地震観測のセンサ*

Seismic Sensors

鹿熊英昭**

Hideaki KAKUMA

Key words seismic sensor, strong motion accelerometer, earthquake, tiltmeter, servo accelerometer, extensionmeter, crustal movement

1. はじめに

記録に残る世界最古の地震計は中国後漢時代の張衡が発明した「侯風地動儀」といわれている。後漢書によれば132年にこの「侯風地動儀」を発明し、138年に都より遠く離れた甘肅省付近で発生した地震を検知したとの事である。

図1はこの復元模型であり、この壺の中には地震動を検知する柱が立っており、外周には8匹の龍が口に青銅球を咥えて配置されている。地震によりこの中の柱が倒れた方向の龍の口がリンク仕掛で開き、青銅球が落下して下で待ち受けている蛙の口に入る構造である。

これは地震計というよりむしろ地震の有無を検知する感震器といえるが、今でも同じ原理で検知する感震器もある。

しかし実用的な計測器としての地震計が作られたのは19世紀になってからである。日本は明治維新後、急速に近代化を進めたが、同時に常に地震の危機に直面している数少ない近代国家でもあり、そのためほかの科学分野と違い地震学に関しては世界に先駆けた研究がされ、様々な地震計も開発された。当時のお雇い外国人学者が日本に来て地震を体験した事が契機でこの分野の研究が始まったが、その後、大森房吉博士をはじめとする多くの日本の研究者により地震計の開発が進められた。

2. 地震観測用の各種のセンサ

地震観測のセンサとして最もポピュラーな地震計も、目的に応じて多くの種類があることはあまり知られていない。

また観測目的が長期的な地殻の変化を測定するための地殻活動観測装置も地震のセンサとして挙げる事ができ、そ

れらを列挙すると次のようになる。

1) 地震計

微小地震計、強震計、長周期地震計、計測震度計など

2) 地殻活動観測装置類

傾斜計、伸縮計/ひずみ計、体積ひずみ計など

そのほか補器類として水位計、温度計、気圧計、GPS など

3. 各種の地震計

大地の揺れを計る地震計が地震のセンサであるが、この良く知られている地震計だけを分類しても以下ようになる。

1) 地震予知・研究用微小地震計

2) 地震工学・耐震設計データ取得のための強震計

3) 地震による二次災害防止用の制御用地震計

このように各地震計はそれぞれの目的に応じて開発され運用されているがそのセンサの基本原理はすべて同じである。

通常、振動を測定するには基準となる不動点が必要であるが、地震の場合は基準となるべき地盤が動いてしまい地表に不動点が得られないため「振子重錘」とそれを支持する「ばね」と「減衰器」とで構成された振子系を利用し、その振子重錘を仮想の基準点にして地震動を測定している。

この「振子重錘」と「ばね」と「減衰器」とで構成された基本構造はJISの用語で「サイズモ系」と呼ばれている。

このように地震計は振子を利用した計測器であるが「振子重錘」と「ばね」の組合せで決まる固有振動数と測定振動数領域との関係で変位、速度、加速度地震計と分類される。

図1 侯風地動儀模型

*原稿受付 平成17年9月7日

** (財)地震予知総合研究振興会 (つくば市天王台3-1)

鹿熊英昭

1966年中央大学理工学部精密機械工学科卒、同年(株)明石製作所入社、地震計、振動計の開発を担当、1983年度油圧学会技術開発賞、(株)アカシ、(株)ミットヨを経て現職、第19期日本学術会議標準研究連絡委員、中央大学理工学部兼任講師。

図2 サイズモ系モデル

図3 各種地震計の振動数特性

厳密に言えば「振子重錘」も「ばね」や「減衰器」を介して地盤や構造物に接続されているため絶対静止点ではないが、その振子の応答は数学的に解析できる一定の物理法則に従った挙動を示すため、サイズモ系の特性が把握できればその記録から真の地震動を解析する事が可能となる。図2はサイズモ系の定義による地震計のモデル図であり、その振子の応答は1自由度系の振子の運動方程式として次式で表す事ができる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (1)$$

