

津波予報の迅速化をめざして

——気象庁の津波予報・観測体制——

気象庁地震火山部地震津波監視課

補佐官 吉 田 弘

1. 地震と津波

地震は現在地球上でみられる大規模でかつ破壊的な現象の一つであり、我が国はこれまでくり返し地震により被害を蒙ってきた。特に日本列島の太平洋の沖合では大きな地震がくり返し起っており、これに伴って生じた津波によっても大きな災害を受けてきた(図1)。最近の130年間をみても、死者1000人以上を出した地震・津波災害は12回もある(表1)。軽微な被害まで含めると、被害地震はほぼ年に5~10回程の割合で発生している。

地震は地下深部の岩石の急激な破壊によって引き起こされる。この破壊は大きな割れ目に沿って両側の岩盤が激しくずれ動くいわゆる

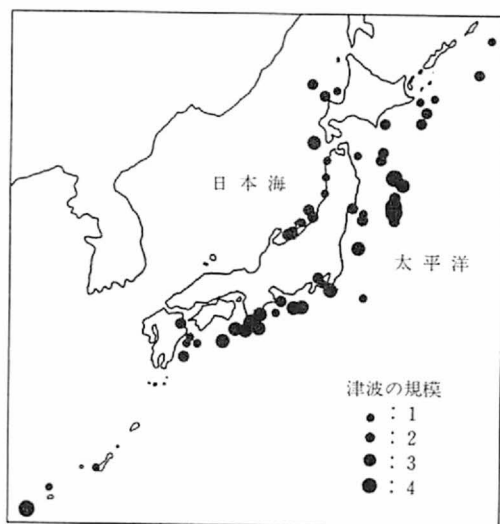


図1 津波を伴った地震の震央分布図

有史以来で、津波の規模が1以上のもの(理科年表による)。太平洋岸に沿って多くの津波が発生しています。

表1 主な地震災害(死者・行方不明1,000人以上, 1854~1984年)

年月日(西暦)(日本暦)	地 域	M	被 害 状 況
1854. 7. 9.(嘉永7. 6.15)	伊賀, 伊勢, 大和	6.9	上野, 四日市, 奈良, 大和郡山で死者1,144人以上, 壊家3,300~3,400
1854.12.24(嘉永7.11. 5) (安政1)	畿内, 東海, 東山, 北陸, 南海, 山陰, 山陽道	8.4	死者約3,000人, 家屋全壊20,000, 焼失6,000, 流失15,000(安政の南海地震)
1855.11.11(安政2.10. 2)	江 戸	6.9	死者4,000人余, 壊家焼失14,346
1891.10.28(明治24)	岐阜, 愛知	8.0	死者7,273人, 家屋全壊142,177(濃尾地震)
1896. 6.15(明治29)	三陸沖	8½	死者27,122人(一説22,000人)流失全半壊家屋8,891(三陸地震津波)
1923. 9. 1(大正12)	関東南部	7.9	死者99,331人, 行方不明43,476人, 家屋全壊128,266, 焼失家屋447,128(関東大地震)
1927. 3. 7(昭和2)	京都府北西部	7.3	死者2,952人, 家屋全壊12,584 焼失3,711(北丹後地震)
1933. 3. 3(昭和8)	三陸沖	8.1	死者3,008人, 家屋倒壊流失7,263(三陸地震津波)
1943. 9.10(昭和18)	鳥取市付近	7.2	死者1,083人, 家屋全壊7,485(鳥取地震)
1945. 1.13(昭和20)	愛知県南部	6.8	死者1,961人, 家屋全壊5,539(三河地震)
1946.12.21(昭和21)	紀伊半島沖	8.0	死者1,330人, 行方不明102人, 家屋全壊11,591, 流失1,451, 焼失2,598(南海道地震)
1948. 6.28(昭和23)	福井平野	7.1	死者3,895人, 家屋倒壊35,420, 焼失3,691(福井地震)

る断層の形成という形で起こる(図2)。この断層の生成時における衝撃は地震波として地中を伝わり、人々を驚かせ、時には災害をもたらす。

一方、海底の地下浅い所で大きな地震が起こると断層の運動により海底が隆起したり沈降したりする。この海底の変形による海水の変動を源として四方に広がっていく海の波が津波である(図3)。したがって、内陸部で起こった地震や地下深い所で起った地震では津波が発生することはない。また、マグニチュード(M)の小さな地震の場合も海底の変形は小さく津波は生じない。

