

1. まえがき

大都市では、ライフラインが広域に拡がり、都市機能の高度化が進んでいる。このようなライフラインは地震災害に対して脆弱である。このためには、事前対策のみならず、事後対策を行うことが重要である。すなわち、地震発生後なるべく早くシステム制御を行うことができるような地震時応急制御システムを開発する必要がある。この目的のため、本研究では、地震計ネットワークの加速度記録をオンライン自動処理することで、気象庁の震源速報よりも早くかつ正確に震源を推定することを試みる。

2. 震源推定システムの概要

気象庁などでは、標準走時表を基にして、理論走時とその偏微分係数を算定し、最小2乗法により、震源を決定している。自動検測および自動処理において重要なことは、1)位相初動時刻(到着時)推定の正確さおよび2)走時とその偏微分係数算定のロバスト性である。本研究では、この目的に合致した震源推定システムを開発する。

震源決定の精度は位相の検出に大きく依存する。そのため、本研究では、地震動の振幅と周期の変化に注目した処理方式(文献1)で提案した方式)を採用する。これは、加速度の表現にARモデルを適用し、位相の検出判断にAICを用いるものである。本方法は、カルマンフィルターを用いているため、震源要素の即時的推定に役立つ。

図1は、本研究で提案する震源推定システムのフローを示したものである。

震源は、まず、半無限地盤構造を仮定し、震源距離 = (観測P波到着時刻 - 発震時) x P波速度の式から、概略的に推定する。このとき、観測点間の高度差は無視する。観測点数が4のときは、震源位置(緯度、経度)とP波の最早走時を未知量とした連立方程式を解く。これより、発震時と震源深さが得られる。観測点数が3のとき、SP時間の利用の有無により、計算法は異なる。P波到着時刻とSP時間が利用できる場合は、まず、発震時が得られる。次に、震源位置は、上述のピタゴラスの定理から、簡単に求められる。

精密な震源計算では、観測走時と理論走時の残差が減少するように、Geiger法と呼ばれる最小2乗法の観測方程式を導く。ただし、本研究では、1)非負の震源深さの拘束条件($z=h^2$)を与え、2)走時残差の異常値に対して安定なロバスト推定法を用いる。2)のために、残差の大きさにより重みを変化させ、重み付き最小2乗法を反復して、震源を推定する。震源要素の微小変化量は、特異値分解による一般逆行列を用いて、連立方程式を解くことで求める。この精密計算では、初期推定値から探索を開始し、推定精度を高める。このためには、直達波や屈折波に応じて、理論走時および震央距離と震源深さに関する走時の偏微分係数を理論的あるいは解析的に求めなければならない。

地震のマグニチュードMは、気象庁マグニチュードの算定式(坪井公式・勝又の式)に準じて決める。このために、1倍強震計の応答を計算し、水平2成分の最大振幅合成値を得る。

3. 1992年2月2日の東京湾南部地震への適用

1992年2月2日午前4時4分ごろ、関東を中心にした強い地震があった。東京の震度Vは、1985年10月4日の地震(M=6.1)以来、6年4ヶ月ぶりであった。気象庁の震源速報によれば、震源地は東京湾南部の