ただし m : 振子重錘の質量、 λ : 減衰係数、 k : ばね定数
 y : 地震動、 x : 振子のケースに対する相対変位

この質量 (m) とばね (k) の組合せで共振周波数が決まり、それがこの系の固有振動数 (f_n) と呼ばれ、振子系の特性を示す上で最も重要な基本数であり次式で表される。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ Hz} \quad (2)$$

また減衰係数 (λ) は振子の位相特性に関与し、振子の共振を制御してこの系の特性の改善に役立っている。地震計の特性は全てこの固有振動数と地震波の振動数との関係で定義され、固有振動数より高い振動数の地震波に対しては振子の変位 (X) は地震波の変位に比例し、固有振動数より低い振動数の地震波に対しては地震波の加速度に比例し、さらに過減衰振子で固有振動数付近の振動数の地震を測定すると、振子は地震波速度に比例している。

これらの地震計を変位地震計、加速度地震計、速度地震

図4 海底地震計センサ部

図5 ボアホール用水平動センサ

計と称して地震の測定目的に合わせて使い分けられている。図3にこれらの地震計の振動数特性を示す。

3.1 地震予知・研究用微小地震計

地震の本質に迫るための研究や地震予知のための高感度微小地震計は人体に感じない地盤の微小振動を24時間連続で観測し、地震活動度や震源決定のために必要なP波やS波とその発生時刻をGPSにより正確に記録し続けている。

一般的に微小地震観測用は高感度の電磁式地震計が主であり、固有振動数が1 Hz付近のセンサが多く、信号変換部はノイズに強い動コイル型センサが多く採用されている。

高感度地震観測をするには人工的な雑音がない地盤のしっかりした観測点が必要であり、静かな山中やまたは地中深く観測井を掘って地震計を設置している。

防災科学技術研究所はこの地中埋設型の高感度地震観測システムとしてHi-net、KiK-netを日本全国に約800地点以上展開して常時日本全国地震活動を監視しているが、これらの装置にもこのタイプの地震センサが使われている。

しかしこのような低固有振動数のセンサはベースの傾斜に敏感であり設置の際には精密なレベル調整が必要であり、地中地震計や海底地震計などのような地震計には遠隔で姿勢制御ができるジンバル装置などが組込まれている。

図4は相模湾の海底に設置されている海底地震計のジンバルに搭載されているセンサの写真である。

図5は防災科学技術研究所が東京直下型地震の監視のた

図6 SMAC-A

図7 SMAC-MDU

めに東京周辺4カ所の地下2300～3510mに設置した深層地殻観測装置やHi-netに使われている動コイル型センサの水平動振子写真と姿勢制御装置である。

3.2 地震工学・耐震設計データ取得のための強震計

地震工学、耐震設計のデータを得るための強震計は主に強震、烈震時の構造物や地盤の挙動や応答波形の記録を主目的とした地震計であり、通常は有感地震以上の比較的大きな地震時に起動し、構造物が破壊する大地震でもオーバースケールせずにその地震波形を記録できる事を目的としているため特に「強震計」といわれている。

日本での本格的な強震計は昭和23年の福井地震を契機に強震観測の重要性が再認識されて結成された強震測定委員会(Strong Motion Accelerometer Committee)により開発されたSMAC型強震計であり、この日本で初めての本格的強震計の機種名は強震測定委員会の英語の頭文字から命名され、昭和28年から日本各地の主要構造物に設置された。

図6は強震計1号機のSMAC-Aであり、この機械式モデルからサーボ型加速度計とCPUを内蔵した現在の最新モデルSMAC-MDU(図7)に至るまで、高層ビルや電力施設、橋梁などを中心に日本の主要構造物に約2000台以上が設置され強震データを収集している。

世界有数の地震多発地帯である東京に超高層ビルが実現できた技術的背景には、これらの強震計による地震波形記録の蓄積と、その記録を有効に活用した構造物の動的設計技術があったからといえる。この強震計のセンサにはほとんど加速度計が使われている、これは構造物に被害を与え

