

(20) 今後必要な強震観測：中規模ないし大規模アレイの必要性

東京大学地震研究所 正会員 飯田 昌弘
〃 宮武 下隆
〃 島崎 邦彦

1. 序

1978年、ホノルルの国際強震地動高密度観測会議以後、¹⁾アレイ強震観測の重要性が広く意識されるようになってきている。アレイ観測の目的は多種多様であるが、アレイ観測は独立に設置された計器による複数の観測と比較して、きわめて多くの情報を得ることができるからである。しかし、わが国では、これまで地震学のための強震観測が行われていないこともあって、特にどのような中規模ないし大規模アレイ観測が効果的かに関する認識はほとんどない。

強震動推定にあたっては、震源や構造を明らかにすることは不可欠であるが、それは強震アレイ観測、それも中規模ないし大規模アレイ観測によるなければならない。東京大学地震研究所強震観測センターによる駿河湾・伊豆半島ネットワークをはじめとして、今後さらにアレイ強震観測が進められていくであろうか、今こそアレイ強震観測の目的や意義を明確にする必要があろう。また、アレイに対して期待できる限界を、前もって評価しておくことも必要であろう。つまり、必要な情報を明確にし、最小限の努力で最大の情報を得ようという戦略的発想をするべきだと思われるが、こうした試みはかつてなされていない。その結果節約された労力は、データの公表や整理に回されることが望ましい。

本研究では、目的を震源過程にしばり、必要な周期帯の地震動を把握するためには断層に対してどのようなアレイを組む必要があるか、ということを定量的に評価することを試みる。また、わが国のように周囲を海に囲まれている場合の海底強震計の必要性を明確にし、実現の可能性を検討することを行った。

2. 現在の強震観測の問題点

わが国では、1953年からSMAC型強震計が設置され、多くの貴重な強震記録が得られてきた。これらは、世界的にみてトップレベルにある、今日のわが国の耐震設計の基礎データとなっている。けれども、既存の千台を越える強震計は、地震学的に利用可能なネットワークとしては全く機能しない。こうした点につき、太田・岡田・後藤は²⁾諸外国と比較して、これほど工学偏重の観測と、多くの機関による強震計の分散管理は、わが国だけであると指摘している。このことは、データ公表がスムーズに行われにくいことにもつながりやすい。他方、最近の強震計は、ダイナミックレンジや周波数レンジが十分に確保され、絶対時刻がはいており、十分な性能をもっている。このように計器の性能が向上すると、計器の配置がそれだけ重要な意味をもってくる。別々の機関によって独立に設置された強震計でも、その配置が当を得ていれば、アレイとなりえるであろう。重複したむだな観測や、逆に観測の欠落がでてくることを防ぐには、わが国全体としてのアレイの配置計画が必要である。

それから、四方を海に囲まれたわが国の場合、震源が海底下であることが多い。微小地震の海底観測などは比較的以前から行われているが、海底における強震観測の必要性に関しては、現在まで全く議論されていない。この点は、陸上に配置されたアレイの効果がよびその限界を含めて検討されなければならない。さらに、海底での強震観測の必要性が大きい場合には、実際に海底に強震計を設置できるのかも検討される必要がある。これらの検討を以下で行おう。

3. 強震計アレイの機能評価のためのシミュレーション

ここでは、強震計アレイの機能評価を行うための基本的なシミュレーションを行う。アレイの目的は多様であるが、本研究では、最近の地震学の発展とその地震工学への寄与を考へ、特に重要と思われる震源過程の研究に目的としぼる。

3-1. 方法

震源過程の研究では、観測された地震波形から断層面上での各点の運動をインバージョンによって求める。もしあるアレイを使ってこの作業を精度よく行なえば、このアレイは震源過程の研究に適したアレイと言える。このことから、解の精度を用いてアレイを評価するのが適当と思われる。そこで、以下のような手続を行なう。①断層面を $M \times N$ の要素に分割し、その各々に振幅(変位量)と破壊時刻を与えらる。ただし、変位の時間間数の形は断層面上の各要素で同じとする。②半無限弾性体を仮定し、これによるアレイ各点でのS波を計算する。③この理論波形に以下の要因による誤差を加えた場合を考へる。すなわち、波形におけるノイズ、時刻精度の不確定さ、断層面の傾斜角、方位角、すべり角の不確定性である。こうして得られた波形から、断層面上の各要素ごとの振幅と破壊時刻およびその精度を求めるものであるが、これをモンテカルロ法で行なうのは計算量が膨大になり得る。ここでもしノイズが正規分布をすると仮定すれば、1回の計算で解の精度を評価することが可能である。この方法は微小地震観測網による検知率の見積りに使われており、観測点新設の効果などに大きく役だっている。本研究では、これを震源過程の推定に適用できるように改良してシミュレーションを行なう。