津波の発生源はある広がりをもつ。この広がりを波源域という。波源域は各地の検潮所に津波が到達した時刻から津波の伝わる速さをもとに逆算して求めることができる(図4)。

これまでの統計によると地震のマグニチュードが大きい程波源域は広く、たとえばM8程度の地震では長径150kmくらいになる。したがって、震源、すなわち断層の破壊開始点が陸から遠い地震でも波源域は陸に近いところまで広がっていることもある。この場合には津波が意外に早く来襲することもある。地震が発生してから震源近くの海岸に津波が到達するまでの時間はいろいろであるが、我が国では数分から30分くらいの例が大部分である(表2)。

2. 津波予報

津波が海を伝わる速さは水深が深いほど速く、深さ100メートルで時速110キロメートル、深さ1000メートルで時速360キロメートルほどである(図5、表3)。

一方、地震波は秒速5~10キロメートルく

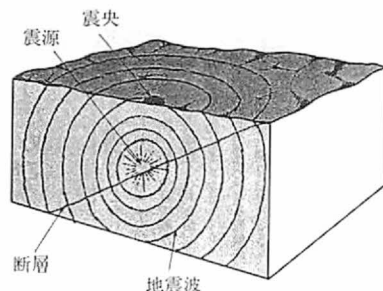


図2 震源と震央・震源の真上が、震央になります。

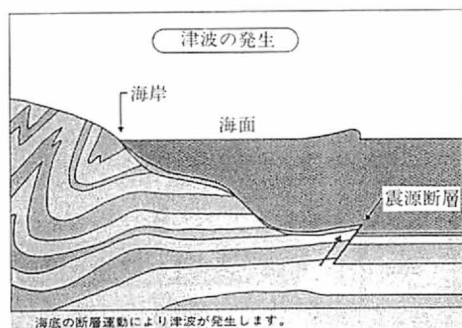


図3 津波の発生と来襲(模式図)

海底の断層運動により津波が発生します。

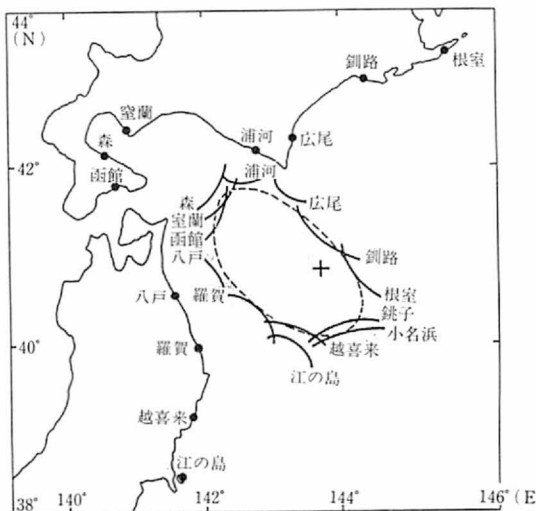


図4 津波の波源域の例(検潮所への到着時刻から求めたもの)

昭和43年の十勝沖地震(M7.9)の波源域(点線で囲まれた所)。多数の小さい円弧はそれぞれの検潮所から逆算して求めた波の出発点を示し、波源域を求めるために作図上記入した線です。

表2 津波が来るまでの時間

年 月 日	名 称	M	地震発生から津波来襲までの時間	津波の高さ	死者行方不明	備考
明治29(1896) 6.15	三陸地震津波	8½	約35分	岩手県吉浜24.4m	21,959名	※
昭和 8 (1933) 3. 3	三陸地震津波	8.1	約30分	岩手県綾里25.0m	3,008名	※
昭和19(1944)12. 7	東南海地震	7.9	約10分	熊野灘沿岸8~10m	1,321名	
昭和21(1946)12.21	南海道地震	8.0	約6分	高知、三重徳島沿岸4~6m	1,464名	
昭和35(1960) 5.23	チリ地震津波	8.5	約22時間	三陸沿岸5~6m 北海道南岸3~4m	139名	※
昭和36(1961) 2.27	日向灘の地震	7.0	約1分	油津0.5m 土佐清水	2名	
昭和58(1983) 5.26	日本海中部地震	7.7	約7分	秋田、青森沿岸6m以上	104名	