図8 サーボ型加速度計

る破壊力は加速度に比例するため、加速度計を使った方が効率が良い、また構造的にも加速度計は機械強度があり耐久性と小型化が可能というメリットも持っている。

さらにその地震応答波形を有効に活用するにはコンピュータによる解析が不可欠であり、波形記録はデジタル信号に変換されている、開発当初はサバイバル性を重視して使われてきたスクラッチ記録式の機械式地震計も今ではその使命を終え、現在はサーボ型加速度計に代表される電磁式センサの出力を電子ファイルにデジタル記録する方式になり、コンピュータによる数値解析が容易になる方式がほぼ標準化されている。

このように最新の強震計はすべて内蔵のマイクロコンピュータによりデジタル制御され、時刻管理もGPSの信号を受信して校正された時計で常に絶対時刻を記録している。

また阪神・淡路の震災以後、防災科学技術研究所は同一の強震計約1000台を日本全国に約25kmメッシュで配置し、そのデータをインターネットで公開した事により、日本における地震観測体制が一変した。この地震観測ネットワークを強震ネット(K-NET)と命名している。

図8はこれらの強震計に内蔵されているサーボ型加速度計の原理図であり、この力平衡型加速度計は数mGalから3Gを超える振動までを高精度に測定する能力があり、その振動数範囲も直流から約500Hzまでの広域をカバーするほかの方式のセンサにはない優れた性能を有している。

3.3 地震による二次災害防止用の制御用地震計

制御用地震計は地震動の大きさが予め設定したレベルを越えた時、即時に信号を発するように特化された地震計であり必ずしも波形記録を必要としないが、その代わり誤動作防止の精度と信頼性についてはほかの地震計にはない厳しさが要求されている。

制御用地震計は新幹線などの高速交通機関、原子力施設、上下水道、電力、ガス施設などの現代社会のライフラインの防護に使用されており、また身近な所ではエレベータなどにも地震時管制運転装置用センサとして使われている。この制御用地震計が万一誤動作(地震でない時に警報を発

図9 機械式制御用地震計（水平動，上下動）

したり、設定値をこえる加速度の地震がきても動作しなかったり）すると経済的損失のみならず、社会的影響も計り知れないほど大きいためその信頼性には最大限の考慮が払われ、「設定値を超える地震動がきた瞬間に警報信号を発する」という基本的な要求が満たされれば、複雑な電子回路をもった装置より、極力電子部品を減らし構造的にも堅牢な機械式感震器が有利であり、現在でも重要な施設の安全制御には機械式の制御用地震計が使われている。

図9にこれらの制御用地震計の感震器部を示す。

3.4 長周期地震計（広帯域地震計）

最近の構造物の長大化、超高層ビル化に伴い、従来は地球物理的目的で利用されてきた長周期地震計（広帯域地震計）が注目されてきた。この長周期地震の観測を主目的で開発された広帯域地震計は長周期領域で原理的に加速度よりも高感度で検出できる速度を検出する方式を採用している。

3.5 計測震度計

計測震度計のセンサ部は通常の加速度計であり、X、Y、Zの各センサからの出力を内蔵したCPUで演算処理して体感による震度に見合う値を計測震度として表示している。

この演算に必要なパラメータと計算式は気象庁より公開されており、従来の地震観測所以外に各市町村単位の地方自治体にも設置され、その震度情報は気象庁に伝送されると同時に各自治体における地震防災対策の基本データとして使われている防災目的に特化した地震計といえる。

図10 水管傾斜計原理図

図11 サーボ型傾斜計（2成分）

図12 伸縮計原理図

4. 傾 斜 計

地震の発生につながる地殻の変化を検出する地殻活動観測装置として傾斜計や伸縮計、ひずみ計、体積ひずみ計などがあり、地震予知のための有力な計測器として使われている。

傾斜計は地盤の歪に伴う微小な傾きを検出する装置であり、過去の大地震の直前には気泡の水準器で地面の傾きが測定できるほど大きく地盤が傾斜したことも報告されている。

傾斜計には水管傾斜計と振子型傾斜計があり、水管傾斜計は25～100 m離して水を入れた2つの容器を置き、その間を細いパイプでつなぎ、地盤が傾くと一方の水面は上がり、他方は下がる、この時の両容器の水面の高さの変化を読み取る計測器である。

