

# 第1章 ま え が き\*

## 1. 開発の背景と意義

### 1.1 震源過程論からの要請

1966年6月27日20時36分(現地時間), 米国カリフォルニアの San Andreas 断層が, 高まりくる応力に耐えきれなくなって動き, マグニチュード5.6の地震(Parkfield地震)が発生した。U. S. Coast and Geodetic Survey と California Department of Water Resources とによる強震観測アレイの内, Station 2 は, その1年ほど前から稼動を始めていたが, 地表にあらわれた断層の痕跡からわずか80mの所に位置していて断層の走向に直交する水平成分は, 重力加速度の50%にもおよぶ大加速度を記録した。また断層から5.5 km離れた観測点でも重力加速度の40%を上まわる加速度が観測された(Cloud and Perez, 1967)。Housner and Trifunac (1967) はこれらの加速度記録を数値積分して速度波形および変位波形を得た。その結果, Station 2 における最大速度は70cm/s, 最大変位は20cmを上まわる値が得られている。特に, 変位波形は印象的で, 幅2秒ほどのパルス状を呈している。これらの“波形”は, 並行して発展してきた“地震の断層モデル”とあいまって, 震源過程論に大きな進歩をもたらすきかけとなった。

すなわち, Aki (1968) は Maruyama (1963) により定式化された弾性転位の考え方にもとづき, また Haskell (1969) もこれとは独立に DeHoop (1958) により確立された数学的基礎に立ち, Station 2 で観測された波形は次のような震源過程を仮定すると, うまく説明できると述べた。すなわち, その震源過程というのは水平の幅37km, 深さ3kmの鉛直断層の一端から, 右横ずれのくいちがい(dislocation)がライズタイム0.3秒で生じ始め, それが2.2 km/sの速さで他端にむけて水平方向に進行し, 断層の両側のくいちがい量は最終的に60~90cmに達したというものである。二人のモデルにもとづく理論波形はいずれも観測波形と満足すべき一致を見ている。従ってこれらの仮定は震源過程の第一近似として妥当なものと思なされた。

このように, ある地震について, 断層の長さ, 幅, 走向, 傾斜角, くいちがいの大きさと方向, ライズタイム, くいちがいの出発点, くいちがいの進行速度等を仮定して理論地震記象をもとめ, それと, 実際に観測された記象とを比較して震源過程の第一近似をもとめるという研究は, その後も, 近地の強震記象のみならず遠地の長周期記象をも用いて行われてきた。それらの研究は川崎(1976)やLay et al. (1982)によってリストされているが, 例えば, 1923年の関東地震について Kanamori (1971) や Matsu'ura et al. (1980), 1931年西埼玉地震について Abe (1974), 1943年鳥取地震について Kanamori (1972), 1971年 San Fernando 地震について Heaton and Hembarger (1979), 1978年伊豆大島近海の地震について Shimazaki and Somerville (1979) 等があげられる。勿論, これらの研究の進捗は, Sato (1972, 1973a, b, 1975), 川崎ら(1972a, b)

---

\* 執筆担当 高橋道夫

による理論地震記象の計算方法の進歩に支えられている。

ある程度大きな地震による近地の地震動の波形を記録するという事は、地震の本質の解明を目的とする震源過程論において、上に述べたように大きな意義が認められる。われわれが本稿で述べる強震計の性能は、そのような目的に合致するものでなければならない。いままでの気象庁による強震計は、はたして、この目的に十分合致していたであろうか。

