

(13) 逐次型同定手法を用いた地震波初動の自動検出

AUTOMATIC DETECTION OF ONSET TIME OF SEISMIC WAVES
USING ADAPTIVE IDENTIFICATION PROCEDURE

野田 茂*

Shigeru NODA

The earthquake detection/warning system is developed for post-earthquake control of large-scale lifeline systems. This paper describes the concept of the real-time seismic data processing system for estimating the location and magnitude of an earthquake. Earthquake acceleration records are simulated on the basis of the standard autoregressive model. The major contribution of this paper is the use of the Kalman filter for identifying model parameters recursively. P and S wave onset times are exactly estimated by using the AIC method for AR model. It is pointed out that this analytical method may be very promising for the real-time automatic detection of onset time of seismic waves.

Key Words; Real-time automatic processing, Onset time of seismic waves, Autoregressive process, Adaptive identification, AIC

1. はじめに

我々の毎日の生活は多くの社会基盤システムによって支えられている。市民生活を支えるこのようなシステムはライフラインと呼ばれる。これらのシステムは、電力・ガス・上下水道などの供給システム、道路・鉄道・航路などの交通システムや電話・テレビ・ラジオなどの通信・情報システムよりなる。こういうシステムは、数十年前と比べると、最近ますます高度化して複雑なシステムとなっている。便利さが増した反面、これらのシステムのたった一つでもストップすると、社会的影響は深刻なものとなる。

システムとしての都市に着目し、情報によって目的の実現を効率的・効果的に達成しようとするものが、都市情報システムである¹⁾。都市情報システムは、1) 都市基盤整備と都市活動との調整、2) 都市空間の秩序維持、3) 都市施設と市民生活の結合、4) 市民への情報提供や5) 行政管理の効率化・有効化などの機能を果たす。このようなシステムが災害を受けたときの影響は、単に個人の不便さという範囲を越えて、都市が果たすべき各種の機能にも及ぶ。

都市の総合的な防災能力を高めるためには、災害発生の予報や被害の情報など、必要な情報を収集するためのセンサーを都市内に組み込むことが必要である。例えば、集中豪雨災害の場合、高精度なレーダー観測結果とアメダスによる高密度なセンサーからの情報を、コンピュータが総合判断することで、集中豪雨の予想される地域の住民に災害情報を流すことができる。地震の場合には、津波警報がこれに相当するものである。このような情報システムには人間の判断も加味されているが、これを完全に自動化することにより、初めて情報化社会となりえる。

地震発生直後の対応と対策を考える場合、地震動のモニタリングシステムを構築しておく社会的意義は大きい。地震動のモニタリングシステムを用いると、一般には次の3つを実施することができる。まず、第一

*工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

は、震源付近の地震計が地震発生と同時にできるだけ早く地震波を検知し、地震波が到来するまでに緊急対応をとることができる。第二には、都市域の地震計が検知した地震波のデータをリアルタイムに処理することで、即座に地震の諸元や地震波到来後の地盤震動分布などを求めることができる。これらのデータを基にすると、最終的には、被害程度を推定したり、緊急遮断の判断を行い、救援・復旧対策をとることが可能になる。

上記の地震動モニタリングシステムの一つとして、完全自動システムで実際に作動しているものとしては、JRの地震早期検知・警報システムUrEDASがある²⁾・³⁾。このシステムでは、警報システムが設置された地点における地震動の大きさだけに基づいて警報を出すのではなく、設置点周辺に発生する地震の位置や規模を自動的に推定した上で、必要に応じて警報を出す。

UrEDASは、原理的に、1) センサーによって検知されたP波初動からの震央方位の推定、2) 初動の卓越周期からの地震の規模(マグニチュード)の推定、3) P波とS波の初期微動継続時間からの震源距離の推定、4) P波とS波の識別および震源深さの推定を基本としている。このシステムを活用すると、比較的小規模な地震観測網で、コンピュータが鉄道にも相当の強い地震動が来襲すると判断した場合、その地域の列車にブレーキをかけることができる。

上記のような地震動モニタリングシステムを構築すると、災害情報を市民に伝えることも可能となる。すなわち、震源地付近の地震計が地震発生と同時にこの地震を検知し、コンピュータを介して、その情報を一早く一般市民に伝えることができれば、地震波が到着する前に、危険回避のために避難をすることができるかもしれない。このような人命を救うような情報をも含めて、高速に情報をやりとりすることが、情報化社会に求められていることである。

地震を検知すると警報を発したり、自動的に非常処置をとるということは、ライフライン事業者においても実施されている。例えば、東京ガスでは、供給地域の約30箇所に地震計を配置し、本社供給センターのグラフィック端末に各地域の地震動の大きさが自動的に表示されるシステムを稼働させている⁴⁾。このシステムを用いることで、地震動の振幅が大きい地区については、ブロックのバルブを遮断するなどのブロック化がなされる。また、ガスの流量や圧力に異常が認められると、工場などからの供給が停止される。

多くのライフラインの中でも、都市ガスは、供給システムの安全性と保全性の問題において、特別な性質をもっている。地震による被害があるレベルを越えると、安全のために、ガスの供給を停止することが必要になる。しかし、一旦ガスの供給をストップすると、被害の有無の確認のため、供給再開あるいは復旧に長時間を要する。

このような立場から、文献5)では、信頼性の高い被害予測または被害の確認に基づき、必要最小限の地区を対象にガスの供給を遮断するための合理的な地震時システム制御のあり方を提案している。この被害早期検知システムは、ファジィ推論を応用した被害推定とシステム制御を基本としている。このシステムは、1) 各観測点から送られてくるSI(Spectral Intensity)センサーの値に注目したSI被害推定システム、2) 震源情報(発生位置や規模)を求める震源推定システム、3) 構造物の被害程度を把握する損傷度評価システムおよび4) 液状化センサーと代表地盤のリアルタイム応答解析によって液状化の発生程度を推定する液状化評価システムの4つのサブシステムで構成されている。地震動強度、地盤特性、被害程度や緊急時遮断の判断には曖昧さや不確かさが伴うため、ファジィ推論が導入されている。

地震動モニタリングシステムを構築するに当たり、必要不可欠な情報は、震源情報、すなわち震央位置、震源の深さやマグニチュードである。このようなことにより、文献6)では、ライフラインの地震時システム制御での利用を前提として、比較的小規模な観測システムによって、迅速に震源を推定する方法を示している。この方法では、地震被害と関連が強いSI値を基準データとして用いている。