図10は水管傾斜計の原理図である。

水管傾斜計は様々な外乱を避けるため通常は山腹に掘られたトンネル内に設置されており、その成分も直行して2成分が配置されている。

一方、振子型傾斜計は長周期の水平振子がベースの傾斜に比例して敏感に変位する原理を利用した測定装置であり、気泡型水準器も原理的には振子型傾斜計である。

水管傾斜計はトンネルなど広いスペースを必要するためそれに代わる観測手段として地中に縦孔を掘り、その中に設置するボアホール型のサーボ型傾斜計（振子型傾斜計）が開発され地盤の傾斜測定に威力を発揮している。

動作原理は鉛直振子が地盤の傾斜を検出し、その信号を受けたフォースモータが振子を元の位置へ戻すようにフィードバック回路が形成されている、このフィードバック電流

図13 体積ひずみ計構造図

が傾斜角に比例するため精密な傾斜計となる。

この分解能は2/100秒角(10^{-7} ラジアン)以上の性能を持っている。図11に2成分傾斜計の構造図を示す。

5. 伸縮計、ひずみ計および体積ひずみ計

伸縮計は地盤の伸び縮みを直線的に測定する計測器であり、熱膨張係数の小さい石英管を25 m～100 mの長さにつなぎ、その一端を地盤に固定した台に取付け、もう一方に設置した台との間隔を測定する装置である(図12)。

このように2点間の地盤の伸び縮みを測定するため、伸縮計と呼ばれており、温度による石英管の変化を避けるため温度変化の少ないトンネル内に設置されている。

また最近では石英管に代わり、工業的に製作が容易なスーパーインバール棒などの低熱膨張金属材料も採用されている。

この一軸方向の伸縮計を平面内で二方向または三方向に組合わせ、その各軸の変化量から地盤の平面歪を計測する装置をひずみ計と称している。

このひずみ計は周期の非常に長い地殻の伸縮を測定できるので地殻変動や地球潮汐(アースタイト)を観測できるだけでなく、巨大地震により引き起こされる地球の自由振動の計測も可能であり、この目的に使うときは「ひずみ地震計」とも呼ばれている。

この伸縮計を組合わせたひずみ計は長いトンネルが必要なため、それに代わる観測装置として縦孔へ設置する埋込

み型の体積ひずみ計が開発され、多くの観測井で観測されている。

この体積ひずみ計の測定原理は直径約11 cm、受感部長さ3 mの薄肉ステンレスパイプ内に十分脱泡したシリコン油を充填し、これを数百 m 地下の岩盤に掘った孔に埋設し膨張セメントで岩盤と一体になるように固着させている。

岩盤のひずみが進行すれば埋設したひずみ計のパイプは変形し、内部のシリコン油が計測ベロースを押し上げる、この量を 10^{-10} ～ 10^{-11} の高分解能で計測して岩盤のひずみを観測している。図13は東海地震対策の主力観測装置として使われている体積ひずみ計構造図である。

また、この体積ひずみ計のパイプを水平面内で120度分割で三方向のセルを作り各方向のひずみを個別に計測する三成分ひずみ計(坂田式ひずみ計)も開発され、地殻ひずみのベクトル計測もされている、さらに石井東大名誉教授が開発したひずみ計はオイルの拡大機構に代わる機械式拡大機構を用いた多成分の埋め込み型ひずみ計であり地震予知のための観測に活用している。

6. おわりに

ここでは主に物理的な計測器としての地震計を紹介したが、これらの観測機器を支える周辺技術の発達が地震予知のためのセンサの向上に大きく寄与している。

例えばMEMS技術によるマイクロ加速度計の実用化、精密加工、精密測定技術、GPS、レーザ関係の測定器、高性能コンピュータやデジタル通信技術などの発達が地震観測機器の性能を大幅に向上させたといえる。

今後もこれら周辺技術の発展が地震観測技術の向上につながることが期待されている。

参考文献

- 1) 鹿熊英昭: 地震計, 計測技術, **29**, 11 (2001) 27.
- 2) 鹿熊英昭: 加速度のセンサ, 油圧と空気圧, **13**, 1 (1982) 12.
- 3) 田中貞二: 防災科学技術研究所研究資料第264号「日本の強震観測50年」講演集(2004) 7.
- 4) 萩原尊禮: 地震の事典, 三省堂, (1983) 211.