中央気象台は1927年から強震観測網の整備を開始し、更に津波予報業務に利用するため1951年からこの観測網を一層充実させ始めた(50~52型強震計)。観測点は1959年には106ヶ所に達し(飯沼, 1973), 現在, 114ヶ所にのぼっている(第4章1節参照)。この強震計は機械式で、振子の相対的な動きをペンに伝え、記録紙上に可視記録を得るもので、倍率1倍の変位比例記録が得られる。振子の固有周期が5~6秒(水平動成分は6秒, 上下動成分は5秒)なので、主としてそれ以下の周期帯域をカバーしている。この強震計は $3\text{cm}^{0-P}$ を越える振幅で飽和してしまうだけでなく、気象庁震度5の地震動にさらされると復旧不可能な障害が発生することもある。そこまで致らないまでも $30\text{mm}/\text{min}$ という紙送り速度では高周波地震動の“波形”に関する情報は、はじめから望むべくもない。このような点を指摘されながらもこの強震記象はそれなりに活用されてきた。ところが最近の地震学の進歩はこの事情を変えつつある(渡辺, 1981)。例えば、カバーすべき周期帯域について考えると、 $10^1\sim 10^2\text{km}$ の代表的な長さをもつ断層が、 $\text{数km}/\text{s}$ の速さで伝播するくいちがひによって生成される場合を考えてみる。現象が始まってから終了するまで10ないし数10秒の時間を要するが、その時間を一周期とする地動までもカバーする特性の記録なくしては、その断層の全体像を把握することは不可能である。その他、カバーすべき周期帯域の下限、振幅範囲の適切な上限等については第2章1節で詳しく論じる。

測地学審議会も、第4次地震予知5ヶ年計画(1979-83)として、大・中・小地震観測を担当する気象庁に対して、地震現象解明のために大地震の完全記録を目的とする強震計を開発整備することを建議した。

## 1.2 津波予測技術からの要請

気象庁は津波の波高を予報するという重大な責任を負っている。その業務の基礎となる津波波高の予測技術からの要請も、次のように見られる。すなわち、1975年6月10日22時47分頃、北海道東方沖に発生した地震は、強震計の記録から、あるいは震度分布から推定される規模は余り大きいものではないにもかかわらず、花咲において93cmにも及ぶ津波を記録した。これと対照的に、その地震の最大余震である14日03時08分頃の地震は、本震よりも、強震計の記録も、また震度も大きいにもかかわらず、津波は全く記録されていない。長宗、中礼(1976)はこの違いを調べるため、札幌および松代のそれぞれ短、長周期地震計の記録をスペクトル解析した。その周期別の相対振幅をみると、10秒を境として短周期側では余震の方のレベルが高く、長周期側ではこの関係は逆転してい

て、20秒で2.5倍、100～200秒で数倍～10倍の差が認められる。この例のように、津波の大きさは周期20秒以上の長周期の波の振幅と密接に関係していると考えられる。この意味において、50秒まで帯域ののびた地震計は津波の大きさの予測において、非常に有効である。

津波予報の精度の向上ということが唱えられて久しい。そのためには、震源の位置をすみやかに、かつ正確に決定して、その地震が海域の浅い所に発生したかどうかを判定できるようなシステムが不可欠であることは論をまたないが、この点についての検討はこの報告書のテーマの範囲を逸脱するのでふれない。ここでは測器の面から、気象庁における現在の津波波高の予測技術を検討してみる。津波の波高は上で述べたように、長周期の地震波の振幅と密接な関連がある。しかし、長周期波形を提供できる地震計は豊富にはなく、予測技術に直接的に結びつく具体的な研究の進捗ははかばかしくないのが現状である。現用の強震計が設計された1950年頃の技術レベルでは温度変化に起因する振子のドリフトを防ぐための特別の工夫も考案されていなかった。このため、振子の固有周期を長くすればするほど保守に手間どるため6秒という固有周期が業務用の地震計としての限界の性能であったと考えられる。また減衰にしても、慣性モーメントの大きい振子に大きな減衰を与えることは容易ではなく、減衰定数0.5に甘んじていたものであろう。ところが、この報告書で述べる新しい強震計によると、長周期の波形を記録することが可能になる。その時、どんな特性の記録が波高予測のためにふさわしいであろうか。

現在の津波波高の予測技術は固有周期6秒、減衰定数0.5の特性の記録にもとづいて次の手順で行われる。(1)震央距離と最大記録振幅との関係をプロットして津波の有無、波高を一定の方法で推定する。(2)プロットが、津波があるかないか、大きい小さいか、の臨界におちた場合には、あるいはそうでなくても、現場の技術者は強震計の記録波形を観察する。強震計の特性から、例えば周期20秒の波は1/10以下の振幅になってしまっている。従って、記象紙を斜めにもって調べても、長周期の波は短周期の波にじゃまされてうまく見えないことも多いであろう。それでも、記録に始終接してきた“経験”にもとづき最終的に津波の波高を予測しなければならない。この“経験”の内容を理論および観測の両面から解析し定式化することが津波予測技術の発展をもたらす。このように考えると、その技術の発展のための最も正統な進み方は、当面は現用強震計と全く等しい特性の記録で業務を遂行しながら一方では強震動に関する可能な限りの沢山の情報をもりこんだ記録を蓄積し、後者の記録を解析することにより調査・研究を進めていく方法である。しかし、この正統な方法では記録の蓄積に多くの時間がかかり、津波予報精度の向上という緊急性のある課題の解決にはふさわしくない。