文献6)においては、1) 過去の地震動記録を回帰したSI値の距離減衰式と、2) 地震発生後に多地点に設置されたSIセンサーから送られてくる観測値を用いて、震源を概略推定している。その手順は次のようである。

まず、SI値を目的変数とし、東経あるいは北緯方向の距離を説明変数とし、単回帰分析を行う。そして、回帰係数から、震央方向の概略を推定し、対象地域を予め数個に分割した探索地域の中から、震央を含む探索地域を決定する。次に、探索地域内において、震源位置を表す東経・北緯、震源深さとマグニチュードを仮定し、これらの値を距離減衰式に代入し、SI値を推定する。推定値と観測SI値の誤差が最小となるように、震源位置とマグニチュードを反復的に変え、最適値を求める。

上記の方法を関東地域内に発生した地震に適用した事例によると、文献6)の概略推定値と気象庁発表値は、大きくずれるケースが見られる。地震動強度を表す指標としてのSI値は、位相の変化、継続時間やパワースペクトルなど、時刻歴としての地震波形を直接に反映するものではない。従って、上記の方法で求められる地震情報は、概略推定の域を越えるものではない。しかし、SIという最大速度応答の情報のみから得られた推定値にしては、まずまずの結果を与えているものと考えられる。

本研究は、ライフラインの地震時緊急遮断システムの一部を構成する震源推定システムにおいて、震源位置やマグニチュードを高精度にかつ即座に推定する方法を提案し、その有効性を調べることを目的としている。ただし、本システムでは、文献6)と異なり、中圧導管のブロック情報局から無線テレメータによって送られてくる加速度波形やSIセンサーの観測値を用いる。このようなデータを用いることで、文献6)の方法よりも、震源を正確に推定できる可能性がある。本論文では、震源推定システムの構成を検討するとともに、研究の第1ステップとして、逐次型同定手法を用いた地震波初動の検出法とその適用例を示す。

2. 震源推定システムとは

(1)概要

コンピュータによる地震観測データ処理システムは、以下に示すような手順を指向した上で、種々の制約の下に現実的な運営を図ったものになっている。すなわち、地震が発生するとすぐに、地震波データの収録が始まり、続いて地震波検測や震源計算などが行われる。短時間の内に、これらの結果がプリントアウトされ、またマップなどのグラフィックが出力される。同時に、地震記録と処理結果がデータベースに収納され、ユーザーはこれらを検索・参照することができる。全ての処理の流れは、システム自体によって、自動的に制御され、実行されていく。処理の状況と最新の結果は、リアルタイムに、常時表示される。

気象庁、科学技術庁国立防災科学技術研究所や大学の各機関においては、コンピュータの導入により、地震波データ処理システムの実用化が図られ、地震波の検出・検測の自動処理がされている。

検測とは、地震波の中から位相を検出して、各位相の位相名の同定、初動時刻や振幅などの測定および測定結果の整理などの作業を指す。コンピュータを用いたデータ処理とは、地震波の検出、位相初動時刻の決定、振幅・周期の測定、震源計算、マグニチュードの決定、結果の印刷および観測データの保存・管理などの一連の作業を指す。このうち、地震波の検出、位相初動時刻の決定および振幅・周期の測定など、目視による検測項目を自動的に行う処理が自動検測である。

自動検測の中で最も困難な処理は、位相初動時刻(到着時)を決定することである。一般に、検測者は、複雑に変化するノイズや地震波の中から、位相を検出して、その時刻を読み取るときに、地震波の振幅と周期の変化に注目する。また、時には、波形全体を眺めたり、震源位置を考慮に入れて、判断することがある。コンピュータで自動処理を行うとき、このような人間の総合的な判断作業をどのように組み込むかが問題となる。すなわち、当然いくつかの制約を受けるので、処理方式や処理の目的は対象とする地震によって異なることになる。

本研究では、図1に示すように、1)時系列モデルによる地震波初動の自動検出、2)重み付き最小2乗法による震源位置の推定および3)最大加速度あるいはSI値からのマグニチュードの決定の3つのステップを踏むことにより、震源推定システムを構築することを考えている。

(2)地震波初動の検出

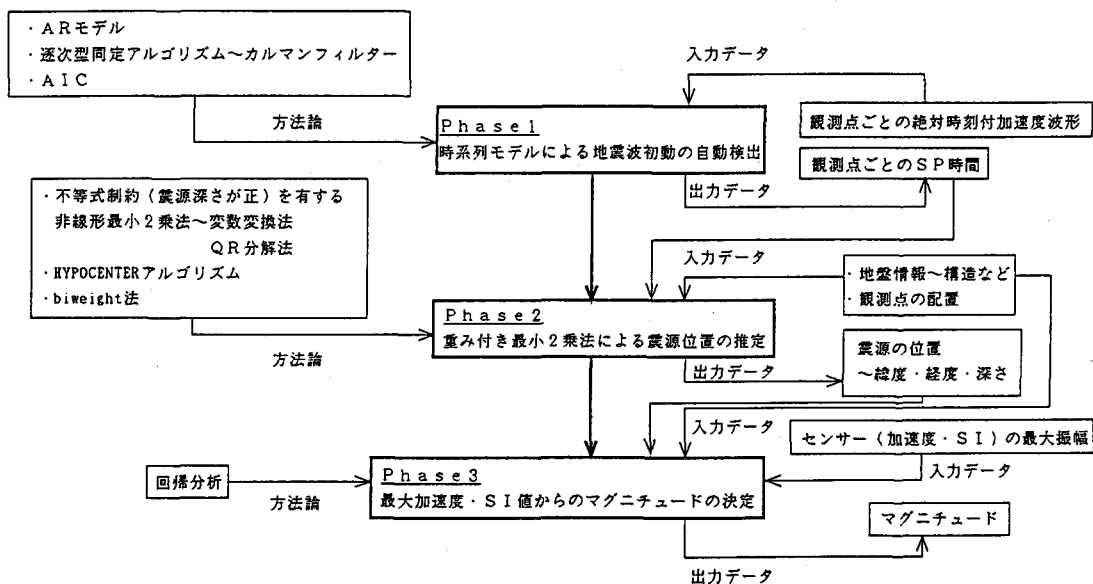


図1 震源推定システムの開発フロー

時系列モデルによる地震波初動の自動検出法については、3.で詳細に説明する。ここでは、既往の処理方式と問題点について簡単に述べる。

今日までに発表された位相初動（到着時）の決定方式は、1)地震波の振幅変化に着目した処理と、2)振幅と周期の変化に着目した処理の2つに大別できる。前者の方式としては処理内容の比較的簡単なものが多い。例えば、この方式に従い、Fujino, Yokota, Hamazaki and Inoue⁷⁾は、断層周辺での強震加速度水平記録に見られる顕著な相を視覚的方法と定量的方法により同定し、逆問題を解くことにより、顕著な相と震源位置の関係を調べている。

