はintコマンドを用い、

```
SAC > int
```

と入力する。

波形の切り出しでは、cutコマンドにより切り出すタイムウィンドウを設定した後、rコマンドで再読込をする。

今回は、後から高速フーリエ変換をおこなうので、データの点数は2のべき乗である方がよい。したがって、データ点数により範囲を指定する。例えば、データの先頭から19秒目の位置を起点に512点分のデータ(100 Hzサンプリングなら5.12秒分、120 Hzサンプリングなら約4.27秒分)を切り出すには、

```
SAC > cut b 19 n 512
```

とする。これに続けてrコマンドで該当するファイルを読み込むと、そのファイル中の指定部分のみがメモリ上に読み込まれる。なお、この段階までにデータに処理を施してある場合、cutコマンドを使用する前にそのデータをwriteコマンドで仮保存し、範囲指定した後に再読み込みする必要がある。

なお、これらの処理は、メモリ上のデータにのみおこなわれ、ディスプレイ上のプロットには反映されない。処理結果を表示するには、あらためてpコマンドを実行し再描画する。

#### (付録4)

フーリエ変換には、fftコマンドを用いる。

```
SAC > fft
```

と入力すると、メモリ上のデータがフーリエ変換される。このときメモリ上では、新たにスペクトル・データが生成され、元の波形データはメモリ上から消去される。これをディスプレイに表示するにはpspコマンドを用い、

```
SAC > psp am
```

と入力する。

減衰補正にはrqコマンドを用いる。例えば、Q値が200、S波速度が $\lambda$  km/sec、震源距離が $\delta$  kmならば、

```
SAC > rq q 200 r 5 c 2
```

と入力する。このとき、処理が反映されるのはメモリ上のデータのみであるため、pspコマンドで再描画する。

スペクトル・データの保存には、波形データと同様にwriteコマンドを用いる。なお、これらのデータをSAC以外のプログラムで利用するには、データファイルがSAC形式では都合悪い。このため、writeコマンドでは、アスキー形式での保存ができる。例えば、データをresult .datなるアスキー形式ファイルで保存するには、

```
SAC > write alpha result .dat
```

と入力する。ただし、ここで生成されるファイルは、SAC用の特殊な配置のアスキー形式をとるため、他のプログラムで利用するためには、さらなる変換が必要になる場合がある。今回は、変換用のプログラムを新たに作成してこの作業をおこなった。