正統ではないが応急的な進み方として次のような方法が考えられる。それは、先に述べた予測技術の手順(1)における震央距離—最大振幅のプロット結果に重大な影響を及ぼさない範囲で長周期側の感度を上げるという方法である。これは手順(2)における波形の観察において現場の技術者の“経験”に依存している部分の作業を大いに助けるものとなる。冒頭に述べた1975年6月10日と14日

の極端に性質の異なる2つの地震の場合でも20秒以上の周期の成分の振幅が読みとれるならば、両者のちがいは記録上に明瞭に現れると期待できる。具体的に言うと、6秒以上の帯域における感度を現用のものより2~3倍上げるとか、あるいは6秒以上の帯域を加速度比例でなく速度比例とするとかが考えられる。後者の場合、長周期側の感度は20秒において約3倍、50秒では約8倍上ることになる。短周期の成分はシャ断するのほひとつの方法であろう。どんな方法が最適かは更に詳しく検討されなければならない。必要な特性の実現方法については第2章2.3節で述べるが、これについては電子回路を適切に応用すれば難しい問題はない。

### 1.3 地震工学からの要請

強震計に対する地震工学からの要請も、年々切実さを増している。強震計委員会により開発された加速度型強震計(SMAC型)は1953年から、建築物、橋梁、ダム、港湾施設などの各種構造物に設置されだし始め、そして1964年新潟地震を契機としてその整備が急である。1980年末には台数1259を数えるに至った。これらは地盤上に設置されているものも少なくないが、主に前述の構造物に設置されていて、その地震応答の観測を通じて耐震設計に必要な基礎データを取得するという工学的な性格の強いものである。ところが最近の構造物の長大化にともない、この強震計の性能に十分な点が目立ちはじめた。刻時精度の悪いこと、初動部分の記録が得られないこと、等がそれであるが、なかでも最も本質的な問題は、この強震計のカバーする周波数帯域および振幅範囲(Dynamic range)が狭いという点である。これはなにも我が国だけの問題ではなく、1977年1月にインドのニューデリーで開かれた国際地震工学会(IAEE)主催の第6回世界地震工学会議においても、高性能の強震計による高密度の強震観測を推進することが必要であるとの認識が得られた。そして翌1978年5月、国際地震工学会の主催、国際連合教育科学文化機関(UNESCO)、国際地震学地球内部物理学協会(IASPEI)等の後援のもとに国際会議 International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays がハワイで開かれた(Iwan, 1978)。この会議の内容は三雲(1978)の報告にも詳しく書かれている。この中で、望ましい強震計の特性として、加速度比例で帯域は0.1~30 Hz、振幅範囲は2mGal~2g、刻時精度0.01秒と述べられている。この討論をうけて日本学術会議は第79回総会の議決にもとづき、高性能の強震計による高密度強震観測を推進すべきであると、政府に勧告している(1980年5月)。なお、この地震工学的な強震観測は、これを密に配置することにより、i)地震の発生機構および地震波の伝播機構解明、並びに ii)地震動に及ぼす局地的な地形・地盤条件の影響解明、を目的としている。

われわれは、この、震源過程の解明あるいは津波の波高の予測に視点をのこした強震計の開発に際しても、地震工学的な側面を見すごすことのないように留意した。

## 2. 開発研究の経過

前節で述べたように、国内・外で強震観測の必要性が強調されてゆく中での、われわれの開発研究の経過を以下に述べる。

第3次地震予知5ケ年計画の4年目の1977年12月、第85回地震火山談話会（気象庁地震課主催）の席で末広（観測部参事官、当時）から、その頃検討中であった第4次地震予知5ケ年計画の案に対する説明のための講演があった。当然、大地震の短期予知に向けての体制づくりが話の中心であったが、関連した測器の更新という形で、もう30年近くも経過した強震計がとりあげられた。これと前後して地震課から、最大級の強震動下においても解析に耐えられる記録を得ることのできる強震計を第4次計画で開発してほしい旨、要望された。