(注) 明治の三陸津波の死者数は理科年表による。この津波はわが国最悪の津波災害であった。昭和35年のチリ地震津波では表のほかに、沖縄で3人の死者があった。死者行方不明の数は地震動と津波を合わせたものであるが、※印は地震動による被害がなく、すべて津波によるものであった。

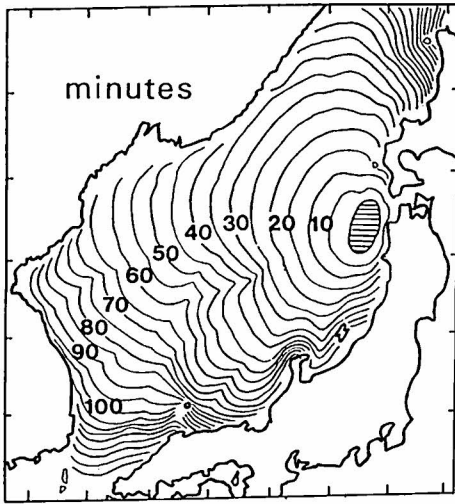


図5 津波伝搬図(日本海中部地震, M7.7, 昭和58年5月26日12時00分)

津波は地震後7分で深浦に、約40分後には佐渡に、約90分後には隠岐に達した。等値線の10, 20, ...の数字は地震後の経過時間(分)。津波は海の深い所ほど速く伝わって行く。斜線部が波源域。

表4 津波予報中枢と予報区

津波予報中枢	担当の津波予報区
札幌管区气象台	1区, 2区, 3区
仙台管区气象台	4区, 5区
気象庁本庁	6区, 7区, 8区, 9区, 10区
大阪管区气象台	11区, 12区, 13区, 14区, 15区
福岡管区气象台	16区, 17区
沖縄气象台	18区

表3 津波の速さ

水深	津波の速さ
100m	約110km/時
500	250
1,000	360
2,000	500
3,000	620
4,000	710

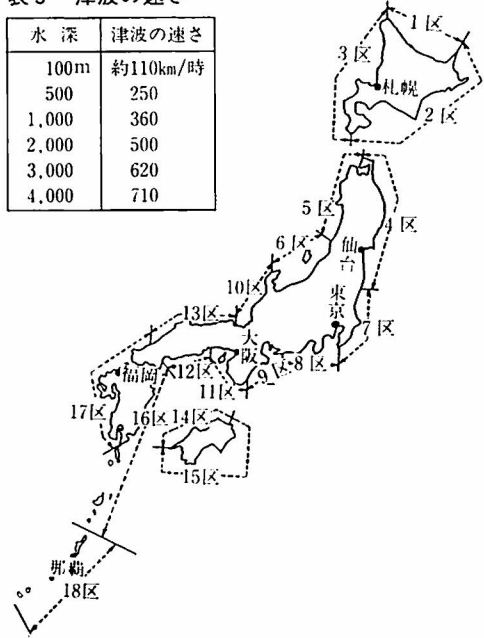


図6 津波予報中枢と津波予報区

津波予報は全国6か所の津波予報中枢と呼ばれる気象官署から発表される。予報の内容は18の津波予報区ごとに決められる。

津波予報は6箇所の津波予報中枢から18の予報区に対して発表される。図6参照。

らいであり、津波の百倍ほどの速さで地中を伝わるから、地震の観測をもとに迅速に震源、マグニチュードを求め、これらをもとに津波が来襲するより早く津波予報を行うことができる。