最近では、多少複雑ではあるが精度の高い検測を実現させるために、後者の処理方式が広く用いられている。これには、地震波の表現に自己回帰過程（ARモデル）を適用し、位相の検出判断に、対数尤度比関数や赤池情報量基準（AIC）を用いる。この方式を用いたものに、横田・周・溝上・中村⁸⁾、白井・徳弘⁹⁾、森田・浜口¹⁰⁾や前田¹¹⁾の研究成果が挙げられる。しかし、地震波とノイズの比（S/N比）や位相の周期などにより、自動処理には一定の限界が存在する。このため、実際の検測に当たっては、処理結果に信頼度を付けることもある^{12), 13)}。あるいは、地震波形の処理結果をグラフィックディスプレイ装置などに表示し、必要に応じて、検測者は再検測を実施する。

本研究では、後者の処理方式すなわち地震波の振幅と周期の変化に着目して、地震波初動を自動検測することを試みる。

なお、1)検測値に大幅な誤まりが含まれている場合、2)異常な読み取り値が含まれている場合、あるいは3)少ない頻度ではあるが、複数個の地震の検測値が混在している場合には、適切な処理過程をとる必要がある。誤った検測値を取り除くには、一般に、走時残差の大きい検測値を除外して、再度震源計算を行えばよい。

上記の問題点を解決するために、前田^{11), 13)}は、残差に応じた重みを観測データにかけて計算を繰り返すという、ロバストティックな推定法を用いている。また、長谷川・海野・山本・高木¹⁴⁾は、親子法と到着順法を提案して、検測値の取捨およびグルーピングを行っている。親子法とは、観測点の空間的な分布を考慮して、検測値を組み合わせていく方法である。一方、地震波の到着順に対して、予じめ可能な組み合わせを設定しておき、これから外れる検測値があれば、それを不採用とする方法が到着順法である。

(3) 震源の決定

地震波の位相初動時刻が求められれば、次のステップでは震源を決定することができる。

震源決定とは、地震の位置(経度 λ 、緯度 ϕ や深さ h)および地震の発生時刻 t_0 を未知数とする連立方程式を解くことに帰着される¹⁸⁾。そのためには、P波またはS波の初動到着時刻あるいは両方の値が必要である。ある地震(λ, ϕ, h と t_0)に対して、 i 番目の観測点(λ_i, ϕ_i と h_i)での発震時を t_i とする。理論走時 T は、一般に、 $\lambda, \phi, h, \lambda_i, \phi_i$ と h_i の関数で表されるので、 $T(\lambda_i, \phi_i, h_i; \lambda, \phi, h)$ となる。震源計算とは、全ての観測点における観測走時 $t_i - t_0$ と理論走時 T の残差2乗和を小さくするように、 λ, ϕ, h と t_0 を反復改良により求めることである。

一つの観測点で、P波あるいはS波がともに観測されている場合には、震源位置と地震の発生時刻を分離して解くことができる。本研究では、3.で述べる方法でP波とS波の初動時刻を計算し、その結果得られるS-P時間の観測値と理論値の差を最小にするように、震源位置を反復改良により求める手順を考えている。ただし、走時残差の大きい検測値の影響を小さくするためには、残差に応じた重みをかけて計算を繰り返すという、ロバスト的な方法を用いる必要がある^{11), 13)}。さらに、震源深さが負にならないようにするためには、変数変換法、ペナルティ関数法あるいは勾配射影法などを用いて、非線形最小2乗解を実現しなければならない¹⁸⁾。

理論走時を計算するに当たっては、地盤構造を仮定する必要がある。ここでは、地下構造を一様と仮定した半無限均質構造あるいは速度が深さだけの関数である水平成層構造を考える。速度構造が水平方向にも不均質な場合には、3次元速度構造を仮定する必要がある。その際、3次元波線追跡を行わなければならないが、計算時間がかかるので、実用的ではない。

なお、均質構造は、水平構造による震源計算の初期値を計算するために用いる。計算の効率化から言えば、初期値としては、文献6)で示されているように、多数のSI観測値に基づく震源の概略推定法によって求められた解を用いることが有効であるかもしれない。

(4) マグニチュードの決定

震源が決定されれば、マグニチュード M は、地震波の振幅や周期に応じて求めることができる。マグニチュードの定義や算出式については、文献17)を参照されたい。ここでは、ライフラインの供給地域内に設置された多数の観測SI値に基づき、回帰式によってマグニチュードを求めることを考える。 i 番目の観測点の震央距離を Δ_i 、SI値を SI_i 、震源深さを h とすれば、マグニチュード M は次式で回帰できる。

$$M = a \log SI_i + b \log \Delta_i + c h + d \quad \dots\dots\dots (1)$$

回帰係数(a, b, c と d)は、地震データを取り込む度に、適応型非線形回帰分析のアルゴリズム¹⁸⁾に従って、更新することができる。式(1)によれば、更新前の回帰係数を用いると、観測点ごとにマグニチュードは得られる。従って、それらの平均値をとることにより、マグニチュードを推定することが可能である。

4. 逐次型同定アルゴリズムによる地震波初動の自動検出

人間による初動検出における精度は主観的な量である。同一の地震観測網であっても、検測者が変わると、検測者相互の規準の違いが生じる。人間による初動の検出には個人差があるので、検測精度を客観的に論じる必要がある。

このようなことから、最近では、地震波の表現にARモデルを適用し、その次数の決定や到着時刻決定の基準としてAICを用いるようになってきている^{8), 13), 14)}。なお、初動検出のための判別関数としては、対数尤度比関数^{9), 10)}や対数尤度関数¹²⁾が用いられる。