3-2. 計算例

ここでは、いくつかの例に基づいて、アレイの基本的なパラメータと得られた解の精度の関係を示し、必要とされるアレイの条件を示したい。アレイの基本的なパラメータとしては、次のようなものが考へられる。すなわち、計器の間隔、計器の数、想定断層からの距離、方位のカーブである。以下これらの要因が解の精度におよぼす影響について述べる。なお、長さ16 km、幅10 kmの垂直すべり断層(MG程度に相当)を想定し、長手方向に8、幅方向に2の計16個の要素に分割する。各要素の大きさは、長さ2 km、幅5 kmである。また、誤差の標準偏差として、変位波形のノイズに0.1 mm、傾斜角、方位角、すべり角にそれぞれ 10° 、データのサンプリング間隔に0.1または0.2秒を設定した。以下の図で、 σ_m は指定された変位量の標準偏差を与えた変位量で割った値である。なお、2つの曲線は上限値と下限値を示す。

(A) 計器の数：断層を中心とした半径50 km(断層長さの3倍程度)の円を考へ、その円周上に2~9個の地震計を配置させ、そのときの解の精度を調べた。結果を図-1に示す。少なくとも5点以上の観測点があれば精度よい解は求まらないこと、10点程度あればかなりの精度が期待できることがわかる。

(B) 断層との距離：ここでは図-2のような2重円のアレイ(地震計の数12)を考へ、断層面との距離Lの影響を調べた。結果は図-3のとおりである。断層面との距離が100 km(アレイ半径の2.5倍)を越えるあたりから、解の精度が急激に悪くなっている。つまり、比較的密ではあっても、1つのアレイだけで遠方の地震を解析するのは、震源過程の研究に限ってはいふ適当ではない。

(C) 計器の間隔：次に、図-4のように、中心に断層があるような配置の16点からなるアレイを考へた。解の精度は図-5のようになる。これを見れば、計器の間隔が10~20 km程度で満足できる精度が得られており、

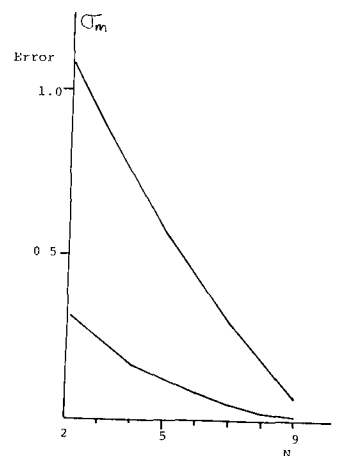


図-1 計器の数の影響

少なくとも断層の長さ程度の間隔に計器が配置されないと、震源過程の詳細は求められないことになる。また奥米深いのは、計器の間隔が小さい場合にかえて解の精度が悪くなることである。つまり、アレイを断層の一部のみ密に設置したのでは不十分で、断層全体に分散させる必要があることである。

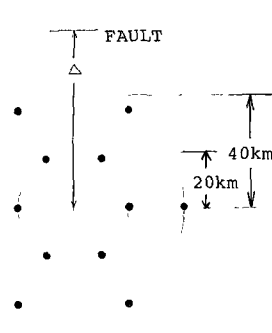


図-2 配置例

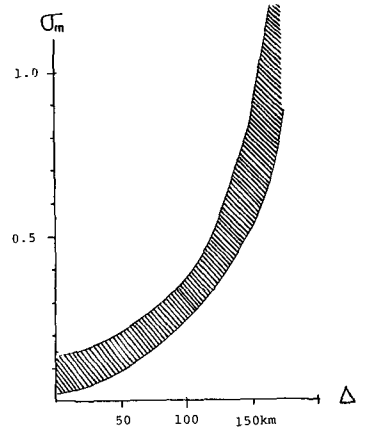


図-3 距離の影響

(D) 方位のカバー：ここでは2例の結果を示す。例1では、アレイが断層の片側のみ存在する場合と、全体を取り囲むように配置された場合との違いを比較し、例2(図-6)では、海底下で発生した地震を想定し、片側(陸側)にのみ観測点が存在する場合と、海底強震計が1台追加された場合とを比較している。例1では、アレイに近い要素での違いはそれほど見られないが、最も遠い要素では解の精度は4倍もちがっている。実際例でも、例えば1979年のImperial Valley地震の解析では、断層の南側の部分であるメキシコ側に観測点が少なかったため、南側の断層運動がよく求まっていない。例2では、観測点が片側のみしか少ない場合には解の平均精度が0.8であるのに対し、1点だけ反対側に設置して囲むようにした場合には0.3とよくなる。できるだけ断層を囲むように置くべきこと、また次節に述べる海底強震計が不可欠であることを示している。