このような地震の観測に基づき津波予報を行う体制が整備されている。

現在、気象庁では気象庁本庁および札幌、仙台、大阪、福岡、沖縄の管区気象台等に津波予報中枢を置き、各々の担当海域を対象に津波予報を行っている（図6、表4）。

津波予報の内容は、全国を18に分けた区域及び各区域ごとに出す予報の種類（表5）とからなる。

「1」で述べたように津波予報の基幹をなす地震観測については図7に示すように各地震計からの信号がNTT回線により4800 BPSの伝

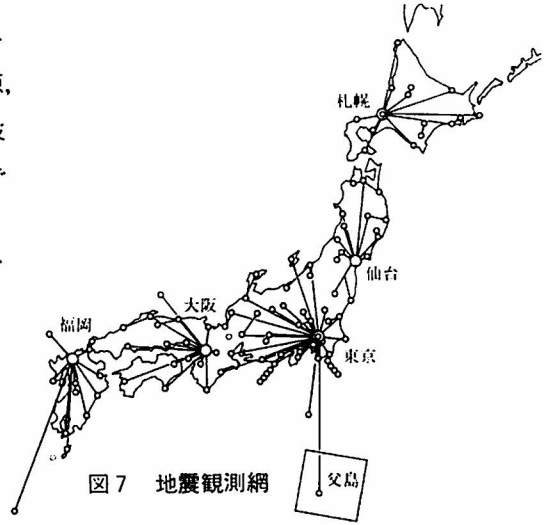


図7 地震観測網

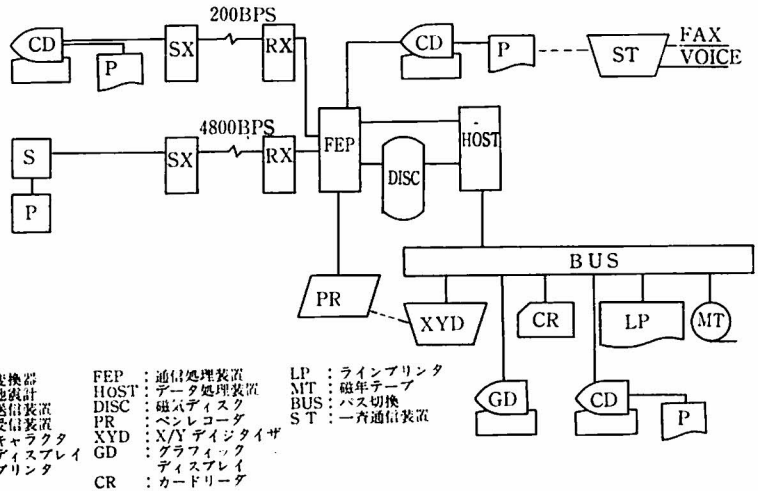


図8 L-ADESS のシステム概要

表5 津波予報の種類

予報の種類	予報略文	予報文
津波注意報	ツナミナシ	津波の来襲するおそれはありません。
	ツナミチュウイ	津波があるかも知れません。津波の高さは高いところでも数十センチメートル程度の見込みです。
	ツナミチュウイカイジョ	津波の心配はなくなりました。
	ツナミケイホウカイジョ	津波の危険はなくなりました。
津波警報	ツナミ	津波が予想されます。予想される津波の高さは、高いところで約2メートルに達する見込みですから、特に津波が大きくなりやすいところでは警戒を要します。その他のところでは数十センチメートル程度の見込みです。
	オオツナミ	大津波が来襲します。予想される津波の高さは、高いところで約3メートル以上に達する見込みですから、今までに津波の被害を受けたようなところや、特に津波が大きくなりやすいところでは、嚴重な警戒を要します。その他のところも1メートルぐらいに達する見込みですから警戒が必要です。

送速度で各津波予報中枢にテレメータで集中されている。この信号は各中枢のL/ADESS (L/A: Local Automated Data Acquisition and Switching System コンピュータ制御のデータ処理・通信システム) で対話方式によるマン/マシンシステムで処理される(図8)。

テレメータ集中されている各地震観測点からの信号について、L/AのFEPで地震の信号がノイズからの識別処理をソフト的に常に行い、地震の信号と判断されるとそのデータは、熱ペンレコーダに可視記録として出力される。

中枢の当番者は、津波予報のプログラムを起動させこの可視記録をもとにX/Yディジタイザにより各地震記録を読みとり、その

値(P波の到着時刻、P-S時間、最大振幅)をHOSTに入力する。当番者はプログラムに従って対話処理しながら、震源(緯度、経度、深さ)とマグニチュードを求める。このとき、地方気象台、測候所からNTT回線により200BPSで伝送されてきた震度等のデータも自動的に取り込まれ処理される。

