

第4章 自動処理に関する関連研究

4.1 初期の地震波形リアルタイム自動処理システム*

4.1.1 はじめに

筆者は東京大学地震研究所に在任中を、地震波の On-Line 自動処理法 [Matumoto (1966)、松本・宮村 (1971)、松本 (1977)] を他に先駆けて手掛け、完成を見ずして関連の研究から遠ざかっていたが、今回気象研究所で類似システムの開発を手掛けその成果をまとめることになった。未完成で論文として報告することのできなかった前回の地震波形自動処理システム開発の成果の一部を紹介する。

使用した装置は 1967 年に製作し、1968 年後半から東京大学地震研究所堂平微小地震観測所の小規模配列地震計網で得られる信号を使用して実用化試験に入ったものである。このシステムは、1969 年までに第一期のテストを終え、続いて第二期テストのための工事と調整を開始した時点で研究は中断した。

4.1.2 処理能力

この項では、装置の処理能力のうち第一期テストで確認できた事項について報告する。なおこの性能テストは、検測対象を人間が記録から読み取った結果と比較して行ったものであるから、必ずしも現象そのものの情報との比較ではない面もある。しかし、一応図 4.1.1 および図 4.1.2 に示した記録上に見られる程度の地震についてのみ検定を実施したものであるから、人間による判断結果には問題は少ないものと言えよう。以下、全数 300 の地震について行った検測事項とその評価結果の分析結果を示す。

検定事項 (1) P か X かの判断について

これは最初に決める初動検出設定条件によって、結果が大きく変化する事項と思われる。一応この研究での設定条件 $2N^{**}$ を信号 $1.5N$ を判断の規定値とした結果では、 $P:X=1:3$ と X の打ち出し回数がかかなり多くなる。人間ならば P と判断しても当然と思われる地震初動を X と判読したものは全処理地震数に対し 7%、その逆で人間ならば X と読むであろう地震初動を P と読んだものは

* 松本英照：地震火山研究部

** N はグラウンドノイズレベルをしめし、 $2N$ および $1.5N$ はグラウンドノイズレベルの 2 倍および 1.5 倍の振幅を意味する。

MAY.22.1969.09.53.

MAY.23.1969.09.45.

P OR X	AZIMUTH	TIME DIFFERENCE	AP	APM	TP/2	OR	TX/2	S	AS	TS/2	M	AM	TM	F	NO
X105451.1	07 04 01	024 000 257 160	+038	641	06 04	15 11 11	ES105505.7	-295	13 04	10 21 05	M105506	06 22	F105603	001	
P114714.3	18	072 135 301 000	+003	057	04 03	03 05 19	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M114719	03 00	F114721	002	
X115551.9	15	180 185 000 301	+043	043	18 10	08 07 06	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M115552	02 00	F115556	003	
X115554.8		075 000 301 000	+015	060	11 04	09 15 18	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M115557	03 35	F115612	004	
P115801.7	H	245 253 166 000	+053	053	11 05	07 07 06	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M115807	03 79	F115818	005	
P145957.3		080 -080 -000 -029	-019	177	00 00	04 03 08	ES120005.8	-965	-01 01	-03 -02	M120009	10 -24	F120121	-006	
P123323.1		324 324 323 323	323	323	32 32 32	32 32 32	ES123323.1	323	32 32	32 32 32	M123323	32 32	F123323	323	
P123323.1	32 32 32	323 323 323 323	323	323	32 32 32	32 32 32	ES123323.1	323	32 32	32 32 32	M123323	32 32	F123323	323	
P123323.1	32 32 32	323 323 323 323	323	323	32 32 32	32 32 32	ES123323.1	323	32 32	32 32 32	M123323	32 32	F123323	323	
X130745.3	C	087 000 033 091	+014	173	05 07	06 10 07	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M130813	04 19	F130914	010	
X134836.4	10	218 000 301 100	+015	078	04 04	05 05 06	ES134844.1	+153	03 04	06 03 06	M134844	04 13	F134917	011	
P135700.9	10 01 04	059 000 069 024	+003	316	05 02	04 07 03	ES135718.4	+253	09 06	07 07 09	M135719	06 10	F135824	012	
P143323.9	13 20 19	112 093 120 000	+015	179	06 07	07 10 07	ES143342.0	-235	00 12	17 13 00	M143342	06 29	F143442	014	
P152120.1	E	149 054 000 102	+045	057	09 08	05 08 09	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M152120	02 42	F152157	015	
X154836.4		323 323 323 323	323	323	32 32 32	32 32 32	ES154836.4	323	32 32	32 32 32	M154836	32 32	F154836	323	
X160524.0	15	119 142 000 301	+035	035	09 09	09 09 07	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M160524	02 00	F160523	017	
P163114.0	H	244 253 155 000	+049	053	00 00	07 05 04	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M163115	02 74	F163125	018	
X165913.4	13	196 150 301 000	+016	032	05 05	05 08 20	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M165917	02 35	F165929	019	
P170639.5	A	000 041 127 197	+015	071	13 17	17 10 07	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M170744	03 13	F170835	020	
X173950.5	07	001 000 301 225	-001	046	13 10	05 04 04	ES174000.3	+038	05 00	08 06 09	M174000	03 56	F174014	021	
X183741.6	A	000 001 015 118	+013	525	10 23	38 12 05	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M183827	06 39	F184142	022	
X185331.9	02	000 004 301 230	+016	038	10 08	10 08 10	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M185332	03 71	F185350	023	
P203937.9	21	000 098 301 017	+012	062	06 07	07 05 06	IS000000.0	+000	00 00	00 00 00	M203952	03 22	F204004	024	
P204110.3	0	007 005 000 103	-984	024	01 34	04 11 01	ES204114.4	-069	05 06	06 04 07	M204129	10 03	F204432	025	

図4.1.1 初期の自動処理システムが打ち出した出力例。

横線で抹消の行以外は、期待される処理が行われている。

0.5%と、まずは妥当な判断をした。

検定事項（2）初動時刻について

Pと打ち出した地震については（Pとして処理した地震のみ）

近距離（S-P 25秒以下）

±0.1秒以内=83.5% ±0.2秒以内=93.3% ±0.3秒以内=97.5%

中距離（S-P 25秒以上）

±0.5秒以内=89.5% ±1.0秒以内=91.5% ±2.0秒以内=95.7%

打ち出し地震全数（P+X）については

近距離（S-P 25秒以下）

±0.1秒以内=80.4% ±0.2秒以内=90.4% ±0.3秒以内=94.4%

中距離（S-P 25秒以上）

±0.5秒以内=66.4% ±1.0秒以内=76.5% ±2.0秒以内=80.0%

となっており、目的あるいはデータの使用方法によっては使用可能なデータが得られたものと思われる。

検定事項（3）地震検知率

全地震数比94%が検出された。S-P 25秒以上のみでは46%とあまりかんばしからぬ成績であるが、この件に関しては誤検出の抑圧とどちらを優先するかといった問題とも関連があり、今後更に研究を進めるべき事項と思われた。対象とする信号にS/Nの改善があれば、全数比99%を達成し実用に供し得る検定結果と判断している。

DATE ON
MAY. 22. 1969. 10. 03.