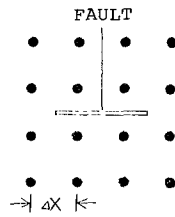


図-4 配置例

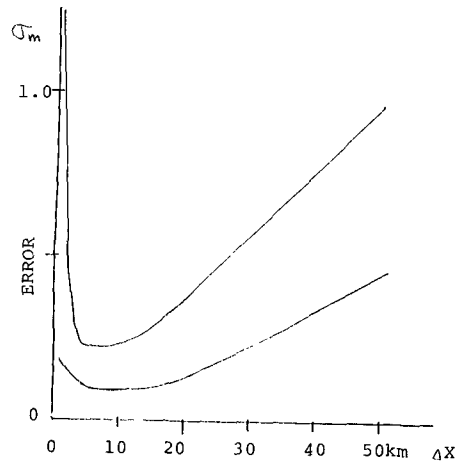


図-5 計器の間隔の影響

4. 海底強震計

以上のシミュレーションにより、海底強震計の設置効果がきわめて大きいことが明らかになった。ここでは、海底強震計の開発状況を紹介する。

世界初の海底強震計の野外実験は、1978年アラスカのKodiak島沖において、Steinmetzらによりなされた⁵⁾。海底強震計の初期の設計は、小型船を使って多くの観測システムの設置・回収を可能にするため

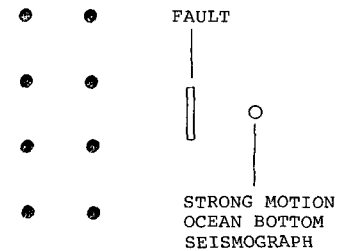


図-6 海底強震計の設置

に、システムのコスト・大きさ・重量を制限するという考えに基づいており、野外実験の目的は、海底強震計ネットワークの建設と回収の可能性と費用の検討であった。設置された3台の海底強震計は、運悪く大きな地震動を記録できなかったものの、150mの水深で1か月間正常に動作し、その後無事に回収工し、実験は成功であった。海底強震計の設計は、high-gainの海底微小地震計で使用工した設計概念の拡張であり、両者の对接時期帯域がほとんど同じであることは注目に値する。この際の主な改良点は、①超低消費エネルギー電源、②加

速度に比例する成分センサー、③記録精度・ダイナミックレンジ・データ処理にすぐれるデジタル記録システム、④海底から装置を回収するシステム、⑤土と計器のカップリングのための支那基礎⁵⁾に関してである。加速度センサーは、0.1~10 Hz、1g以下の地動に対応でき、96 dBのダイナミックレンジが確保されている。システムは、軽量(80~90 kg)かつコンパクト(直径1.2m、高さ0.75m)であり、リチウムバッテリーにより少なくとも90日間作動する。海底強震計で最も重要なのは回収システムであるが、その信頼性は、テキサス大学の実験とここでの実験により、160台中の96%が回収に成功することにより実証された。他方、強震動において問題となる土と計器の相互作用に関して、入念な実験的及び分析的な研究が行われ、粘性土の場合0.1~10 Hzの範囲において1gまでの加速度でカップリングに問題がないことが検証された。最後に、1つの強震加速度計システムの建設費用は約10,000ドルである。

これを踏まえて、翌年同じく Kodiak 島沖において(水深は75~300m)、約50km間隔で8台の海底強震計によるネットワークが展開された⁶⁾。その目的は、こうしたネットワークを布設・維持できる可能性の実証であり、その結果数百個の小地震の記録が得られ(ただし、マグニチュード4以上の地震はなし)、データの分析も開始されている。このように、海底強震計はすでに実用段階にきている。

5. まとめ

本研究では、震源過程を調べるための強震計アレイの機能を評価するために、新しくシミュレーションの方法を開発した。その結果、①断層長土に対して計器の間隔が適切である必要があること、②断層からそれほど遠くない距離に、断層を囲むように最低数観測点は必要であること、③そのためには海底強震計の設置が要求されること、などが明らかになった。他方、海底強震計の設置は、技術的に可能なレベルにまで到達しつつある。

強震計アレイは、震源過程の把握以外にも目的をになっているが、ここで行ったシミュレーションをさらに改善することにより、既存の強震計アレイの機能を評価することができ、さらに現在の計器配置上の問題点を具体的に指摘することも可能であり、将来計画の立案にも参考するところが少なくないと思われる。

謝辞: 嶋悦三教授、笠原順三博士、工藤一真博士には、研究途上において、特に有益な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献: 1) Iwan, W.D. (Editor): Strong-motion earthquake instrument arrays, Proc. Internat. Workshop on Strong-motion Earthq. Instrument Arrays, (Honolulu, Hawaii,) 1978.

2) 太田裕・岡田成幸・後藤典俊: わが国の強震観測の現状整理と改善の方向, 自然災害資料解析, 7, pp.151~169, 1980.

3) Peters, D.C. and R.S. Crosson: Application of prediction analysis to hypocenter determination using a local array, BSSA, Vol.62, pp. 775~788, 1972.

4) 石井絃・高木章雄: 東北大学における地震・地殻変動の検知能力について(I)微小地震, 地震第2輯, 31, pp. 287~298, 1978.

5) Steinmetz, R.L., P.L. Donoho, J.D. Murff and G.V. Latham: Soil coupling of a strong motion, ocean bottom seismometer, 11th Offshore Technology Conference Proceedings, Vol.4, pp.2235~2249, 1979.

6) Steinmetz, R.L., J.D. Murff, G. Latham, A. Roberts, P. Donoho, L. Bobb and T. Erchel: Seismic instrumentation of the Kodiak shelf, Marine Geotechnology, Vol.4, pp.193~221, 1981.