震源決定の結果、海域の地下浅い所の地震でかつマグニチュードが大きいと分ったら津波判定の作業に進む。ディスプレイの画面に「津波予報図」という津波判定のための図が表示される。当番者はこの図や震央位置などをよく検討し、また過去の事例等も考慮し津波予報区と予報内容を決定し、キーボードから入力することにより予報文が自動的に作成

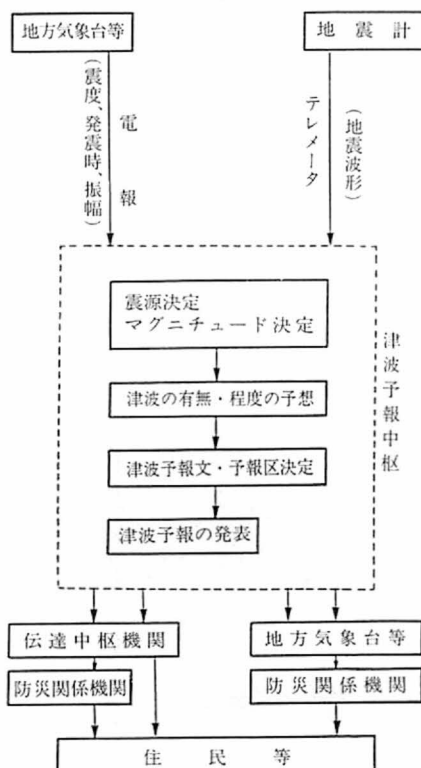


図9 津波予報までのフロー図

地震が発生すると津波予報中枢では震源計算等の緊急作業を行い、津波予報を関係機関に伝達する。

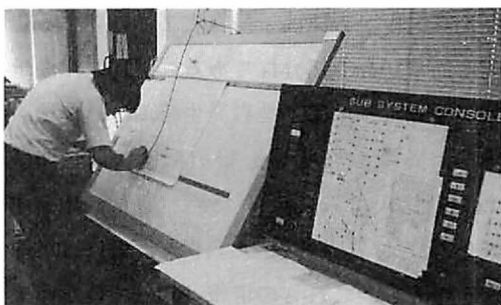


写真1 地震記録の読み取り作業

ペンレコーダの記録紙を切り取って、このXYリーダにはりつけ、地震波の到達時刻や振幅を読み取り、コンピュータに入力する。



写真2 コンピュータの端末

津波予報中枢の当番者はこの端末からコンピュータを操作し、ブラウン管と対話しながら震源決定や津波判定の作業を行う。この端末でキーを押すと、津波予報が各地の気象官署に伝えられる。

される。内容を確認し発表のキーを押すと津波予報文が各地の気象官署へ自動的に伝送される(図9, 写真1, 2)。

またこの予報は、中枢の通報担当者に伝えられ、そこから同時送話(送画)装置、専用電話等により伝達中枢機関に伝えられる。この際、通知者と受領者の氏名を相互に確認することになっている(写真3)。

通知を受けたNHKは直ちに放送を行う(津波警報の場合は、EWS(緊急警報放送システム)により放送)。警察とNTTは市町村に伝える。市町村は防災行政無線、広報車、サイレン等を用いて沿岸の住民に津波予報を周知する。また海上保安庁は船舶などに伝える。

地震発生から津波予報発表までに要する時間は通常10分~15分程である(図10)。津波予報の発表に続いて、地震発生時刻、震源地、規模、各地の震度等を報道機関、防災関係機関や住民に知らせるため、通常「地震津波情報」が発表される(津波予報には迅速性を優先し、これらの情報は入っていない)。

津波の伝播にともなって、津波は沿岸に到達する。沿岸の官署では検潮儀による津波の観測を実施しており、これらの官署から津波の山・谷の時刻や潮位のデータが200BPSの電報で次々と津波予報中枢に入電してくる。また、いくつかの官署の検潮記録はテレメータされ中枢でモニタされている(図11)。中枢の当番者はこれらのデータをグラフにプロットし、津波の推移を監視する。他の津波予報中枢と密接に連絡をとり合い、地震津波情報等を次々と発表していく。津波を発生させるような地震はかなりの規模のもので、余震も数多く発生する。中枢ではこれらの余震の震