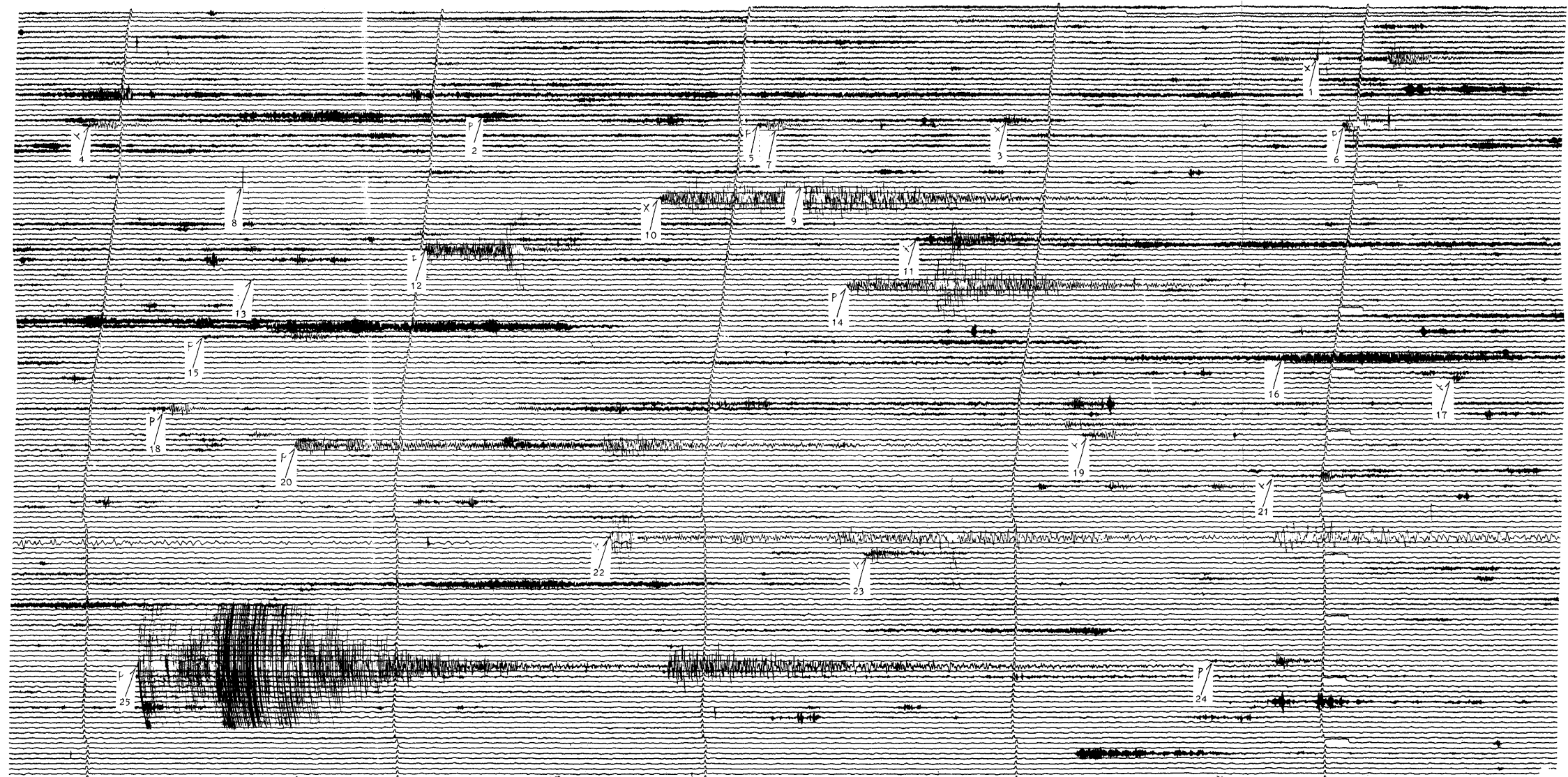


図 4.1.2 自動処理で読み取りした地震記録例。
矢印の下に記した番号が図 4.1.1 の No の数字に対応する。

検定事項（４）誤検出率

この装置による誤検出率は、気象条件や航空機、自動車等による不確定な雑音の影響で日によって大きく変化した。すなわち、堂平観測所の平常条件でも、日により5%から約30%までの範囲で誤検出率は変化している。しかしながら、この誤動作の原因として一番大きな率を占めたのは、航空機の飛来によるものであり、この種の誤動作は埋め込みの地震計を使用すれば阻止できることが判ったので、結果的には5~10%程度には改善できるものと判断している。

この程度の誤動作であれば、震源決定計算の過程で他観点に出現しない現象と判断し、誤処理データとして除去する手段も残されている。したがって、この事項の自動処理を観測に導入することにはもう解決のできない難問は残存していないと思われた。

検定事項（５）S波検出率

この装置によるS波の検出は全地震数に対して24%しか成功しなかった。また、人間が容易に判断できる地震のみに対しては、かろうじて57%の検出率となった。

この検定後に、この検出率の改善をめざして70 m スパンに3台の地震計を配置した極小アレーに信号相互相関係数をリアルタイムで求める処理を付加したテストを行ったが、目で確認した範囲では位相の同定精度の若干の改善は可能なように判断された。しかしながら研究の中断により、処理結果を正確に解析したのではないから、過大な期待を持たせるような結論は示せない。

検定事項（６）S波到来時刻検出の精度

S波の検出率が十分ではないので、精度について検定することにはあまり意味がないと思われるが、一応検定内容を示すと ± 0.5 秒以内に収まったものは68%、 ± 1 秒以内82%である。また、S波とは思えない時刻を打ち出したものが14%もあり、使用可能な処理データ数は全地震数に対してはわずかに15%にすぎず、不満足な結果と判断せざるを得なかった。

検定事項（７）地震終止時刻

微小地震を観測する場合には、ダイナミックレンジの関係で振幅が制限されることもあって、最近ではF-P時間をマグニチュードの算定に使用する観測所が多い。この目的に使用できる程度の精度を得られるならば、地震終止時刻の自動検出の利用価値は高いと言える。この装置による検出結果と人間によるそれとの差は、 ± 3 秒以内90%、 ± 5 秒以内は96%、 ± 10 秒程度98%と判断され、この結果からマグニチュードを決定するためのF-P時刻の自動読み取りの結果は十分実用に供し得ると言える。

検定事項（８）初動のおしひき

初動のおしひきを可視記録から判断する処理は、記録紙速度によって、あるいは現象そのものの不明確さによってかなり誤読しやすい要素である。そのため、この検定にはこれまでの検定項目ほどには確信は持てない。しかし、一応分析した結果は、Pと打ち出した地震については約80%は納得のいく打ち出しを示し、他の20%も間違いと断定することはできないような現象であった。した

がって、一応人間に準じた判断は、この種の装置でも可能であったと結論される。ついでながら、Pの3倍にも達するXと判断された地震に関しては、当然問題はあったが、これは当然のことなので評価は差し控えておく。

検定事項(9) 各種周期

この検測結果については、ゼロクロスの読み取りによる周期測定作業は人間よりも装置の読み取りが、信用おける分野であることが結果的に証明できた。

検定事項(10) 各種振幅

この作業についても9項と同じことが言える。

検定事項(11) 方位決定

可視記録に示される一般的な振動の形状から推定するに、on-set 時刻を電気回路で処理して得られる精度は20~30 ミリ秒間と思われる。この精度でも方位を決定できるに十分なひろがりを持った大きな観測網でなければ、このような処理方法とその処理結果は利用できないことがわかった。