一方、学会における動向には、1977年5月、東京で開かれた地震学会において村松により、地震学的な目的の速度型強震計を製作し実用化した、という話（村松、1977）もあり、また1978年1月には少なからぬ被害をともなった伊豆大島近海の地震（ $M_J: 7.0$ ）の発生により、大島、石廊崎、横浜、網代の強震計が振り切れた（市川ら、1978）ことなどから、最大級の強震下でも忠実な記録のとれる、地震学的な目的にあった強震計が、あらためて望まれた。

その後、強震計のあるべき姿について机上の検討を経て目標とする性能を定め、その性能を達成すべく二・三の変換器を入手して実験観測も手がけた。1978年7月の地震火山研究部の談話会における、目標仕様の討論、変換方式の中間報告、記録・処理方式の提案を経て、10月には第94回地震火山談話会において「新強震計の設計」というタイトルで講演発表を行った。その時の主な内容は次のとおりである。

i) 出力は変位比例型と速度比例型の二本だてとし、前者は現用の強震計と等しい周波数特性、倍率を踏襲し、可視記録として出力する。後者は $1/50\sim 20$  Hzの帯域とし、 $100\text{cm}^{0-P}/\text{s}$ までの振幅をカバーする。

ii) 変位比例出力の水平二成分の合成最大振幅を表示する機能をもたせる。表示は $100\text{cm}^{0-P}$ までを考えている。この場合、可視記録が飽和しても表示だけは有効となるように設計する。

iii) 速度比例の成分の記録はトリガー式とする。記録媒体はふれ幅の大きな可視記録にするか、デジタル磁気テープにするか、決定を保留する。

iv) 変換器の方式は4通りほど考えられるが、いずれが最適か、検討を続ける。50秒まで帯域ののびた強震計を用いれば、1975年6月10日と14日に北海道東方沖に発生した二つの地震のような場合でも、津波予報は成功するだろうということも、長宗、中礼（1976）を引用してつけ加えて話した。この講演に対して、記録媒体としての磁気テープは、故障が多いという理由から、使わない方がよいという意見が出された。これは主に67型地震計を扱った経験およびアメダスの開発試験結果にもとづく意見である。

その第94回地震火山談話会の1ヶ月ほど前の1978年9月17日、イランに $M_s = 7.4$ の地震が発生

した。強震計にふさわしい変換器を模索して実験観測を行っていた筆者らは、この地震の表面波の記録に成功し、±2 gまで測れるある加速度センサー（強震計変換器の一候補）が、0.15mGal<sup>0-P</sup>の低レベルの信号も分解できることを見出した（高橋，1981）。これにより、振幅範囲に関する目標仕様は、変換器に関する限りは達成が可能であるとの確信が得られた（最終的には、この変換器を採用している）。また同年12月23日に台湾付近で発生した地震の記録にも成功し、他の種類の加速度センサーも、分解能の点では目標に到達できることが確認された。

さて、翌1979年1月、「高性能強震計の開発試作にあたって」と題して、その年の4月から、本格的に発足する予定の計画に対して、ユーザー代表としての地震課の要望を聞くべく、集りをもった。地震火山研究部からは田（部長，当時）、高橋（研究官）が、地震課からは15名ほどが出席した。この時点で、われわれの提案の内、第94回地震火山談話会における主旨と変わった点は、速度比例出力をカセット式デジタル磁気テープに記録するという方針を明瞭にうちだした点と、加速度比例出力も、記録装置は用意しないが、出力可能とした点、それに磁気テープの再生・処理にはマイコンを主体とした、いわゆるパーソナル・コンピュータを利用し、同時に汎用ミニコンでも直接処理可能な形態とするという点、の3点である。なお、この加速度比例出力は後の仙台における試験観測において効果を発揮した。この席では活発な意見が交換された。なかでも前もって配布された竹山（地震課調査官，当時）による私案は、後々までも、われわれの開発における参考になっている。その中で特に注目に値する点は、津波予報の精度向上のためには長周期波が有効であるとの認識に立ち、震度3相当以上の地震を対象に長周期波形の可視記録を出力すべきである、とした点である。この席でかわされた討論の主な点を以下に述べる。