源決定もしなければならず、地震発生からの一連の作業は多忙をきわめる。

津波の振幅が小さくなり、津波による被害の心配がなくなってきたらツナミケイホウカイジョ又はツナミチュウイホウカイジョの津波注意報を発表する。解除の注意報も最初の発表と同じ経路を経て関係機関や住民に伝えられる。津波予報が解除されるまでの時間は通常数時間である。しかし、津波の状況によっては解除まで長時間を要することがある。たとえば、日本海中部地震(昭和58年)の場合では解除までに9時間を要した。

昭和27年から61年末までに津波警報は51回発表されており、平均すると概ね年に1.5回の割合になる(表6)。またツナミチュウイは概ね年2回強の割合となる。

3. 地震活動等総合監視システム

昭和58年の日本海中部地震を契機に津波に

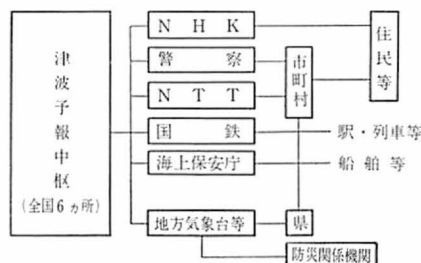


図10 津波警報の伝達経路(概略)



写真3 同時送話装置

津波予報や地震情報はこのような装置から一斉に音声やFAXで関係機関に伝えられる。このほか、専用電話やテレタイプ等も使われている。

対する国民の関心は非常に高まり、特に気象庁の津波予報発表の迅速化が社会的に問われることになった（この地震では14分後に東北地方の日本海沿岸にオオツナミの警報を発表したが、津波により100名の死者が出た）。

この後、気象庁では現行の津波予報業務全般の見直しを行い、発表時間の短縮に努めてきた。しかし、これまで述べた様に現行のプログラムでは、熱ペンレコーダの記録紙をX/Y デジタイザに貼り、手作業により地

表6 津波予報をした地震の回数

年	津波警報
1952昭和27(4月より)	1回
1953 28	1
1954 29	0
1955 30	0
1956 31	1
1957 32	0
1958 33	1
1959 34	0
1960 35	4
1961 36	4
1962 37	3
1963 38	1
1964 39	3
1965 40	2
1966 41	1
1967 42	0
1968 43	4
1969 44	2
1970 45	1
1971 46	2
1972 47	1
1973 48	3
1974 49	0
1975 50	2
1976 51	2
1977 52(1月まで)	0
期間 25 年間	計39

年	津波警報	ツナミ子報
1977昭和52(2月より)	0	0
1978 53	5	4
1979 54	0	0
1980 55	1	2
1981 56	1	1
1982 57	1	3
1983 58	2	3
1984 59	2	3
1985 60	0	3
1986 61	0	3
期間 10 年間	計12	計22

(注) 1 一つの地震に対し発表された子報の内、最高位のものと数えた。例えば、ツナミ子報中継から発表された場合はツナミとして数えた。
2 昭和52年1月までは、津波警報はオオツナミ、ヨワイツナミ、ツナミオソの3種であった。現在はオオツナミとツナミである。また、ツナミ子報は昭和52年2月から設けられたものである。

震記録の読み取りを行い、データを計算機に入力しマン/マシン方式による対話処理で震源等を求めている。人間を介在させてのこのような震源決定方式では迅速化を考えたとき技術的にはほぼ限界にきており、より一層の迅速化には抜本的な対策が必要となってきた。

気象庁では昭和60、61年度の2ケ年にわたり、「地震活動等総合監視システム」の整備を進め、62年3月から稼働の運びとなった。

本システムは、大地震時に震源・規模等を短時間に求めることと余震頻発時等の急激なデータの急増に対処するため、地震波形をARモデル(自己回帰モデル)で表わし、統計的決定法(AIC 赤池の情報量規準)による客観的な自動読み取り、自動震源決定方式を採用している。この方式により、津波予報のより一層の迅速化、地震活動推移のリアルタイムでの監視ができるようになってきた。また、津波の発生が予想される場合は、津波の到達予想時刻の計算、検潮データの解析等を行い、よりの確な津波の予測及び実況把握を行う。これらの結果は、システムとの対話処理でディスプレイ上に各種情報として作成し発表し