検定事項(12) 検出時刻の差

このデータは、方位を決定する為に検測されたものであるが、

(S-P 25 秒以下) の地震については $\pm 10 \text{ m s}$ 以下の精度 40%

(S-P 25 秒以上) の地震については $\pm 30 \text{ m s}$ 以内の精度 10%

程度となり、この方式による地震計相互の relative time-pick (相対時刻差検出) の精度限界を示すものと思われた。

以上、検定の結果について述べたが、筆者はこれら各種の処理内容の総合結論として、当時でもこのような処理装置の採用はすでに可能な状況に達しており、このためには前述の問題点の改良に早急に取り組むべきと考えていた。幸いこの種の開発は、10 年を経ずして地震研究所の新しい組織に引き継がれ、殆ど実用の域に達したシステムが完成し、現在地震予知研究のための資料の提供に大きく貢献している。

4.1.3 処理手法

前項では、システムの処理能力として各処理内容とそのスコアとを報告したが、この項ではその結果がどのような手法によって得られたのか、またそのスコアを反省材料として今後どうすればもっと良好なスコアを得られるだろうかといった面を述べてみたい。

(1) 初動の検出法及び地震と雑微動との識別法

一般に地震の初動というものは大変小さな振幅までを読み取る必要があるので、近地地震を除いては、多くの場合大変複雑な判断を要する検測対象となる。したがって、それを単純な論理構成による機械で正確に処理することは大変困難と言える。

このような理由から、筆者が前回に手掛けた装置では規定値に達した信号はすべて検測処理対象

としてとりあげて、まず地震か否かの判定を行い、その後信号が地震の初動として震源決定等の計算に使用可能な信号かどうかの判定処理を付加した。電気信号化した地震動の有無を検出する場合には、原理的には何の困難もなく、したがって、突発現象である地震の初動を正確に捉えることにも困難はない筈である。しかしながら、現実には装置雑音あるいは地面の雑微動という雑音要素が信号と重畳しているので、地震初動の検出に際しては地震動か否かの識別が必要となり、この工夫の良否が処理された初動データの利用価値を大きく左右する。すなわち、地震のみを正確に弁別して利用価値の高いデータ（例えば0.1秒以下の検測精度を持つ地震波初動検測値）を得るには、装置はただ単に有意な電圧が発生したかどうかだけの処理機能では不十分である。もちろん、対象とする地震動が大きく、しかも雑音成分が小さい場合、あるいは雑音が極端に小さい等、S/Nの高い信号を処理する場合には上記問題点の一部は除去されるが、その場合にしても初動の立ち上がりの時刻検出の精度を向上させるためには、立ち上がり時点をできるだけ早い機会、すなわちできるだけ小電圧のうちに処理を起動せしめる必要がある。しかしこれは、等価的にはS/Nを劣化せしめて処理するのと同等の効果があるので、初動時刻の正確な検測には問題が残る。

このような観点からこの装置は、初動の検出に際し下記の手法を用いた。

- i) 平均的雑音波高値（以下Nと記す）の2倍の信号が発生したら、とりあえず地震波が到来したものと判断する。
- ii) その信号の到来前1秒間内に1.5N以上の信号が検出されていたら、その信号はPではなくXと判断する。（前駆波等の有無の確認）
- iii) 観測網を地震のP波が通過するに要する最大の時間（このシステムでは小アレーの展開距離1.1kmを、表面層のP波伝播速度4km/秒で割って得た、最大のP波到来時刻差約3秒を用いた）内に5点中3点以上の観測点に信号が到来した時に初めて地震であると判断して処理の持続を決定し、その条件が満たされなければ処理を打ち切り、次の地震の待受状態とする。（自動車等の雑音対策）
- iv) 2N以上の信号の持続時間が1秒以下の場合には、その信号は地震でないと判断して処理を中止し、次の地震の到来を待ち受ける。（多発する伝送路の瞬断対策）
- v) Pと判断できる信号とそうでない信号との表示は、出力時に着震時刻の頭部にPあるいはXと印字することによって、データの信頼度表示とした。したがって、Pと打ち出した地震の97.5%に当たる地震の着震時刻の精度が±0.3秒内に収まっていたことは当然と言える。

上記のような論理構成で処理を行った結果について前項で報告したが、この論理構成の欠陥とその対策は、

- i) この手法では飛来する航空機による振動あるいは吹き続ける強風が持続する時の土地微動のように、観測網の殆どの観測点に、同時に持続する振動を与えるような雑音源に対しては、誤検測*

*誤検測：地震でない振動を地震として処理して結果を打ち出してしまうこと。

を防止できない。飛行機の場合には、1観測点だけでも埋め込み式地震計とする等の手段によって、処理の決め手として使用できるS/Nのよい観測点を設けて、誤検測を防ぐ必要がある。検出レベルを大幅幅に移し検知率を犠牲にすることも一つの解決ではある。

ii) 近地地震に対しては、X付のデータが本当の初動である場合は少なくこの判定は信用できるが、遠地地震の場合には系統的な間違いが生じている。すなわち遠地地震のように、立ち上がりのシャープでない初動を示す地震に対しては、Pと判読した方が良い場合にX、Xと判読した方が良い場合にPと出力する誤処理が増加する。この対策としては、周期の検測を参照してPまたはXの判定の条件をさらに細分してデータの質を識別しておく方法の採用が良い。また観測点ごとにデジタルスイッチで、検出の敷居値レベルを容易に変更できる装置構成にして、初動の検出と信号遅延の双方を、ハードロジック回路化する方が良い結果が得られる可能性が強い。

iii) この装置に応用した手法では、90%以上の地震の初動時刻の決定精度を0.1秒以内に収めることは、遠地地震・近地地震のすべての地震現象の性格からして不可能である。現在では、処理速度が高速化し付加メモリーも大容量化したミニコンを容易に採用できる趨勢にあるから、今後の開発では、デジタル形式の地震の波形信号を一旦メモリーに取り込んでしまい、地震が終わってからパターン識別等の高度な手法を用いて、初動の決定処理を行う方が、精度・確度の両面を向上させるために望ましい。筆者が使用したミニコンは、4 KWのCPUメモリーのみで全部の処理を実行させたので、処理内容には限界があり、誤検測あるいは欠測が十分に除去できなかったのであるが、この手法を導入すれば初動時刻も地震か否かの判定も確度が向上し、処理結果の利用価値は飛躍的に向上すると思われる。

(2) S波の検出法

S波の判読は、それぞれの地震、観測点、それに使用した地震計などによって難易度は一様でない。相当に熟練した作業者でも判読が困難な地震波形の場合もあれば、振幅や周期が顕著に変化し、教科書で地震波の特徴を学んだだけの初心者でも容易に判読できる場合もある。したがって、S波を誤読あるいは見逃しなしに自動検測することは至難の業と言える。そこで、筆者は次のような方法でS波の検測を試みた。

S波の検出に一番効果的だった手法は次の方法であった。すなわち、まず規定値を超える振動を検出したならば、1秒後から4秒後までの3秒間の上下動成分の信号の最高振幅を計測して、メモリーに記憶し、4秒後以降の水平動2成分の信号の絶対値を加算した振幅と比較してメモリー内の振幅値の3倍以上の数値に達する振幅を持つ信号の到着を検出し、S波の到着と判定する。

