

リアルタイム地震動モニタリング

中村 豊

株式会社システムアンドデータリサーチ

地震防災の要諦は「地震動の強さの把握」と「種々の施設・構造物の耐震強度把握」とにある。耐震強度の把握は地震以前にも調査することが可能である。発生した地震の地震動強度は、当該地震による被災程度を即座に推測する際の重要な指標である。特に、強い地震動によって不測の事態が発生する恐れのあるところでは、強い地震動に対して適切に対応することが重要となる。

地震の発生をいち早く知り適切な対応策をとることの重要性は、近年広く認識され始めているところである。ここでは、地震防災のために実施してきたリアルタイム地震動モニタリングの変遷について主として鉄道の分野から眺めることにする。

Key Words: Real-time Monitoring, Quick Response, UrEDAS, Early Warning Systems, NEWS

1.

1.はじめに

屈曲した軌道の上を列車が走行すると脱線の危険が大きくなるように、震動する軌道の上を走行する列車も脱線・転覆する危険がある。したがって、大きく震動する軌道上を走行する危険を避けるため、地震の発生をいち早く知り列車を停止させることが列車運行上重要である。

こうした観点から、鉄道の分野では、日本で強震計(SMAC型)が開発されるとすぐに、この機構を単純化した警報地震計が開発され、1960年代初めから在来線の地震警報器として実用に供されてきた。

しかし、地震の発生をいち早く知り適切な対応策をとることは鉄道に限らず重要なことであり、近年特にその重要性が広く認識され始めているところである。ここでは、地震防災のために実施してきたリアルタイム地震動モニタリングの変遷について主として鉄道の分野から眺めることにする。

2.地震動監視:人体感覚から感震器の使用へ

はじめは地震動を受けた人間の感覚による判断に基づいて、地震発生直後の対応がなされてきた。一般大衆においても感じた地震の大きさによって自分が何をなすべきか判断してきたのである。しかし、社会構造が複雑になるにつれ相互に関連し合うことが多くなり、個人の感覚で行動するにはそれなりの見識が必要になってきている。

走行する列車の運転士にとって振動は日常茶飯事であり、その中から地震動を識別し適切な行動を起こすのは意外と容易なことではない。新潟地震の時、

釧路沖地震の時、さらには兵庫県南部地震の震源域においてさえ、地震と気づかない場合がある。もちろん、兵庫県南部地震の場合には、列車が何かに乗りに上げたような異常を感じてはいる。しかし、すぐには地震とは気づいていない。

こうしたあいまいな人体感覚を補うためにも計測器による地震動の監視が必要になってきた。また、津波のように大きな地震動を伴わないような災害もあり、大きな地震が発生したことを客観的に捉えて警告する装置が必要になってきたのである。

3.警報感震器による地震動監視

1960年代の在来線列車はそれほど速くなく、列車の運転制御も概ね人間のコントロール下にあった。列車との連絡は基本的に駅で行われており、地震警報も駅員から運転士に伝えられていた。当時は、駅員が感じた地震動の強さ(震度)に従って、列車の停止、線路の点検などの処置が採られていたが、地震検知を確実なものにし、地震動の大きさを客観的に正確に把握するため、機械式地震検知器(警報感震器)の導入が進められた。

この警報感震器は、1953年に開発されたSMAC型強震計の機構を真似て作られたもので、基本的に加速度計である。ただし、波形を記録する機構部分を省き、波形を描くペン先の下には時間とともに送られる記録紙の代わりに煤でコーティングされたアルミ板が固定され、地震動をひとつの円弧で表現するようになっている。地震の度にアルミ板を少しずつ手で移動させて地震動の大きさを記録する。また、ペンの中央付近には電気接点が取付けられ、その下には警報トリガーに対応する振幅付近に警報接点が

固定され、この振幅を超えるとランプが点灯し、ブザーが鳴動する。つまり、地震動を水平2方向成分に分割し、それぞれに対して規定の加速度レベルを超えるかどうかを監視するものである。各成分地震動の加速度が250Galを超えるとペン先が固定アルミ板からはみ出てしまい、最大加速度もよくわからなくなってしまうという代物であった。また、無用の共振を避けるための減衰器も備えられていたが、適正な調整がされていないなど、地震計のとしての精度にはやや問題があったようである。また、計測対象とした振動数範囲は機種により異なり、10Hz～20Hzの間であった。こうした警報感震器も1980年代には全国で200台程度普及していた。

