

統計数理研究所研究活動

創立記念講演会要旨

と き：1983年6月3日

と ころ：統計数理研究所 講堂

微小地震をとらえる

——時系列モデルによる自動検出——

北 川 源 四 郎

科学の発展段階には、過去に集積された知識が一気に体系化されるときがあるように見える。過去四半世紀の地球物理学の発展はまさにその好例である。プレートテクトニクス理論は20世紀初頭の大陸移動説を劇的に復活させ、地震の発生を全地球的な運動から説明し、地震がプレートの移動などともなって発生することを明らかにした。こうした地震発生メカニズムの解明ともなって地震発生の危険地帯が何か所か特定され微小地震観測網が整備されつつある。これらの観測点で観測される微小地震の震源を求め断層面の推定を行なう研究も実際に行なわれている。しかし断層面のありかを推定するためには数多くの微小地震の震源を極めて正確に推定することが不可欠である。また各地の観測網で時々刻々集積される観測データは極めて膨大な量に達するから、それを有効に利用するためには観測記録の自動処理が必須のものとなってきた。

図1は1982年3月に北海道えりもで記録された地震波の一例である。このように各観測点では東西、南北、上下の三方向の振動が常時記録され

ている(地震記録)。図1からもわかるように地表は地震発生時ばかりでなく地震波到着以前の平常時にも常に不規則な変動を示している(常時微動)。このような時間とともに変動する不規則現象の観測値の系列は時系列と呼ばれている。地震記録を時系列としてみると波形のパターンが時間とともに変化することにその特徴がある(非定常性)。この特徴をそれぞれの目的に応じて適当なモデル族の形で表現し観測データに基づいて最適なモデルを求めそのモデルを本来の目的に供しようというのが統計的モデリングの方法である。このような方法の実現のためには数多くのモデルのよしあしを評価、比較することが必要となる。情報量規準 AIC はこのようなモデル選択のために開発された統計量で、モデルがいくつか想定される場合には

$AIC = -2(\text{最大対数尤度}) + 2(\text{パラメータ数})$ が最小となるものを採用することによって最適なモデルを選ぶことができる(坂元ほか(1983))。

しかしながら、ここでの問題のような場合には、右辺の第一項に含まれる尤度の計算とその最大化には多くの計算を要するから、効率のよい計算法が必要となる。この困難は時系列の状態空間表現

$$x(n) = F(n)x(n-1) + G(n)v(n)$$

$$y(n) = H(n)x(n) + w(n)$$

を利用し次のカルマンフィルタ等の効率のよい

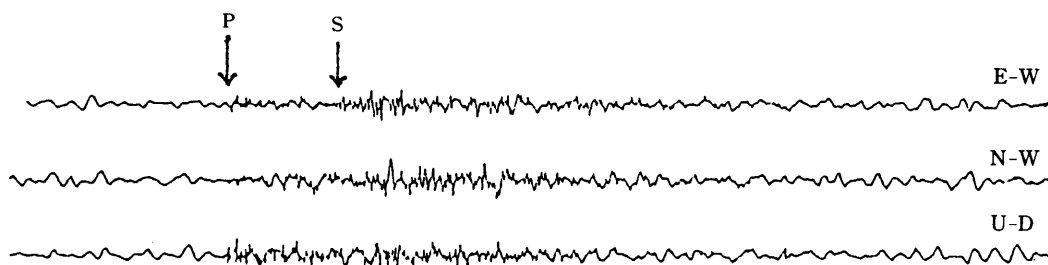


図1. 地震データ

の局所スペクトルが定義できる。もちろん、このモデルは極めて多くの係数を含んでいるのでそのままの形では観測データから推定を行なうことはできない。係数の時間的変化が滑らかであるものと仮定し、

$$y(n) = \sum_{j=1}^m a(j, n)y(n-j) + w(n)$$

$$(1-B)^2 a(j, n) = v(n)$$

ただし $Ba(j, n) = a(j, n-1)$, というモデルを想定すると全体のモデルが次の状態空間表現の形で表現できる (Kitagawa (1983a)).

$$F = \begin{bmatrix} 2I_m & -I_m \\ I_m & 0 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} y(n-1) \\ \vdots \\ y(n-m) \\ 0 \end{bmatrix}$$

したがってカルマンフィルタと AIC 最小化法

の採用によって最適なモデルを求めることができる。図3は図1に示された地震記象の特徴をとらえるために

$$p(f, n) = \frac{\sigma^2(n)}{|1 - \sum_{j=1}^m a(j, n) \exp(-2\pi i j f)|^2}$$

によって局所スペクトルを求めたものである。常時微動では 1Hz の波が卓越していることがわかるがこれは地震計の固有振動数に一致する。また、P 波では 10Hz 程度の、S 波では 4Hz 程度の波が卓越しているが時間とともに減衰し常時微動にもどっていく様子が見られる。