この手法には明確な物理的根拠はなく、堂平観測所ではS-P時間が4秒以内の地震がほとんど観測されないという事実と、振幅の変化からS波の到来を判断するといった人間が判断する場合の経験的な判断根拠を数値化してみただけのことである。したがって、もしもこの手法を他に応用する場合には、この設定数値は観測所によって、また波形の特徴に応じて決定することが必要である。

一方、前にも述べたようにS波の性状は複雑であるから、この方法だけではすべての地震に対しS波を検測することは困難で、このままの手法では好成績の検測は望むべくもない。

そこで、補助的な手法としてP波とS波では振動面が直交する性質を利用して、S波を検出することを試みた。しかしながら、良く知られているように、短周期地震計の地震波形は、オービットを書いて非常に複雑で、S波の到来時に2波あるいは3波も続けてS波的振動をする地震波形は非常に稀である。またコンパートウェーブとかスタンディングウェーブ等、P波とS波の中間に位置し正体のさだかではない波群にもS波と同じ振動面の波動が存在する場合があるので、孤立した波形のみを用いる手法でS波を検測するのでは正確を期すことはできない。そこで第1の手法でS波を検出した時に、その対象が本当にS波かどうかをチェックするのみにとどめた。さらに第二期開発に際しては、70 m スパンのほぼ正三角形に配列した3つの地震計出力の0.5秒区間毎の相互相関を計算して、コヒーレントな波群の到来を検出することによって、S波を捉えることを試みた。この結果については、データを解析するだけ資料を得られなかったので評価はさし控えるが、実験観測中に受けた感触では、今後研究するに価する手法と判断された。

(3) 最大動の検出

この作業はコンピューターとしては最も得意な単純作業なので省略する。

(4) 各種周期

この測定はコンピューターではなく、カウンターを使用してその出力をコンピューターに取り込んで打ち出す方式とした。これはコンピューターのロード軽減に有効な手法と言える。

(5) 地震の終了時刻の処理

地震動の終止は、S波の判読と同様にそれぞれの地震観測点・観測測器によって判定時刻は大きく変動する。しかしながら、津村(1967)や堀(1973)の論文によれば、地震規模を決定するのに大変有効なデータとなり得るし、また $M_{F-P} \geq 1$ の地震ならば5秒の読み取り違いが M_{F-P} に対して0.3以下、 $M_{F-P} \geq 2$ に対しては0.1以下であるから、5秒程度の読み取り誤差は実質的な地震規模決定には問題はなく、その判読作業は比較的簡易な方法でも、利用可能なデータを得ることができるように思われる。そこでこのシステムでは、1.5 Nに達する信号が5秒間に1回も出現しないことを判読した時の5秒のウィンドウの始まり時刻を、地震終止時刻とし処理を行わしめた。

したがって、この処理の精度は、本質的に1~2秒を上回することは期待できないが、使用目的に合致した精度を保持しつつ誤処理を防止できていることを評価すれば妥当な手法選択と言えよう。

(6) 初動方向

地震波初動方向は、1地点の観測から地震波の到来方向を検知するのに、また多地点の初動データを総合して発震機構を決定するために用いられる。観測点が地震動の放射パターンの節線上に位置する場合、あるいは遠方で発生した小さな地震の場合には、この検測は原理的に困難となる。このシステムでは初動を検出した時点での信号の土をそのまま初動方向として採用する手法を採った

ので、この検測の良否はすべて初動の判定の良否に左右された。

将来、初動の検測に良い手法が開発されれば、この検測結果もより信頼のおけるものに改善されるものと判断された。

参 考 文 献

- 堀 実、1973：堂平微小地震観測所の観測による近地地震のマグニチュードの決定、地震研究所速報、10(4)、1-4。
- 松本英照・宮村攝三、1971：地震と電子計測、電子計測、11(2)、2-10。
- 松本英照、1977：自動処理システムについて(その1)ー処理能力、和歌山微小地震観測所季報、15、1-4。
- 津村建四朗、1967：振動継続時間による地震のマグニチュードの決定、地震2、20、30-40。
- Matumoto, H., 1966, An automatic on-line data processor for micro-earthquake field observation. Bull. Earthq. Res. Inst., 45, 739-748.

4.2 マイクロプロセッサーによるデータ処理*

4.2.1 導入の背景と経緯

マイクロプロセッサー(以後マイクロコンピューター、マイコンと適宜略称する)を地震観測機器に応用することが考えられ始めた時期は、1976年頃からである。当時地震観測に関連した、マイコンの有望な用途として考えられた使い方には、データの転送や制御の他に、信号の遅延と地震の判別があった。

当時、地震の信号の時間的遅延をとる方法として、アナログ方式の磁気ドラムによる遅延が、67型磁気テープ式地震計で用いられていたが、信号のS/Nや保守の手間などの点で改善すべき問題が残されていた。その後A/D変換した信号をシフトレジスターに入れて遅延するデジタル方式が開発されて、76型地震計や火山の機動観測用の機器に導入された。デジタル方式により、性能に関する問題は解決された。しかし大容量のRAM(ランダムアクセスメモリー)の開発と、価格の低下が進むに従い、マイコンとRAMを用いて信号の遅延を行う方が、シフトレジスターを用いる場合に比べ経済的であることが、明らかになってきた。

地震の判別については、従来はアナログ方式が用いられてきた。信号とある設定電圧をコンパレーターで比較して、入力信号の大きさにより地震の有無を判別するものである。しかしこのような単純な論理では、効率のよい地震の選別は困難である。各種のノイズにより、地震の数以上にノイズを地震として拾うことも珍しくなかった。76型地震計では、ノイズレベルをアナログ的に加算して

* 浜田信生：地震火山研究部

求め、トリガーレベルをノイズレベルに追従するようにした改良方式が用いられたが、地震判別の効率向上に、大きくは寄与していない。一方、ミニコンを用いた地震波の自動検測が、市川（1980）によりすでに開発実用化されており、初期のミニコン程度の性能を持つマイコンを用いるならば、複雑な論理による効率のよい地震判別を行うことが、可能なことが予測されていた。

このような状況のもとで、檜皮ら（1980）は、USGSにおけるマイコンを用いた記録システムの開発を参考にして、地震観測所においてマイコンを用いた各種の実験を行った。その結果、地震信号の遅延や判別その他地震観測に様々な用途が考えられることを明らかにした。

その後地震課では、東海地震予知のための観測体制の整備が進められ、大学や研究機関のデータをテレメーターするための東海テレメーターシステムが、また海底地震計で捕えた地震を東京で観測するための海底地震常時観測システム（OBSシステム）が、1979年3月に相次いで設置された。これら2つのシステムには、マイコンが信号の転送制御、遅延、判別のために用いられており、気象庁では初めての、マイコンを用いた地震観測システムが実現した。その後、マイコンを用いたシステムは、本庁では、地震資料伝送網（L-アデス）、体積歪観測システム、松代の地震観測所においては、歪地震計、小規模群列地震観測システム（アレー）、さらには一部の火山観測官署には、火山性震動計数器が導入されている。現在では、マイコンを使用していない機器の方が、少数派になりつつある。これらの業務観測に用いられている機器の特徴と問題点を概観し、マイコンを有効に生かす地震観測システムに必要な条件の検討を行った。