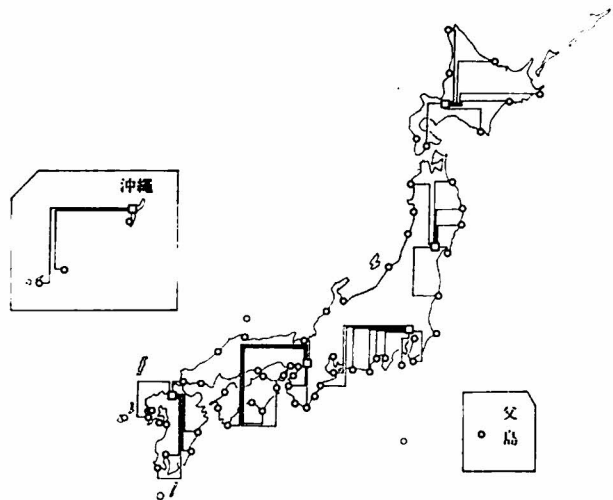


図11 検潮観測網

ていく。

このシステムの概要を図12に示す。またこのシステムでは、従来手作業により整理していた多くのデータが自動処理及びマン/マシンで処理・出力されるので、前述の情報発表等の作業は非常に効率的に行なわれるようになる。これらのシステムの概要を写真4に示す。

また、このシステムは津波予報の迅速化とともに東海地震の予知のための常時監視機能の飛躍的な強化というもう一つの重要な機能を担っている。

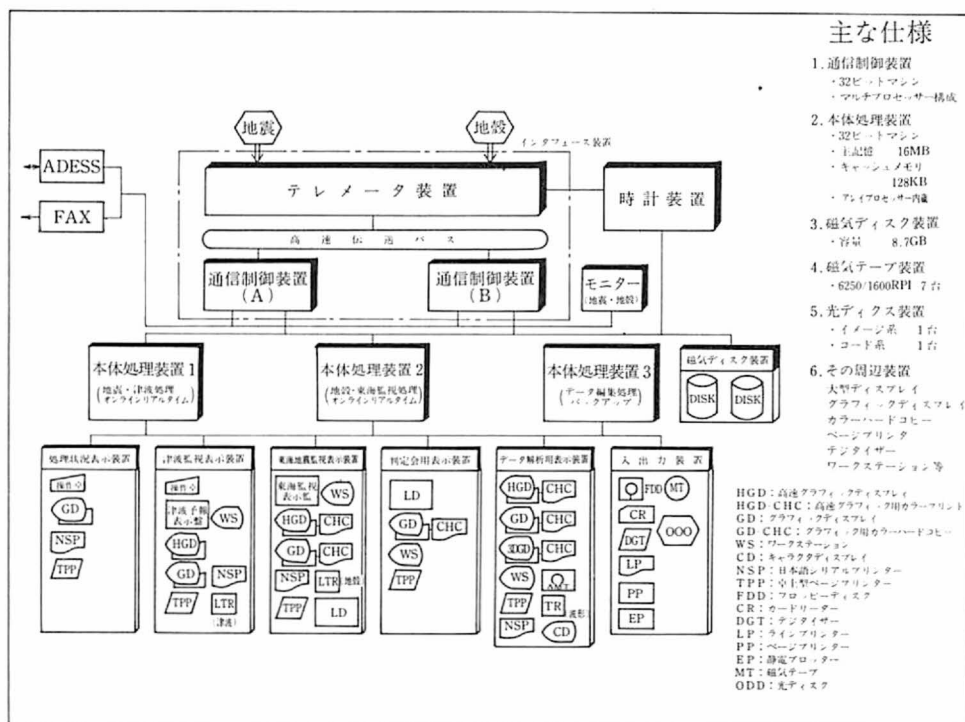
このため、東海地域とその周辺に発生する微小地震クラスまでの地震活動の監視に加え、歪・傾斜・伸縮等の地殻変動データを



写真4 総合監視システム

リアルタイムで処理し、総合的に観測データの異常検出機能の大幅な向上が図られている。

このシステムの本格的な稼働により、本庁担当分のみではあるが、津波予報の迅速化、地震情報等各種情報サービスの大幅な向上が期待される。



第12図 地震活動等総合監視システムの概要