本章では、AR-AIC法による地震波初動の自動検出の方法について述べる。本研究で地震波の表現にARモデルを用いていることは既往の研究と同じである。ただし、本研究では、カルマンフィルターの概念^{19), 20)}によって、AR係数を逐次的に推定している。従って、本方法によれば、少ない計算容量でかつオンラインリア

ルタイムに波形処理を行うことが可能である。

(1)AR係数の同定

地震波は、地動ノイズ、P波、S波、Rayleigh波、Love波やコーダ波など、各種位相を含む非定常な波群である。しかしながら、各種位相部分の時系列は、局所的に見れば、定常と見なすことができる。そこで、ここでは、このような定常時系列モデルをARモデルによって表現することを考える。ARモデルは、地震動の振幅と周期あるいはスペクトル構造の2次元座標による情報を、AR係数による1次元座標により表現できるという大きな利点を有する。

サンプリング時点 t の地震動加速度は、時点 t 以前の加速度情報に基づき、次のようなARモデルによって表す。

$$x_t = \sum_{i=1}^m a_i x_{t-i} + v_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 a_i はARの係数で、 m はその次数である。地震波に対して、右辺第1項がある程度適切な表現になれば、 v_t は平均値0で分散 σ^2 のガウスホワイトノイズであると見なすことができる。

今、

$$\left. \begin{array}{l} \text{状態量} \quad \theta = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T \\ \text{観測状態量ベクトル} \quad \phi_t = (x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-m}) \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

とくと、式(2)より、

$$\text{状態方程式} \quad ; \quad \theta_{t+1} = \theta_t, \quad \theta_0 = \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{観測方程式} \quad ; \quad x_t = \phi_t \theta_t + v_t \quad \dots\dots\dots (5)$$

を得る。ここで、 x_t は、サンプル時点 t において観測される地震動加速度である。

式(4)と(5)にカルマンフィルターを適用すると、状態推定アルゴリズムは次のように誘導できる。

$$\text{推定式} \quad ; \quad \hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + K_t (x_t - \phi_t \hat{\theta}_{t-1}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{カルマンゲイン} \quad ; \quad K_t = P_{t-1} \phi_t^T / (\sigma^2 + \phi_t P_{t-1} \phi_t^T) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{推定誤差共分散行列} \quad ; \quad P_t = (I - K_t \phi_t) P_{t-1} (I - K_t \phi_t)^T + K_t \sigma^2 K_t^T \quad \dots\dots (8)$$

ここに、 $\hat{\theta}_t = E[\theta_t | X_t]$, $P_t = [(\theta_t - \hat{\theta}_t)(\theta_t - \hat{\theta}_t)^T]$ および $X_t = \{x_0, x_1, \dots, x_t\}$ である。初期値は、 $\hat{\theta}_0 = 0, P_0 = \alpha I$ (α は正の任意値、物理的に意味ある値を与える) とする。また、ノイズ v_t の分散 σ^2 は未知である。しかし、P波到着前の地動ノイズの時系列解析によって、予めこの分散を評価しておくことは可能である。

式(6)～(8)を用いると、地動加速度 x_t を観測した時点で、AR係数の推定値 $\hat{\theta}_t = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m)^T$ をリアルタイムに計算できる。

本研究では、地震波初動を検出するのに、水平2成分と上下1成分の観測地震波のうち、一つの成分をあるいは各成分を独立に1次元AR過程で表すことを考えている。上記の手続きは1次元時系列について成り立つが、基本的には2次元あるいは3次元時系列についても同様のことが言える。例えば、2成分の記録を用いると、振幅、周期と位相の情報を考慮することができる。この場合、2次元AR過程のAR係数行列には、振幅と周期のみならず、particle motion の情報も含まれることになる。

(2)位相読み取りの基本となる方法

地震波の検出とは、2種類の波、例えば、地動ノイズとP波あるいはP波とS波の切り変わる時刻を探すことであると考えることができる。地震波の立ち上がり部は過渡的な現象であり、地震がない場合でもバックグラウンドとして、固有の軟弱な振動が観測される。このことから、ごく短い時間帯のデータに対し、上記のように考えることは自然である。

図2に示すように、ある時刻を境にして、波動の異なる2つの時系列から構成されるサンプルを考える。

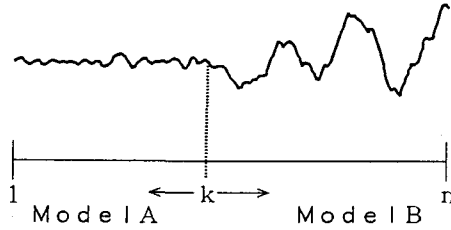


図2 位相読み取りの際の区間分割

P波あるいはS波の初動時刻を含む時間区間（ n 個の離散時点よりなる）を任意に取り、その区間を2つに分ける。区間A（ $1 \sim k$ ）にARモデルAを、区間B（ $k+1 \sim n$ ）にARモデルBを、最尤法により当てはめる。このとき、どこに分割点 k をとれば、最も適合するかというのが検測の問題である。ここでは、この区間分割の判断基準として、AICを用いる。

区間全体のAICを $AIC(1 \sim n)$ 、区間AとBのAICを、おのおの、 $AIC(1 \sim k)$ と $AIC(k+1 \sim n)$ とする。このとき、 $AIC(1 \sim n) = AIC(1 \sim k) + AIC(k+1 \sim n)$ を最小にする点 k_{min} を探し、 k_{min} を分割点とする。このようにすれば、数学的客観性を保ちつつ、精度よく初動時刻を算定することができる。

区間AとBのモデルは、式(2)と同様に、次のように表現できる。

$$\left. \begin{aligned} x_t &= \sum_{i=1}^{m_A} a_i^A x_{t-i} + v_t^A \\ x_t &= \sum_{i=1}^{m_B} a_i^B x_{t-i} + v_t^B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、区間 AとBに対し、 a_i^A と a_i^B はAR係数で、 m_A と m_B は次数である。 v_t^A と v_t^B はガウスホワイトノイズで、その分散を σ_A^2 と σ_B^2 とする。