i) 1979年度から3ヶ年計画で開発・試作された強震計は1982年度から地震課が全国に業務展開する計画である。

ii) 変換器については数種類の候補を対象に地震火山研究部で評価実験を行う。

iii) 可視記録の耐震性も十分に評価する。

iv) ある一方向だけでも長周期成分を可視記録に出力すれば、津波有無の判定材料になる。そのため記録器についても検討を行う。

v) この強震計は現用品の代替品として、それと同等以上に機能しなければならない。特に、カセット式デジタル磁気テープ記録は、考えられる最大の強震動下においても、忠実な記録がとれなければ更新する意味がない。

vi) このデジタル記録の再生・処理には、なるべく多くの汎用計算機が使えることが望ましい。

vii) 保守の容易なように設計を行う必要がある。

viii) 停電対策は発動発電機が地震動で故障した場合でも、それが動きだすまでには2～3時間みっておけば十分であろう。

以上の討論を経て、地震火山研究部は細部設計に入り、それがほぼ完成した1979年9月、地震課

との間で2回目の集りをもった。この集りには地震火山研究部から飯沼(室長, 当時), 松本(主任研究官), 高橋(研究官)が, 地震課からは9名が出席した。この席へのわれわれの提案はほとんど, 現在できあがった強震計にもりこまれている。かわされた討論の内, 主な事項は次のとおりである。

i) 可視記録に自動利得制御(AGC)をかけて, 振幅範囲を拡大することの可否について検討を行う。

ii) カセット式デジタル磁気テープ記録は今までの強震計にはない, 特徴であり, 調査研究用として特に重要な装置である。

iii) 磁気テープに代る記録媒体としてROMあるいはバブルメモリ等の不揮発性固体メモリを採用できるか, 検討する。

iv) 製作した強震計に耐震性, 耐環境温度性能の評価を十分くわえる。

こうしていよいよ強震計の製作にとりかかり, 1980年3月には完成, 1981年3月までに耐震性, 耐環境温度性能(低温特性)の評価を終え, 満足すべき結果を得ている。1981年2月には科学技術庁主催の第6回防災科学技術研究連絡会で渡辺(地震課長, 当時)がこの強震計をとりあげ(渡辺, 1981), また4月には筆者らも地震学会で発表した(田ら, 1981)。いずれの講演においても, 50秒もの長周期までカバーする強震計を気象庁の地震観測網に展開するということへの反響は少なかつた。7月には地震学会と同様の主旨の講演を第125回地震火山談話会でも行った。試験観測は1980年3月の完成以来, 折をみて当所の観測棟で行っていたが, 1981年4月からは, これを本格的な実用化試験としてとりあげ, 9月24日, 25日のいずれも早朝, 首都圏をゆるがせた2つの地震を始めとする, 数個の強震動の観測に成功した。また磁気テープの再生・処理装置である, パーソナル・コンピュータに, 周辺装置としてXYプロッタ等の増強も行い, 処理プログラムの作成にも着手した。また, 1981年度にはカセット式デジタル磁気テープ記録器に, 前年に行った評価を補強する目的で $-15^{\circ}\text{C}$ にまで及ぶ低温環境にさらして, 特性を調べ, 十分耐えうるという結果を得た(田ら, 1982)。1982年6月には仙台湾区気象台からの要望により試験観測のために, 強震計一式を移管した。現在, 仙台湾区気象台で震度問題を含む独自の目的を併せ持って, 調査観測を続けている。

なお, 筆者らはこの強震計を開発研究の終了した1983年にちなんで, 83型強震計と命名する。

#### References

- Abe, K., 1974: Seismic displacement and ground motion near a fault: the Saitama Earthquake of September 21, 1931, J. Geophys. Res., 79, 4393-4399.
- Aki, K., 1968: Seismic displacements near a fault, J. Geophys. Res., 73, 5359-5376.
- Cloud, W. K., and V. Perez, 1967: Accelerograms-Parkfield Earthquake, Bull. Seis. Soc.