4.2.2 東海テレメーターシステム

マイコンの機能本位の立場から見た、システムのブロック図を図4.2.1に示す。このシステムの仕様は、名古屋大学地震予知観測センターに納入された観測システムとはほぼ同一である。16ビットのマイコンが用いられ、データの転送制御、信号の遅延を行っている。地震の判別は、アナログのコンパレータ出力をマイコンで監視する、アナログ、デジタル折衷方式が、採用されている。マイコンの役割は、アナログのコンパレータの出力をモニターし、記録器の制御を行っているに過ぎない。したがって、通常のアナログ方式の地震判別と同じように、論理は単純である。テレメーター回線のノイズや脈動の変化などへの対応は、不十分である。このシステムでは、信号の転送制御、遅延処理については、マイコンの能力が十分に活用されているが、地震判別にはあまり生かされていないと考える。

4.2.3 海底地震常時観測システム

東海沖の海底に設置された地震計からの信号は、御前崎測候所でA/D変換された後、電話回線を通じて東京へ伝送される。東京の本庁にある受信システムのブロック図を図4.2.2に示す。このシステムにおいては、信号の遅延と地震の判別にマイコンが用いられている。東海テレメーターシス

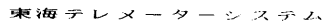


図4.2.1 東海テレメータシステムのデータ処理ブロック図。

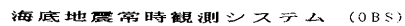


図 4.2.2 海底地震常時監視システムのデータ処理ブロック図。

テムとの相違は、システムの各種機能の独立性が高く、分散した処理が行われていることにある。例えば、データの転送制御は、マイコンを用いず、純粹のハードウェアだけで行われている。一方、信号の遅延と地震の判別には、独立にそれぞれ8 bitのマイコンが用いられている。

このシステムでの地震判別は、純粹のデジタル処理である。ノイズレベルの積算、トリガーレベルの設定、入力信号のレベル、周期の測定、波数のカウントなどを行うなど、マイコンならではの複雑な論理が用いられている。海底地震計は、脈動などのノイズの他に、船の振動、T相など、海底下特有の各種ノイズを記録している。これらの本質的に重要でない信号によるミストリガーを防止し、回線から入ってくるノイズによる誤動作を防ぐためには、マイコンを用いた複雑な論理による地震判別が必要である。但しマイコンのソフトウェアの仕様決定、作成に関しては、観測が開始されてからも、何度かの変更、調整が行われ、ソフトウェアの作成とデバックの方法については、問題を残した。

4.2.4 歪地震計

地震観測所では、昭和54年度に2成分の100 m伸縮計の更新を行った。更新により、伸縮計の出力ばかりでなく、地殻変動関係の各種データ、地震計の出力も総合的に記録するシステムが設けられた〔山岸ら(1980, 1981)〕。

本庁に導入された2つのシステムに比べ、このシステムではマイコンの果たす役割がさらに大きくなっている。マイコンの果たす役割が大きくなった理由は、主として連続観測に対する配慮からである。ミニコンを直接データの収集に用いると、保守、点検のため定期的なシステムの停止が必要となる。サンプル数の比較的少ないデータの収集をマイコンで行うことにすれば、データの欠測を最小限にすることができる。

受信システムのブロック図を図4.2.3に示す。観測壕の各種計器からの信号は、光ファイバーケーブルにより受信システムへ送られる。受信側では、3台のマイコンが信号の受信処理を分担している。この受信装置は、データの解析と最終処理を行うミニコンとは独立したシステムになっている。つまり、短周期地震波以外の信号は、マイコンにより、フロッピーディスクに直接収録されるので、ミニコンの動作にかかわらず連続観測が可能である。

地震判別に関するマイコンの機能は、既に述べた2つのシステムに比べ、高度になっている。地震判別に用いられる信号は、デジタルフィルタリングにより、長周期成分と短周期成分に分解され、それぞれ遠地地震、近地地震の判別に利用される。遠地地震検出用の判別処理は、いわゆる長期平均(LTA)と短期平均(STA)の比較による方法である〔ASRO長周期地震計についての判別処理が、地震観測所(1979)により紹介されている〕。一方近地地震検出用の判別処理は、檜皮ら(1980)により開発されたパルスを計数する論理が用いられた。

マイコンにどこまで高度な機能を分担させるかは、システムを考える上で重要な問題である。例

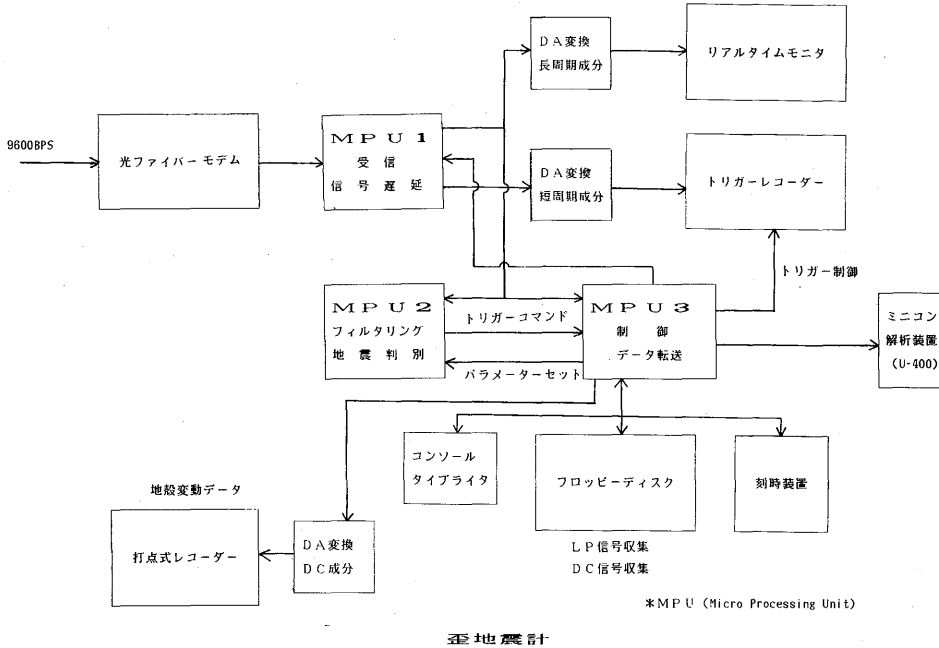


図 4.2.3 地震観測所の歪地震計システムにおけるデータ処理ブロック図。

例えば信号のフィルタリングなどは、鋭い Cut off をもつフィルターでない限り、アナログ方式の方が容易である。このシステムでは、マイコンがハードウェアの一部という部品としてではなく、従来ミニコンが果たして来た役割を果たしている。マイコンへの各種の指示を、コンソールタイプライターから行う形式になっている点などに、その性格がよく表されている。このようにマイコンの機能を最大限に活用するか、それとも機能がある程度限定すべきかは、設計、制作、保守等、様々な角度から得失を検討しなければならない。

4.2.5 地震資料伝送網 (L-ADESS)