モデルAとBのパラメーターを、それぞれ、 P_A 、 P_B とすれば、

$$\left. \begin{aligned} P_A &= (a_1^A, a_2^A, \dots, a_{m_A}^A, \sigma_A^2) \\ P_B &= (a_1^B, a_2^B, \dots, a_{m_B}^B, \sigma_B^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

と書け、モデルZ（AまたはB）の残差時系列の確率密度関数は次式のようになる。

$$p(x_t | P_Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Z} \exp \left\{ -\frac{(x_t - \sum_{i=1}^{m_Z} a_i^Z x_{t-i})^2}{2\sigma_Z^2} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

時系列を構成するサンプル時点には、 $1 \sim n$ の番号が付けられている。仮に、 k 番目の時点で2つのモデルに分割できるとする。今、モデルA（1番目の時点から k 番目の時点まで）とモデルB（時点 $k+1$ から時点 n まで）の対数尤度関数を、おのおの、 $l(x_t | 1, k, P_A)$ 、 $l(x_t | k+1, n, P_B)$ とする。このような混合モデルに対する対数尤度関数 l^* は次のようになる。

$$\begin{aligned} l^*(x_t | k, P_A, P_B) &= l(x_t | 1, k, P_A) + l(x_t | k+1, n, P_B) \\ &= l \log \prod_{t=1}^k p(x_t | P_A) + l \log \prod_{t=k+1}^n p(x_t | P_B) \\ &= \sum_{t=1}^k l \log p(x_t | P_A) + \sum_{t=k+1}^n l \log p(x_t | P_B) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ところで、式(11)より、

$$\left. \begin{aligned} l(x_t | 1, k, P_A) &= -\frac{k}{2} \log 2\pi - \frac{k}{2} \log \sigma_A^2 \\ &\quad - \frac{1}{2\sigma_A^2} \sum_{t=1}^k (x_t - \sum_{i=1}^{m_A} a_i^A x_{t-i})^2 \\ l(x_t | k+1, n, P_B) &= -\frac{n-k}{2} \log 2\pi - \frac{n-k}{2} \log \sigma_B^2 \\ &\quad - \frac{1}{2\sigma_B^2} \sum_{t=k+1}^n (x_t - \sum_{i=1}^{m_B} a_i^B x_{t-i})^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

となる。パラメーター P_z の最尤推定量 $\hat{P}_z$ は、 $\partial l / \partial P_z = 0$ より求められる。このとき、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial l(x_t | 1, k, P_A)}{\partial \sigma_A} &= -\frac{k}{\sigma_A} + \frac{1}{\sigma_A^3} \sum_{t=1}^k (x_t - \sum_{i=1}^{m_A} a_i^A x_{t-i})^2 = 0 \\ \frac{\partial l(x_t | k+1, n, P_B)}{\partial \sigma_B} &= -\frac{n-k}{\sigma_B} + \frac{1}{\sigma_B^3} \sum_{t=k+1}^n (x_t - \sum_{i=1}^{m_B} a_i^B x_{t-i})^2 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

式(12)～(14)より、対数尤度関数 l^* は次式で表される。

$$l^*(x_t | k, P_A, P_B) = -\frac{n}{2} \log 2\pi - \frac{k}{2} \log \sigma_A^2 - \frac{n-k}{2} \log \sigma_B^2 + \frac{n}{2} \dots\dots\dots (15)$$

本研究では、区間分割の判断基準として、AICを用いる。AICは、

$$AIC = -2 (\text{対数尤度}) + 2 (\text{自由パラメーターの数}) \dots\dots\dots (16)$$

で定義される。従って、式(10)と(15)より、式(16)は次のようになる。

$$AIC(k) = n \log 2\pi + k \log \sigma_A^2 + (n-k) \log \sigma_B^2 + n + 2(m_A + m_B + 2) \dots (17)$$

ここに、 σ_A^2 と σ_B^2 は、それぞれ、区間Aと区間BにARモデルを当てはめたときの推定誤差の分散である。これらの分散は、地震動加速度の観測値と推定値 $\phi_t \hat{\theta}_t$ を用いて、次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A^2 &= \sum_{t=1}^k (x_t - \phi_t \hat{\theta}_t)^2 / k \\ \sigma_B^2 &= \sum_{t=k+1}^n (x_t - \phi_t \hat{\theta}_t)^2 / (n-k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

式(17)から、 $AIC(k)$ を最小にする点 k_{min} を探し、 k_{min} を分割点とする。ここで示した分割法を適用すれば、P時刻とS時刻は容易に求まる。なお、ARの次数 m_A と m_B は最初から固定的に与えることが多いが、その場合はAICの変化が対数尤度の変化そのものとなる。従って、AICを最小にする、あるいは対数尤度を最大にする時点が、正確に地震波の分割点を指し示すことになる。結局、本方法によれば、地震波の振幅、周期および位相のいずれの変化に対しても対応でき、初動時刻は合理的に決定できることとなる。

4. 地震波初動の検出結果

3. で示した地震波初動の検出アルゴリズムを用いて、P波とS波の初動時刻の検出結果の例を以下に示す。

図3には、本研究で対象とした地震(No. 9)の震央位置(北緯35°5.21', 東経140°9.5')を示す。用いたデータは、1985年10月4日に東京大学生産技術研究所千葉実験所(図中Xで示す地点)で観測されたデータである²¹⁾。同地震の震源深さは78km, マグニチュードは6.1、千葉実験所までの震央距離は28kmである。地震の発生時刻は21時25分52秒である。