- Am., 57, 1179-1192.
- DeHoop, A. T., 1958: Representation theorems for the displacement in an elastic solid and their application to elastodynamic diffraction theory, Thesis, Technische Hogeschool, Delft.
- Haskell, N. A., 1969: Elastic displacement in the near-field of a propagating fault, Bull. Seis. Soc. Am., 59, 865-908.
- Heaton, T. H., and D. V. Helmberger, 1979: Generalized ray models of the San Fernando Earthquake, Bull. Seis. Soc. Am., 69, 1131-1341.
- Housner, G. W. and M. D. Trifunac, 1967: Analysis of accelerograms-Parkfield Earthquake, Bull. Seis. Soc. Am., 57, 1193-1220.
- Iwan, W. D., editor, 1978: Proceedings of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays. 10P.
- Kanamori, H., 1971: Faulting of the great Kanto Earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 49, 13-18.
- Kanamori, H., 1972: Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting, the Tottori Earthquake of 1943, Phys. Earth Planet. Interiors, 5, 426-434.
- Lay, T., H. Kanamori, and L. Ruff, 1982: The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, Earthq. Prediction Res., 1, 3-71.
- Maruyama, T., 1963: On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, Bull. Earthq. Res. Inst., 41, 467-486.
- Matsu'ura, M., T. Iwasaki, Y. Suzuki, and R. Sato, 1980: Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto Earthquake, J. Phys. Earth, 28, 119-143.
- Sato, R., 1972: Seismic Waves in the near field, J. Phys. Earth, 20, 357-375.
- Sato, R., 1973 a: Seismic waves due to a dislocation source model in a multi-layered medium, Part I. theory, J. Phys. Earth, 21, 155-172.
- Sato, R., 1973 b: Seismic waves due to a dislocation source model in a multi-layered medium, Part II. numerical calculations for a point source, J. Phys. Earth, 21, 401-414.
- Sato, R., 1975: Seismic waves due to a dislocation source model in a multi-layered medium, Part III. numerical calculations for a moving fault, J. Phys. Earth, 23, 289-309.
- Shimazaki, K., and P. Somerville, 1979: Static and dynamic parameters of the Izu-Oshima, Japan earthquake of January 14, 1978, Bull. Seis. Soc. Am., 69, 1343-1378.



参 考 文 献

- 田 望, 飯沼龍門, 松本英照, 高橋道夫, 1981: 気象庁用の新・強震計——その設計・試作・評価——, 地震学会昭和56年度春季大会予稿集, 167.
- 田 望, 飯沼龍門, 松本英照, 高橋道夫, 1982: デジタルカセットテープレコーダーの震動・温度特性について, 地震学会昭和57年度春季大会予稿集, 77.
- 市川政治編, 気象庁地震課, 石廊崎測候所, 大島測候所, 1978: 1978年1月14日伊豆大島近海の地震調査報告, 験震時報, 43, 21-57.
- 飯沼龍門, 1973: 気象庁の強震観測の歴史・現状と将来, 気象, 9月号, 3668-3670.
- 川崎一朗, 鈴木保典, 佐藤良輔, 1972 a: 半無限媒質中の断層によって生じる地震波(その1), 地震, II, 25, 207-217.
- 川崎一朗, 鈴木保典, 佐藤良輔, 1972 b: 半無限媒質中の断層によって生じる地震波(その2), 地震, II, 25, 333-342.
- 川崎一朗, 1976: 地震発生機構(震源モデル)について, 気象, 2月号, 4417-4423.
- 三雲 健, 1978: 高密度強震観測網に関する国際会議報告, 地震, II, 31, 471-472.
- 村松郁栄, 1977: 速度型強震計の製作, 地震, II, 30, 317-338.
- 長宗留男, 中礼正明, 1976: 1975(昭和50)年6月10日の北海道東方沖の地震の大きさと津波の規模, 験震時報, 40, 105-107.
- 高橋道夫, 1981: 強震観測のための変換器, 気象研究所研究報告, 32, 173-181.
- 渡辺偉夫, 1981: 現在開発中の高性能強震計について, 第6回防災科学技術連絡会予稿集, 25-26.