かつて小地震観測用に展開された地震計の磁気テープ記録は、すべて郵送により管区、本庁へ集められ処理が行われていた。しかし、このような体制では、処理に時間がかかり、地震活動の即時監視を行うことは不可能である。これらの地震計からの信号を、気象資料伝送網の展開に合わせて、各管区へ伝送することが計画された [市川 (1981)]。このシステムでは、各観測点から送られて来る信号を、中枢の地震入力処理装置で受け、最終的には、ミニコン4台で構成される処理装置へ信号を転送し、処理を行う形態が採られている (図 4.2.4)。このシステムにおいて、マイコンの果たしている役割は、今までに述べて来た各システムに比べ、限定されている。

このシステムでマイコンが受け持つ役割は、信号の送受信の制御と、遅延のみである。地震の判別や記録器の制御は、ミニコン (FEP) により行われている。マイコンの活用形態が、むしろ後退

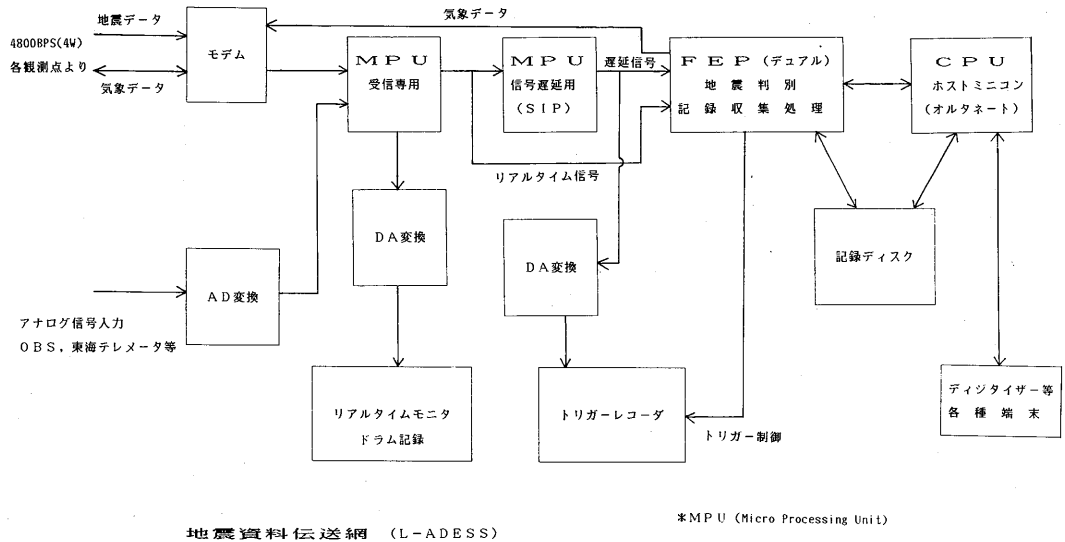


図 4.2.4 地震資料伝送網 (L-ADESS) のデータ処理ブロック図。

した形になった経緯には、いろいろな事情が絡むものと考えられる。ここでは、以下の2点について、評価してみた。

1) 地震判別処理をミニコン (FEP) で行うことの是非

ミニコンによる演算処理は、マイコンに比べ高速であるため、ミニコンを用いると多数の観測点からの信号の地震判別を一度に行うことができる。またミニコンは、管理用のソフトウェアが充実しているために、高度な論理を用いることが可能であり、ソフトウェアのデバックや判別プログラムのパラメーターの設定が、柔軟に行えるなどの利点が考えられる。

しかし、実際に組み込まれたプログラムについてみる限り、ミニコンならではの特徴は認め難い。さらにミニコンは2台一組で、気象データの制御もリアルタイムで平行して行っているため、パラメーターの設定、変更などの作業に制約が多い。また最適なパラメーター値を求めるに必要な情報を取り出すことも不可能に近い。したがって、ミニコンで判別処理を行う利点は、ほとんど生かされていないように考えられる。

2) システムの複雑化と冗長性

ミニコンの容量が大きい場合は、地震の判別ばかりでなく、信号の遅延も同時に行うことができるので、システムの構成を単純化することができる。しかし、十分な能力を確保できない場合は、機能の一部を、マイコンを含むハードウェアに分担させざるを得ない。現実のシステムでは、信号の遅延をハードウェア (マイコン) に分担させたため、ミニコンの入力チャンネル数は2倍 (リアルタイム信号、遅延信号) になった。このように、中途半端な構成になると、かえってシステムが

複雑になる。マイコンに多くの機能を分担させることの是非は別にして、機能の分担を整理してシステムの構成をできるだけ単純化することが望ましいと考えられる。

4.2.6 群列地震観測システム

地震観測所に設置されたこのシステムは、昭和59年度から本運用に入った。このシステムは、直径10 kmの円形上に配列された7つの観測点の信号を合成して観測する小アレーで、諸外国では主として地下核実験探知などを目的にしたものが多い。本システムでは、近地の大地震の余震観測に活用することを主目的に、柔軟な処理形態をとることができるように設計されている〔地震観測所(1984)〕。

このシステムの特徴は、地震の信号の収集がマイコンを主体とした機器で構成されている点である(図4.2.5)。信号の収集を分担する伝送システムには、今までに述べたシステムに比べ、更に進んだマイコンの活用が計られている。その主な特徴は次の通りである。

1) 伝送

7つの観測点の信号を同期させるために、テレメーター回線の伝送時間を考慮して、受信側から各観測点のサンプリングの制御を行っている。観測点のサンプリングを同期させる方法は、国立防災科学技術センター〔浜田ら(1982)〕の観測システムに初めて導入されたものである。

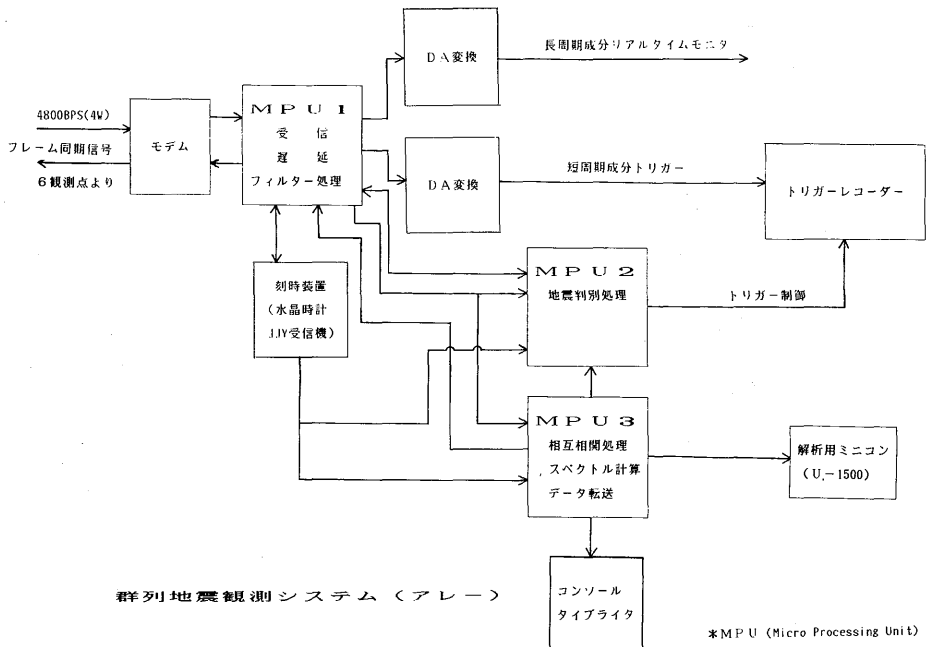


図4.2.5 群列地震観測システムのデータ処理ブロック図。

2) 地震判別

歪地震計に用いられたマイコンによる地震判別の機能をさらに強化している。例えば、複数の観測点の判別結果を比較して判別の信頼度を向上させた4ポイントトリガー方式、複数の地震波伝播方向を仮定して信号をあらかじめ合成してS/N比を改善しながら地震の判別を行うビームフォーミングトリガー、地震波とノイズのスペクトラムの違いをFirst Fourier Transformation (FFT)により求め判別に利用するFFTトリガーの3つの判別方式を併用している。