千葉実験所では、高密度地震アレー観測システムが構築されている。図4は、実験所内に配置された加速度

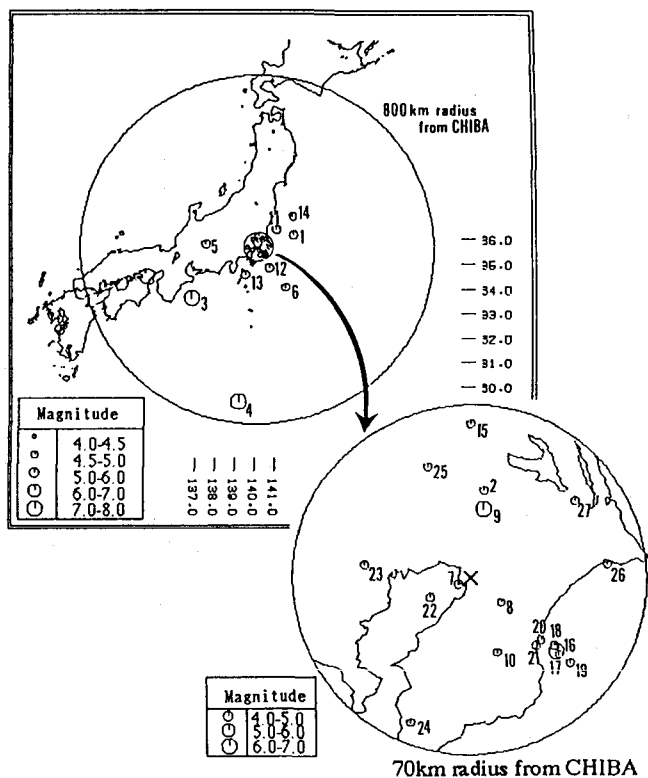


図3 解析の対象とした地震(No. 9)の震央位置²¹⁾

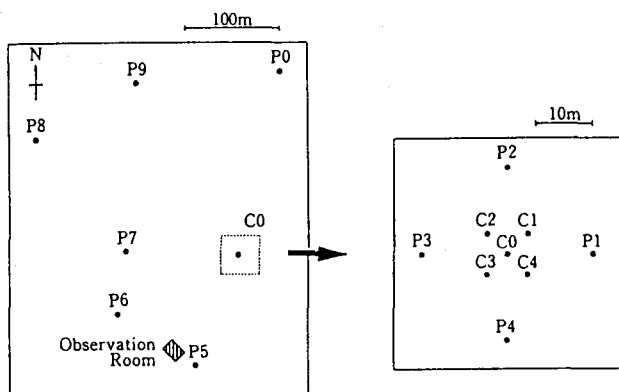


図4 東大生産技研千葉実験所のアレー観測位置²¹⁾

計の位置を示したものである。加速度計は、図中の観測点の地表面下、1m, 5m, 10m, 20mと40mに設置されている。ここでは、C0地点の地表面下1m(C001)における加速度記録を用いる。図5は、C001における加速度記録とフーリエスペクトルである。図中には、上段から、EW、NSおよびUD成分の地震波を示す。数値解析の対象とした加速度波形はEW成分である。なお、図4の観測地点P5の地表面下40m(P540)における加速度のトリガータイムは21時26分5秒である。P540における加速度の3成分のいずれかがトリガーレベル(例えば1gal)を超過すると、記録システムが作動するようになっている。

図6 (a) はここで用いた原加速度記録(時間間隔30秒)である。本研究では、カルマンフィルターアルゴ

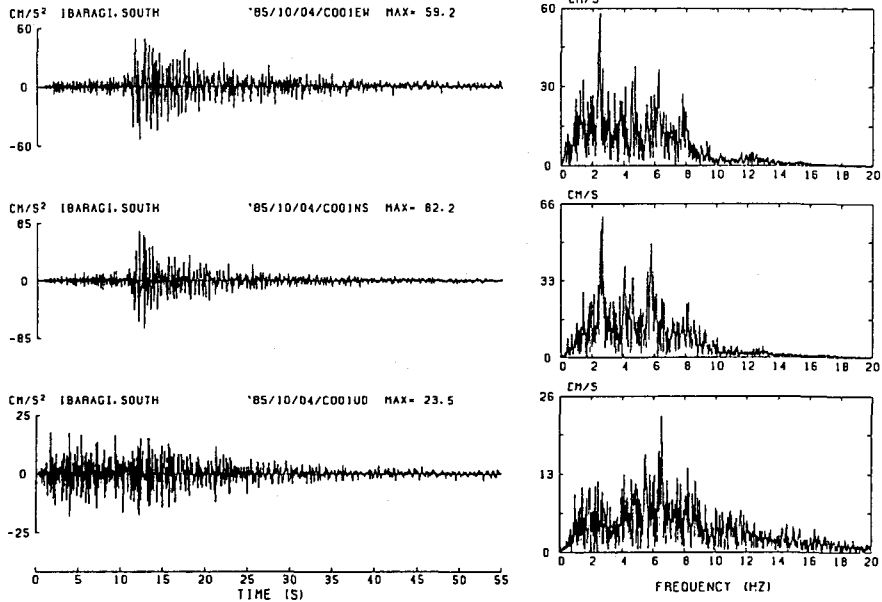


図5 対象地点C001の地震動加速度とフーリエスペクトル²¹⁾

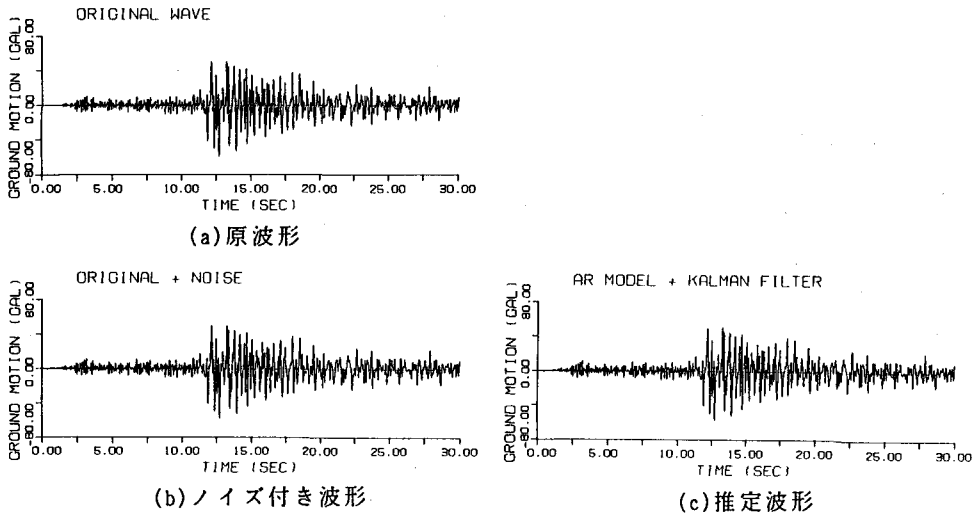


図6 時系列モデルによって算出した加速度波形

リズムを適用するために、図中 (a) の波形にホワイトノイズを付加し、図 (b) の波形を求めた。ただし、ホワイトノイズのパワーは小さく設定している。ノイズを付加した理由は次の通りである。すなわち、原加速波形にはノイズ成分が顕著に見られなかったため、地震波のバックグラウンドとしてノイズを含む加速記録を用いた場合、地震波初動を有効に検出できるかどうかを調べるためである。