【3】 ノイズに埋もれた微小地震の分離

地震波の振幅が著しく小さい場合には地震波が常時微動の動きの中に埋もれてその検出が困難に

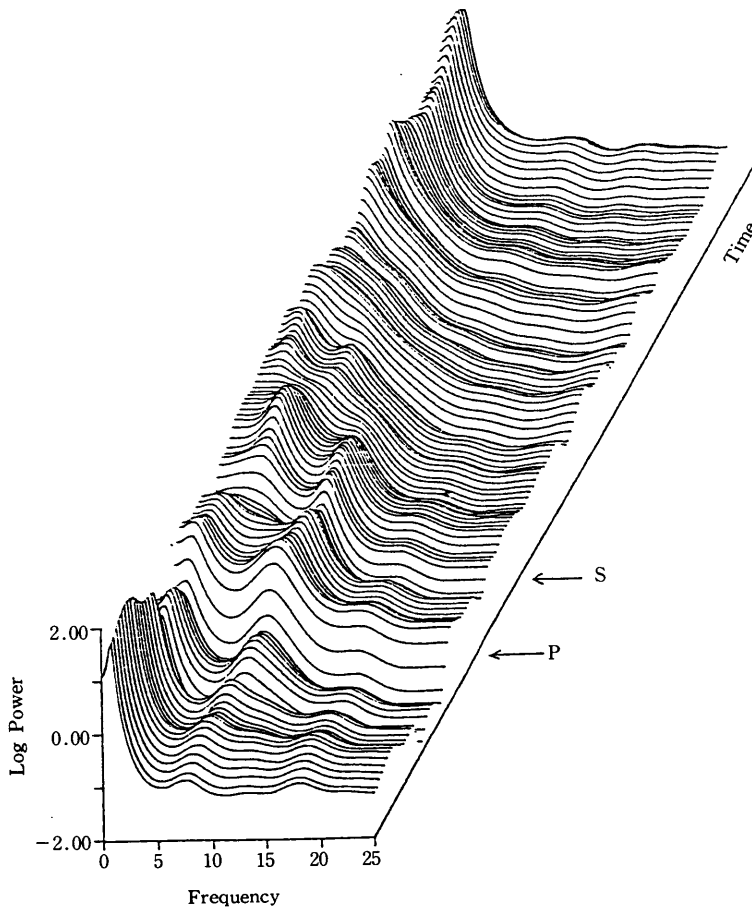


図3. 局所スペクトル

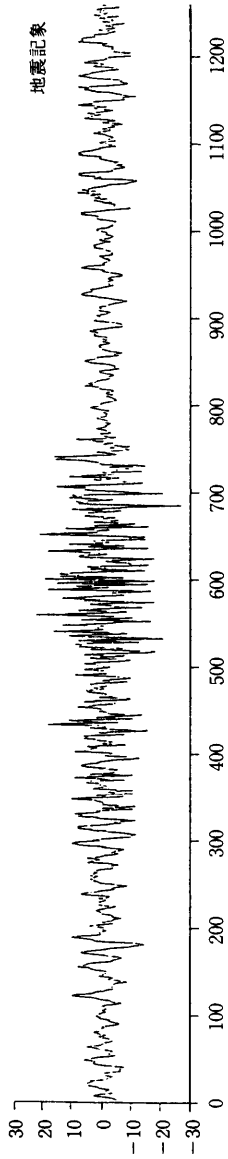


図4. 微小地震(1982年10月, 札幌)