3) 地震波の周期と伝播方向の推定

マイコンによる対話方式を用いた最終処理の参考とするために、判別した地震波に関するいくつかの情報をあらかじめマイコンを用いて求めている。その内容は、ゼロクロス法による簡単な卓越周期の読み取り、伝播方向の計測などである。

群列地震観測システムに、使用されているマイコンのソフトウェアの量は、今までに述べたシステムの中では、最も多い。それだけに、調整、デバッグに多くの労力を費やした。マイコンによる機能が、実際の観測にどのように生かされているかは、今後十分に評価を行う必要がある。

4.2.7 既存のシステムに共通する問題

マイクロプロセッサの機能、応用技術はまだ発達途上にあり、変化しているので、今までに導入された各システムにおける役割、性格は、様々である。また、個々のシステムの経験が、制作メーカーの違いもあって、後のシステムの設計に十分反映されているとはいえない。しかし、いわば独立に設計された各システムにおいて、いくつかの共通した問題が認められる。これらの共通する問題点は、今後マイクロプロセッサを地震観測に利用していく以上、対策を検討しておく必要がある。以下にいくつかの問題点を列挙してみた。

1) 信号の遅延と同期

地震波信号の遅延は、比較的ソフトウェアが単純で、マイコンに適した機能である。連続的に入ってくる信号をRAMに記憶させ、一定時間の後、取り出せばよい。しかし、遅延のタイミングの取り方には、いろいろな方式がある。入力信号に同期させて遅延を行う方式が最も多いが、この方式は、入力信号が定期的に、連続して入力されることを前提として設計されている。ところが、送信側や、テレメーター回線のトラブルにより、信号の入力が円滑にいかない場合がしばしば生ずる。そのような時に、信号の遅延が正常にできなくなるだけでなく、システムの他の部分の動作に影響をおよぼすことが、いくつかのシステムで認められる。群列地震観測システムのように、信号のサンプルをすべて受信側で同期制御させる方式の場合は、このような問題が起こる余地はない。しかし、信号のサンプル、送信が、受信側のシステムと同期していない場合、データの流れが滞ると様々な問題が生ずる。このような問題はシステムが順調に動作している時には表面化しない。システムの設計時に、現実にかかる事態をすべて想定、考慮することもかなり困難である。

システムに複数のマイコンを用いる場合は、完全な同期をとるか、もしくは非同期で、個々のマイコンが独立に動作し、かつ他へトラブルを及ぼさないように設計すべきである。

具体的には、信号の遅延の場合、観測データの一サンプル程度の不揃いは無視し、遅延用のマイコン独自のタイミングにより信号の遅延を行うべきである。

2) 地震の判別

同じような短周期地震波を対象としながら、地震判別のためのソフトウェアは、各システムで少しずつ異なっている。最も優れた方法を見極め、固定化すべき段階に近づいていると考えられる。しかしその見通しとなると、未だに十分でない。見通しの立たない理由は、次の点に原因があると考えられる。まず判別のためのパラメーターの最適値を設定する方法が確立していない。いずれのシステムにおいても、パラメーターの設定が個人的な経験とカンに頼って行われている。極端な場合は、ソフトウェアが完全にブラックボックス化して、ソフトウェアの欠陥があるかどうかの判断も不可能で、パラメーター設定の手がかりすらつかめないようなシステムも見受けられる。このような状態では、個々のソフトウェアの優劣を判断することは、不可能に近い。

対策として考えられることは、一つは事前に地震波の性質をよく調べ、マイコンのソフトウェアを別の計算機でシミュレーションを行い、最適のパラメーターをあらかじめ決定することである。もう一つは、マイコンの動作状態をモニターできるハードウェアを用意し、観測を続けながら、パラメーターの調整を行うことである。いずれかの対策がなされない限り、マイコンを地震判別に用いることは、その場限りの設計者の思いつきに終わってしまう。

ミニコンの高速化、容量の増大が進むことにより、地震波の遅延、判別をミニコンで一括して行うことは、だんだん容易になりつつある。しかしシステムの冗長性を持たせるためには、ハードウェアの中に、地震判別機能を平行して残しておくことが必要であろう。今後もマイコンによる地震判別をシステムに設けるとすれば、地震判別用のユニット（モジュール）の仕様を検討しておくことが望ましい。

以下は、仕様についての一案である。

入力：アナログ入力とする。デジタル化して伝送されてくる信号も、一旦アナログに戻して入力する。

フィルター：Aliasing フィルターと脈動などのノイズ除去を兼ねたアナログフィルターを設ける。

時定数は選択可能とし、できれば、直流成分の除去を兼ねる。

A/D：8 bit の A/D 変換とし、サンプリングは、ソフトウェアによるが 20-30 Hz とする。地震判別だけの目的であれば、分解能、サンプリングを減らすことが可能になるので、伝送データを直接処理する場合に比べ、マイコンの機能を小さく押さえることができる。

CPU とソフトウェア：8 bit の CPU を用い、ソフトウェアは、いままでに開発されたものの中から選ぶが、Walsh 変換 (Goforth and Herrin, 1981) などを応用したものとする。

出力：能動的な出力として割り込み出力、受動的な出力として、標準的な直列出力形式の出力（RS232-C, GP-IB など）をもうけ、トリガーのフラッグなどを読み出せるようにする。

その他：ソフトウェアの容量や、サンプリング数によっては、複数成分の地震判別が可能である。

その場合は、一台で、複数の観測点の信号を処理できる。

観測点から送られて記録の対象となる信号をそのまま、地震判別に用いているシステムが多いが、これは明らかに適当でない。観測の対象とする地震、観測点のノイズの性質などにより、対象とする周波数帯を絞る必要がある。地震観測所のシステムで行っているようなデジタルフィルタリングも考えられるが、現時点では、アナログ処理の方が容易と考えられる。上記のような仕様の判別ユニットが実現すると、観測する信号の性質の違いに対し、柔軟な対処ができる。伝送信号を分岐してアナログ信号に戻すことによりシステムが多少複雑化する。しかし、その他の点では、システムをコンパクトにまとめられる利点の方が大きいであろう。また出力のインターフェイスを汎用のものにしておけば、最終処理を行う計算機の機種の変更に対しても対処できる。