図6 (b) の加速度波形に3. (1)で述べた方法を適用して求めたAR係数(次数5)の時系列変化は、図7のようになる。これらのAR係数を用いて推定した加速度波形が図6 (c) である。図6 (b) と図6 (c) の比較から、地震動のARモデルによる再現性はかなり高いと言える。このことは、逐次型最小2乗法すなわちカルマンフィルターアルゴリズムによって、AR係数を有効に同定できたことを示している。

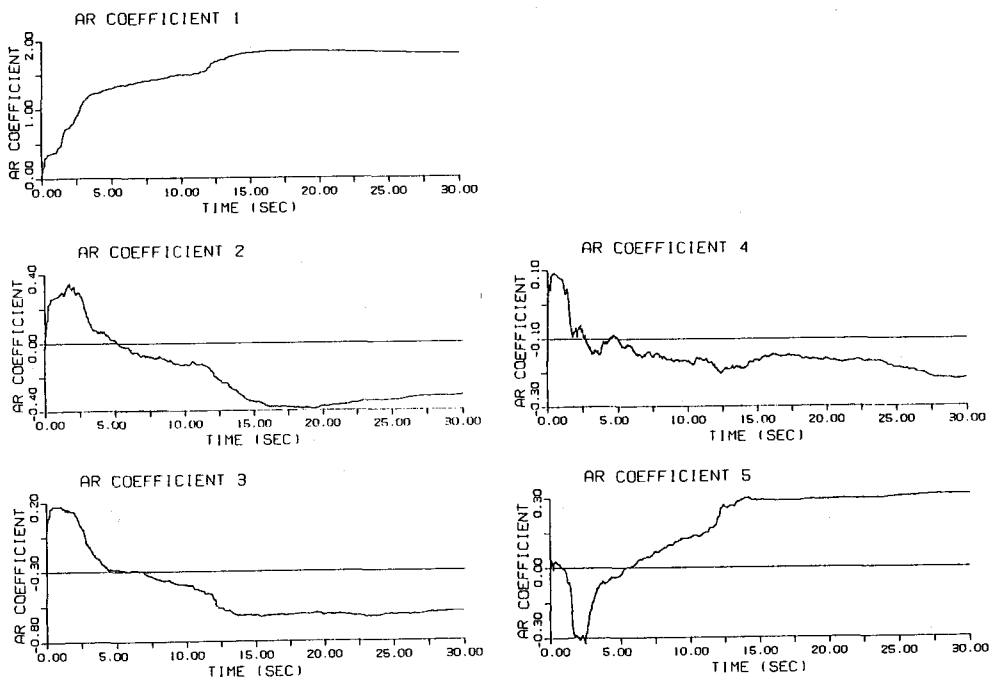


図7 逐次型同定法によって求めたAR係数の時系列変化

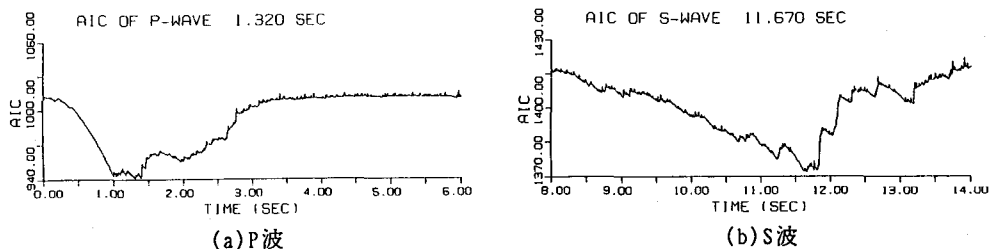


図8 自動処理(AICの時系列変化)による地震波初動の検出結果

図7のAR係数を用いると、式(17)と(18)の計算から得られるAIC(k)の時系列変化は、図8のようになる。図6(b)を目視すると、トリガータイムを基準にして、P波は0~3秒、S波は10~13秒の時間区間中に到達していることが予想される。そこで、図8に示すように、P波に対しては時間区間0~6秒、S波に対しては8~14秒の時間区間を対象にして、AIC(k)の計算を実施した。

本方法によって、AIC(k)の時系列変化の最小値を与える時点と求めると、P波初動時刻は強震計のトリガーから1.32秒後、S波初動時刻は11.67秒後と検出される。図8より、1.32秒あるいは11.67秒前後において、AIC(k)の最小値に近い値が得られていることがわかる。一見すると、これらの時点点を位相初動到達時点と解釈するかもしれない。AIC(k)の最小値が複数存在する場合、あるいは最小値に近い値を与える時点が複数ある場合には、次のように処理すればよい。すなわち、3.(1)でも述べたように、複数情報の特徴を活かし、2次元あるいは3次元時系列解析により、初動時刻を推定するのである。

いずれにしても、ここで用いた地震データの場合、逐次型同定手法で求めた地震波初動の到達時刻は、人間が目で判定した場合の結果と大差ない。また、これらの時刻は図7のAR係数の時系列変化ともよく対応しており、かなり調和的であると言える。

今、半無限層を含む水平成層地盤構造を考え、 i 層のP波速度を V_{Pi} 、S波速度を V_{Si} ($i=1\sim N$)とする。ここで、

スネルの法則を無視し、波動が震源から観測点までまっすぐに伝播するという仮定を設ける。i層内の伝播距離を R_i とする。すると、S-P時間 T_{SP} は、近似的に、次式で評価できる。

$$T_{SP} = \sum_{i=1}^N R_i \left(\frac{1}{V_{Si}} - \frac{1}{V_{Pi}} \right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