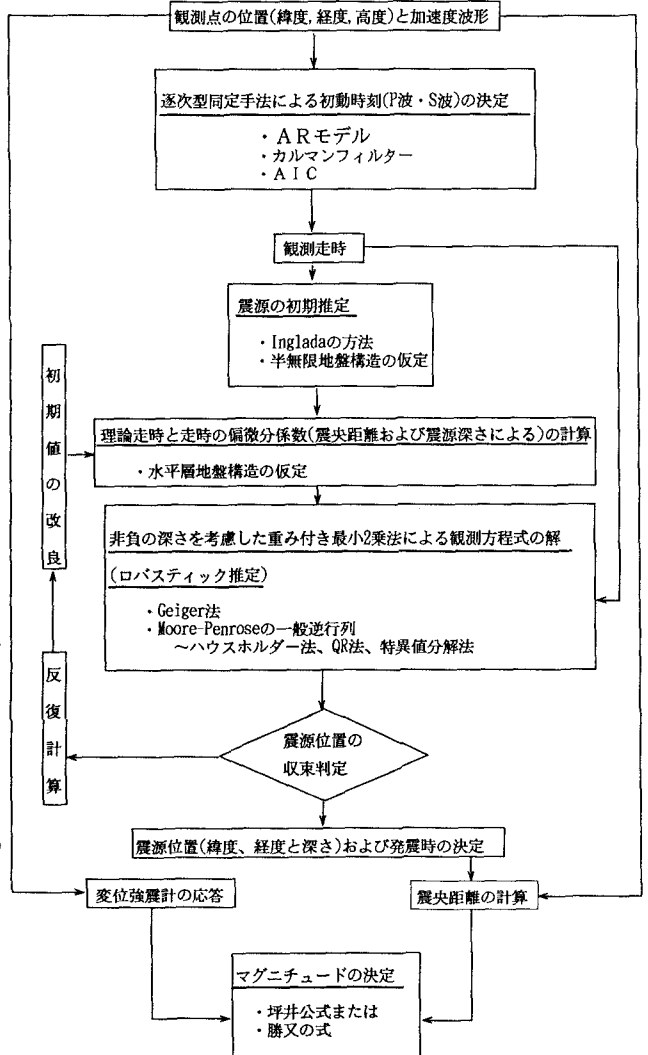


図1 震源推定システムのフローチャート

浦賀水道(緯度 $35^{\circ}14'N$, 経度 $139^{\circ}48'E$)で、震源深さは93kmである。また、発震時は4時4分5.7秒と推定されている。

本研究では、震源要素の決定のために、東京ガス(株)の4観測点(鹿放ヶ丘、小平、藤沢と袖ヶ浦)で得られた地表・地中加速度記録を用いる。地震計の深度は、地表面下1m(全観測点)、42m(鹿放ヶ丘と袖ヶ浦)、47m(小平)と22m(藤沢)である。

位相初動時刻は、文献1)の逐次型同定手法により、地中加速度計の記録を用いて決定した。ただし、P時刻は上下動から、S時刻は水平2成分の平均値から検出した。加速度は、AR係数の初期値(平均値0, 分散1)に基づき、ARモデル(次数5)で表す。ホワイトノイズの平均値は0gal、分散は10galとした。AR係数は、カルマンフィルターによって、逐次的に同定できる。これより、AICの時系列変化が得られる。図2はその例である。AICの最小値を与える時点は19.78秒となる。加速度の記録開始時点はトリガーの20秒前である。その結果、P波到着時刻は4時4分19.52秒となる。表1は、このような手続によって求めた4観測点のP波およびS波の初動時刻である。同表から、SP時間が得られる。

計算に用いた地盤構造は次の通りである。震源の概略推定には半無限地盤構造(P波速度 $V_p=7\text{km/sec}$)を用いる。精密計算としては、 $V_p=8\text{km/sec}$ の半無限地盤上に、5層の水平成層構造を仮定した。地表面下の層厚(km)は1.3, 1.2, 2, 10, 5, 17、P波速度(km/sec)は1.8, 2.7, 5.5, 6.2, 6.8である。

震源の初期推定としては、4観測点のP時刻とSP時間から発震時を求め、この発震時を固定し、3観測点のP時刻から震源位置を決めた。その結果、震源位置は($35^{\circ}8.7'N$, $139^{\circ}45.38'E$)、震源深さは98.97km、発震時は4時4分4.49秒となった。震源は、上述した推定値を初期値とし、重み付き残差2乗和を小さくするように反復計算を実施し、精密に求めた。これには、①震源位置(緯度、経度と深さ)と発震時を未知量とするケース、および②初期推定で得た震源深さを固定し、3変数(緯度、経度と発震時)のみを反復推定するケースを考えた。後者は、震源深さによる走時の偏微分係数に対し、観測点での最大値と最小値の差が微小なとき有効である。