3) 仕様とソフトウェアの作成についての問題点

マイコンを組み込んだ装置は、一応ハードウェアと見なされる場合が多く、仕様の作成などの手順に、特別な考慮が払われている場合は少ない。しかしマイコンといえども、ソフトウェアの仕様の作成、デバッグなどの作業は、普通の計算機と同じだけの手間を必要とするはずである。マイコンの場合、製作段階での調整、デバッグは入念に行われているかもしれないが、現実には設置段階での調整が十分でない場合が多いように、見受けられる。これは先に述べたように、マイコンの動作状態を把握する手段が乏しいことが理由の一つになっている。リアルタイム処理において起こり得る頻度の少ない状態に対し、不十分な対処しかできない潜在的な欠陥をソフトウェアが持っていたとしても、発見される機会は乏しい。このことは多くのシステムで、欠陥を持ったままのソフトウェアが使われている可能性が、大きいことを意味している。このような危険性を減らすためには、仕様作成の段階でより入念な検討を行い、又製作されるプログラムについても、詳細な説明書を作っておく必要がある。

ソフトウェアの制作に関する別の問題として、制作方法がある。マイコンのソフトウェアも、最近では直接機械語（アセンブラ）で作られるのではなく、高級言語で作ったプログラムをコンパイルする方法が用いられる場合が多い。このような方法で作られるプログラムの長さは、直接機械語で組まれるプログラムに比べ、数十パーセントのオーダーで長くなり、実行時間も遅くなる。プログラムをできるだけ圧縮するためには、仕様の段階で、十分な意志疎通をはかり、無駄な機能を作らないようにする、あるいは仕様を切詰めるなどの工夫が必要であろう。信号の遅延や、地震の判別などユニット化が可能なプログラムについては、直接機械語で組み立てるべきであろう。いずれにせよ、今までのシステムにおいては、マイコンのソフトウェアに対する考慮が、十分に払われているとはいえない。マイコンのソフトウェアにもっと考慮を払うべきと考えられる。

参 考 文 献

- 浜田和郎他、1982：関東東海地域地殻活動観測網—国立防災科学技術センター、地震2、35、401-426。
- 檜皮久義、柏原静雄、浜田信生、1980：マイクロコンピュータを地震観測に応用する試みについて、験震時報、45、9-27。
- 市川政治、1980：地震記録自動処理装置、験震時報、44、55-74。
- 市川政治、1981：地震資料伝送網、測候時報、48、17-27。
- 地震観測所、1979：ASRO 地震観測システムについて、験震時報、44、31-39。
- 地震観測所、1984：松代群列地震観測システムの概要、測候時報、51、195-239。
- 山岸 登、関 彰、柏原静雄、1980：石英管式ひずみ計の改良更新について、地震観測所技術報告、1、43-47。
- 山岸 登、柏原静雄、1981：ひずみ地震計改良更新の現況と観測結果について、地震観測所技術報告、2、25-56。
- Goforth, T. and E. Herrin, 1981 : An automatic seismic signal detection algorithm based on the Walsh transform. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1351-1360.

4.3 地殻変動観測データの補間方法*

地殻変動観測では、通信回線のノイズ、タイムマーク、テープの交換など様々な原因によって、1時間程度またはそれより短い欠測がよく生じる。このような短時間の欠測の場合は、その前後の値が正常であり、補間しておくことが多い。欠測の状況によっては、正常な値が必ずしも等間隔にならないことを配慮して、「地震活動総合監視システム」では、基本的に多項式による補間（ラグランジェの補間法）を使用している。

補間を行うまでに、データ処理の中間成果として、10分間平均のデータが得られており、障害等で生じた異常値は、データをディスプレイに表示して、マニュアル操作ですでに削除されている。欠測となった10分間値 $Y(X_k)$ を次の計算式で補間している。

$$Y(X_k) = \sum_{j=1}^n Y(X_j) \frac{(X_k - X_0) \cdots (X_k - X_{j-1})(X_k - X_{j+1}) \cdots (X_k - X_n)}{(X_j - X_0) \cdots (X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1}) \cdots (X_j - X_n)}$$

計算で使用するデータ (X_j, Y_j) は求める時刻の前後60分ずつの間に得られた正常な観測値（12個以内）であるが、補間の精度を保つために、正常な値が半分（6個）未満の場合や、6個でも片側のみの場合は欠測とし、補間しない。データ収録のテープを交換すると、1時間欠測となるが、前後が正常であれば補間条件を満たすので、上式で計算した値を採用することになる。しかし、それ以上に欠測が続くときなどはデータを補充せず、欠測として処理される。

* 岡田正実：地震火山研究部

ラグランジェの補間法は、 (X_j, Y_j) に誤差が含まれないことを前提としており、観測値の分布によっては推定誤差が異常に拡大し、不自然な値が求まることがあり得る。実際のデータ処理にもまれに異常な推定値が現われた。このような問題を避けるために、前後の観測値の標準偏差から見て、異常に離れた推定値は採用せずに、直線補間の値を用いた。安定した補間値を得るためには、最小2乗法によって適当な回帰曲線（例えば2次式）を求め、欠測部分を補間することも考えられる。この方法は計算量が増えるので採用しなかったが、自動化のために今後検討する必要がある。

今回のデータ処理（2.4節）では主に60分以内の欠測に対して補間を行っているが、それより長く欠測が継続した場合にも、長時間の傾向などをみるために、データを補間する必要性が生じ得る。潮汐の影響をほとんど受けない要素（例えばラドン濃度や地下水位）については、毎時値または1時間平均値を用いて数時間以内の欠測を上述の方法などによって補間することは可能であろう。潮汐をかなり含むもの（例えば傾斜、潮位差）は、天文潮を除いてから適当な方法で補間し、天文潮の分を加えるのが適当である。そのためには傾斜等についても潮汐調和分解を行い、天文潮の計算を実施する必要がある。いずれの場合も降雨などによって大きく変化している部分については十分注意する必要がある。

どの程度までの欠測を補間し、正常な観測値と同等に扱うかは、データの利用目的によって異なる。しかし、定常的なデータ処理においては、一定の基準を設けておくことも必要であろう。例えば、気象統計では、欠測が20%以下であれば平均値を算出することになっている。また、潮汐観測では、4時間以内の欠測で満干潮を含まない場合は、観測者が自記紙上で補間し、それを正常値とほぼ同等に扱っている。地震予知業務では、「2～3日以内の地震発生」を予測することが重要な柱となっているので、一応の目安として予測期間の10%程度、すなわち数時間以内であれば、「短時間」の欠測として扱うことができよう。そこで毎時値の欠測の場合には「5時間以内」が一つの目安と考えられる。

長期の傾向を見るために、移動平均がよく行われているが、欠測が含まれている部分は計算できない。このような場合には、ベイズ情報基準（ABIC）を用いた方法（Ishiguro, 1981）が適当である。この方法は次のような特徴がある。

- i) 極めて滑らかな平滑曲線が合理的に得られ、容易に変化速度を知ることができる。
- ii) 比較的長期の欠測が含まれていても、連続的な平滑値が得られる。
- iii) 観測期間の端まで平滑値が得られ、現状の把握に有効である。
- iv) 将来の予測値を得ることが可能である。
- v) 計算量は移動平均よりはるかに多い。

したがって、計算機の能力に余裕があり、この方法で平滑曲線を求める際は、あらかじめ欠測を補充する必要性はあまりない。

参 考 文 献

Ishiguro, M., 1981, A Bayesian approach to the analysis of the data of crustal movements. J. Geodetic Soc. Japan, 27, 256-262.