文献17)などを参考にして、7層からなる地盤構造モデルを仮定する。地表面下、各層のP波速度(km/sec)は1.8, 2.5, 2.8, 4.4, 5.5, 6.2と7.7、S波速度(km/sec)は0.6, 1.2, 1.3, 2.2, 2.8, 3.4と4.3、層厚(km)は0.15, 0.6, 0.8, 0.9, 5と22と想定した。これらのデータと、震源深さ78kmおよび震央距離28kmに基づいて、式(19)からS-P時間を計算すると、10.31秒となる。この概算値は、地震波初動の自動検出によって求めたS-P時間(11.67-1.32=10.35秒)と大差ない。一方、震源から励起されたP波の到達時間は、理論的に、12.5秒と求まる。P540地点のトリガー時刻と地震の発生時刻の差は約13秒である。実測および理論的に求めたP波初動の到達時刻はほぼ一致している。もちろん、地盤構造モデルの設定ならびに理論走時の計算においては精緻な検討を要するが、的はずれた結果を与えていないものと考えられる。

以上の結果、本システムの採用により、P時刻およびS時刻を十分に良い精度で読み取ることが可能である。観測点網の拡がりに見合った範囲内で本システムを移動させれば、2.で述べた手順により、震源を十分な精度で決定できるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、ライフラインの緊急時遮断システムを前提とした震源推定システムの開発フローを説明し、ARモデルとカルマンフィルタールゴリズムに基づく地震波初動時刻の検出方法を提案した。この方法を強震加速度記録に適用して、P波とS波の初動時刻を自動検出した結果、本アルゴリズムは十分な精度を有していることがわかった。これより、この自動検出の手法は十分に実用に耐えうる可能性があると判断される。

これまで、地震学の分野では、比較的微小な地震を対象にした地震波初動の検出が行われており、また実用に供されている。しかしながら、構造物の被害という観点から考えるならば、大きな地震を対象にして、地震波初動の検出を精度よく実施する必要がある。また、強震計の記録を用いて、データ処理を行うことが望まれる。

ライフライン事業者の中には、地震動モニタリングシステムの構築を目指して、比較的狭い地域に多数の地震計を設置することを計画しているところがある。このようなことを考えると、緊急時遮断システムの一つのサブシステムとして、無線テレメータリング網で送られてくる強震加速度の情報に基づき、地震波初動の自動読み取りを行う価値は高いと考えられる。

本研究では、引き続き、初動時刻の情報から得られるS-P時間を用いて、震源深さを負にしないで震源を決定する方法を開発する予定である。最終的には、得られた震源位置と深さから、SIセンサーや加速度センサーの地点までの震央距離を求め、観測SI値や最大加速度の回帰分析から、マグニチュードを推定し、ライフラインの被害推定のために有用な情報を提供していくことを考えている。このような研究成果については別途発表する予定である。

謝辞：本研究は、「地震時緊急遮断システムに関する研究」(委員長・東京大学生産技術研究所片山恒雄教授)の一環として実施したものである。本研究で利用した地震データは、東京大学生産技術研究所耐震防災工学研究室からお借りしたものである。ここに、貴重なデータを提供して頂いたり、討議に参加して頂いた、片山先生を始めとする関係各位に深く感謝致します。

参考文献

1)茶谷達雄・田代益啓編：都市情報の管理システム、山海堂、昭和61年4月。

- 2) Nakamura, Y.: On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS), Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp. 673~678, August 1988.
- 3) 中村豊: その10. J Rの地震対策、地震工学振興会ニュース, pp. 24~30, 平成元年1月.
- 4) 大澤隆太郎: その1. 東京ガスの地震対策、地震工学振興会ニュース, No. 93, pp. 33~40, 昭和63年3月.
- 5) 磯山龍二・小川基樹・片山恒雄・山崎文雄・永田茂: ファジィ推論を用いたライフラインの地震時システム制御, 第8回日本地震工学シンポジウム(1990)－国際防災の10年記念－論文集, 第2分冊, pp. 2133~2138, 1990年12月.
- 6) 永田茂・片山恒雄・池田鉄哉・伊藤弘勇: SIセンサーを用いた震源の概略推定法、第8回日本地震工学シンポジウム(1990)－国際防災の10年記念－論文集、第2分冊、pp. 2109~2114, 1990年12月.
- 7) Fujino, Y., Yokota, T., Hamazaki, Y. and Inoue, R.: Multiple event analysis of 1979 Imperial Valley earthquake using distinct phase in near-field accelerograms, Proc. of Japan Society of Civil Engineers., No. 344/I-1, pp. 165~174, April 1984.
- 8) 横田崇・周勝奎・溝上恵・中村功: 地震波データの自動検出方式とオンライン処理システムにおける稼働実験、地震研究所彙報、Vol. 55, pp. 449~484, 1981年.
- 9) 白井克彦・徳弘一路: 地震波動の自動検出、地震、第2輯、第32巻、pp. 141~147, 1979年.
- 10) 森田裕一・浜口博之: 2次元自己回帰過程によるS波初動の自動検出、地震、第2輯、第34巻、pp. 223~240, 1981年.
- 11) 前田直樹: 地震自動処理システムにおける読み取りおよび評価、地震、第2輯、第38巻、pp. 365~379, 1985年.
- 12) 森田裕一・浜口博之: 自己回帰過程による地震波初動の自動検出とその信頼区間、地震、第2輯、第37巻、pp. 281~293, 1984年.
- 13) 前田直樹: 地震波自動読み取りにより得られる結果の信頼性について、地震、第2輯、第39巻、pp. 555~566, 1986年.
- 14) 長谷川昭・海野徳仁・山本明・高木章雄: 微小地震観測データの自動処理システム、地震、第2輯、第39巻、pp. 381~395, 1986年.
- 15) Lienert, B. R., Berg, E. and Frazer, L. N.: HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 76, No. 3, pp. 771~783, June 1986.
- 16) 額嶺一起: 深さが負にならない震源決定、地震、第2輯、第42巻、pp. 325~331, 1989年.
- 17) 宇津徳治: 地震学、共出全書、昭和59年10月.
- 18) Hoshiya, M. and Maruyama, O.: Adaptive multiple nonlinear regression analysis and engineering applications, Proc. of 1st East Asian Conference on Structural Engineering and Construction, pp. 2004~2011, January 1986.
- 19) Harvey, A. C.: Time Series Models, Philip Allan Publishers, Ltd., 1981.
- 20) 片山徹: 応用カルマンフィルター、朝倉書店、1986年7月.
- 21) Katayama, T., Yamazaki, F., Nagata, S., Lu, L. and Turker, T.: Development of strong motion database for the Chiba seismometer array, Report No. 90-1(14), Earthquake Disaster Mitigation Engineering, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, January 1990.