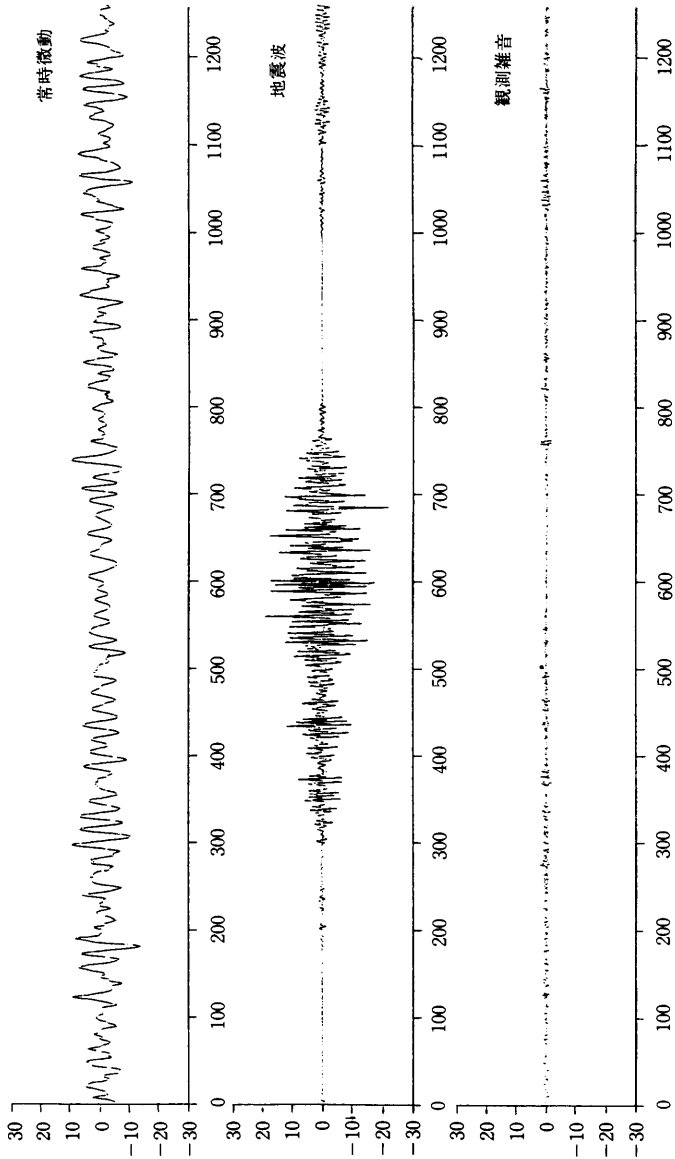


図5. 地震波形の3成分への分解

なる(図4)。このような場合には常時微動に振幅の小さな地震波が混入したと考え

(観測値)=(常時微動)+(地震波)+(観測雑音)という表現を考えるのが自然である。常時微動,地震波,観測雑音の成分がそれぞれ適当な時系列モデルで表現できるものと仮定すると次の分離モデルが得られる (Kitagawa (1983b)),

$$y(n) = r(n) + p(n) + w(n)$$

$$r(n) = \sum_{i=1}^m a(i)r(n-i) + u(n)$$

$$p(n) = \sum_{i=1}^{\ell} b(i)p(n-i) + v(n)$$

これより

$$F = \begin{pmatrix} a(1) \cdots a(m) \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}^t$$

を用いると観測値を表現する状態空間表現が得られ各成分への分解が可能となる。図5はこの方法による図4のデータの分解である。地震波形が常時微動から分離され図4よりも地震波の存在が鮮明になっている。データ右端においても地震波が分離されていることも注目値する。

謝 辞

地震記録を提供され、また問題提起をされた北海道大学理学部地震予知センターの高波鉄夫氏に感謝します。

参考文献

Kitagawa, G. (1983a). Changing spectrum estimation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 89, No. 4.

Kitagawa, G. (1983b). State space modeling of nonstationary time series and smoothing of unequally spaced data, *Proceedings of*

the Symposium on Time Series Analysis of Irregularly Observed Data, Lecture Notes in Statistics, Springer-Verlag.

Ozaki, T. and Tong, H. (1976). On the fitting of non-stationary autoregressive models in time series analysis, *Proc. of 8th Hawaii Int. Conf. in System Sciences*, Western Periodical Company, 224-226.

坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎(1983). 情報量統計学, 情報科学講座 A.5.4, 共立出版.

横田 崇, 周 勝奎, 溝上 恵, 中村 功(1981). 地震波データの自動検測方式とオンライン処理システムにおける稼働実験, 地震研究所 集報, 55, 449-484.

Screening Out Micro Earthquakes
—Automatic Detection by Time Series Models—

Genshiro Kitagawa

The following three topics arisen in the analysis of micro earthquake data are shown ;

- (1) Automatic detection of the arrival time of P and S waves.
- (2) Estimation of the changing spectrum.
- (3) Extraction of the micro earthquake from noisy data.

The analysis is based on the nonstationary time series modeling by the minimum AIC procedure. The state space representation of the models and Kalman filter/smoothing methodology are exploited for the efficient computation of the likelihood functions and the state estimation.

なわばりのパターンを測る

種 村 正 美

1. はじめに

森や林の中に足を踏み入れるとき耳にする小鳥たちのさえずりは、天気の良い日にはいかにもどこかである。しかし、これはたいていの小鳥たちにとって、それぞれ自分の「なわばり」を宣言す