マグニチュードMは、地表の加速度記録に対し、1倍強震計の計器特性をconvoluteして得た変位記録から計算できる。すなわち、水平2成分合成値(最大振幅)と震央距離から、各観測点のMが計算される。最終的に、マグニチュードは各観測点のMを平均したものととなる。なお、加速度記録は、長周期成分を含むため、チェビシェフ型の等リップル漸化フィルターのバンドパスフィルター(0.1~20sec)を通した。

図3および表1は、気象庁と本研究の推定震源要素をまとめて示す。初期推定は0、精密計算はA(ケース①)とB(ケース②)で記す。気象庁と本研究の震央距離は約11.5kmである。気象庁の震源速報は概略値であるため、本成果の有効性が確認できない。そこで、東京大学地震研究所地震予知観測情報センター(EPDC)による結果との比較を行う。EPDCは、多地点の観測データから、震源要素を決めている。図3および表1のEPDCの結果から、本アルゴリズムはかなり高い信頼度で震源情報を提供していることがわかる。

4. あとがき

本研究では、1)位相初動時刻の決定、2)震源計算と3)マグニチュードの決定の3段階からなる震源要素の即時的推定法を開発した。本方法は、リアルタイムに収集される加速度記録に基づいた震源推定であり、合理的な地震時緊急遮断システムの構築に役立つと考えられる。

参考文献

1)野田茂: 逐次型同定手法を用いた地震波初動の自動検出、第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 85~97、1991年11月。

表2 震源要素のまとめ

	発震時	震源位置			M _s
		緯度	経度	深さ(km)	
JMA(速報)	4時4分5.7秒	$35^{\circ}14'N$	$139^{\circ}48'E$	93	5.9
ERI	4時4分4.46秒	$35^{\circ}10.218'N$	$139^{\circ}40.482'E$	107.71	5.8
本研究	初期値(0)	$35^{\circ}8.7'N$	$139^{\circ}45.38'E$	98.97	
	Case①(A)	$35^{\circ}9.72'N$	$139^{\circ}42.79'E$	103.31	5.82
	Case②(B)	$35^{\circ}9.46'N$	$139^{\circ}43.03'E$	98.97	5.82

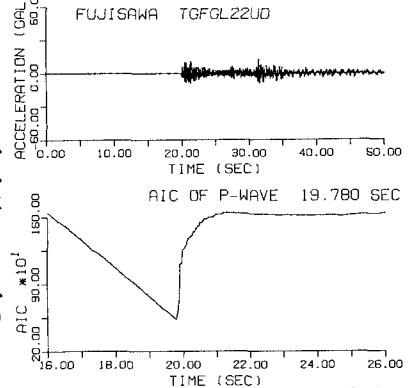


図2 藤沢でのP波到達時点の決定(原加速度とAICの変化)

表1 P波およびS波到着時刻

観測点	P波初動到着時刻	S波初動到着時刻
鹿放ヶ丘	4時4分21.67秒	4時4分34.29秒
小平	4時4分21.76秒	4時4分34.15秒
藤沢	4時4分19.52秒	4時4分30.43秒
袖ヶ浦	4時4分20.27秒	4時4分31.63秒

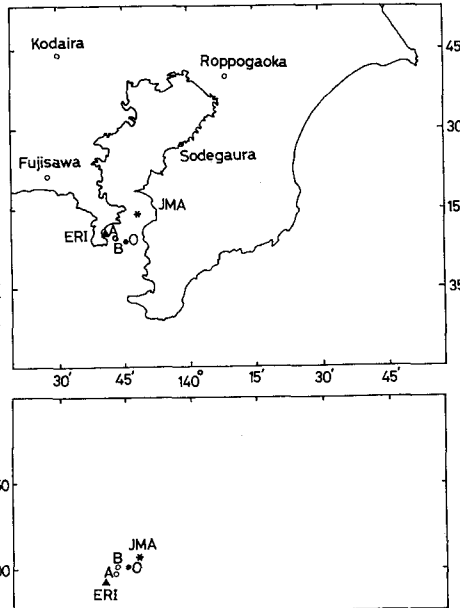


図3 観測点配置と震源位置