これらの警報感震器はあくまでも人体感覚を補うものであり、地震の発生をブザーやランプで駅員などに知らせ、対応策をとらせるものであった。警報は、概ね気象庁震度階の4, 5, 6に対応する25Gal、80Gal、250Galなどに設定されていたが、地域により設定値には若干の差異があった。

警報感震器は基本的に地震動加速度を感知する。加速度と気象庁震度階の大まかな関係表に基づいて計測された最大加速度を震度階に読み替えて表示するものもあった。しかし、国鉄ではこれを止め最大加速度そのものを表示するように変更していった。

警報感震器は対象とする振動数範囲も統一されおらず、10Hz以下を計測対象にしたものや、16Hz以下を計測対象にしたものなど多彩であった。しかし、鉄道に限れば、警報の目的は走行安全性の確保、大被害の可能性の警告などであるから、対象とする振動数範囲はそれほど高くない。むしろ、最大加速度を監視している関係上、高周波成分はできるだけカットしておくことが重要となる。なぜなら、最大加速度は高周波パルスにより大きな値を示すが、そのような振動は概ね破壊には無関係であるからである。そこで、国鉄では、警報感震器として監視すべき周波数範囲を5Hzまでに統一した。この特性は、表示地震計にも取り入れられるとともに、その後開発されたNEWSやコンパクトユレダスの特性としても受け継がれている。

最近、大きな地震の後さまざまな機関から最大加速度がすぐさま発表されるようになり、一般の方にも最大加速度の認知度がかなり高くなっている。しかし、その対象とする振動数範囲はまちまちで、それらにより得られた最大加速度もたとえ同じ地点で測られたとしても相互に大きく異なり、本質的に比較できない。その点、JR関係の警報地震計は、旧国鉄時代に規格が統一されており、相互に比較し得る最大加速度を表示するようになっているのである。

4. 鉄道における地震時自動非常停止装置

一方、東海道新幹線では開業前から、初めての高速列車に対する対震列車防護装置の検討が進められていた。その契機は、1964年の新潟地震であったが、開業後1965年4月20日に発生した静岡付近の地震に

より沿線変電所への設置が促進された。静岡付近の地震により開業間も無い新幹線の盛土構造物などに軽微な変状が生じ、地震時対策の必要が強く認識され、それまで検討されていた地震時自動停止装置が急遽導入されたのである。1965年末には東海道新幹線沿線全変電所25個所に設置が完了し、ただちに仮使用開始されている。ここで初めて制御用感震器の情報により自動的にき電が停止され、人手を介さずに自動的に走行中の列車に非常ブレーキがかけられるようになったのである。

この装置は倒立振り頭部の錘部分の周囲に10個の接点を持つ制御用感震器である。この場合、水平動加速度の大きさ(2方向成分に分割して監視している場合にはベクトル合成値)で地震を検知し警報することになる。具体的な基準加速度は40Galであり、気象庁震度階との関連でいえば、震度4の中間に相当する。被害は震度5から生じ始めるとされており、その前の段階で警報を出そうとしたとも考えられるが、実際は静岡付近の盛土構造物の変状などを分析して決められたものである。新幹線の場合、地震を検知し警報するだけでなく、検知した地震を波形としても記録し、耐震研究に有効に役立てることが考えられ、地震波形の記録用としてSMAC型強震計が併設された。この記録が後に表層地盤特性を推定する研究に大いに役立つことになるがこの話は別の機会に譲る。

倒立振り子を利用した制御用感震器は在来線にも利用されたが、その際、振り子と警報接点の間隔をひとつ置きに変え、検知精度は下がるものの、ひとつの制御用感震器で地震動の大きさを①40Gal以下、②40Gal～80Gal、③80Gal以上の3段階で捉えられるように工夫している。この地震動の大きさは、地震による列車停止後の運転再開を判断するための重要な情報となる。すなわち、例えば軌道の安全性を、②であれば列車徐行により、また、③であれば徒歩により、確認した後運転再開するという具合である。

東海道新幹線(山陽新幹線)の場合には、地震動の検知精度を下げないため、1985年(1987年)まで40Gal用と80Gal用のふたつの制御用感震器を備えて、運転再開を判断した。

東北・上越新幹線の場合には、運転再開の判断をより合理的かつ迅速にするために、最大加速度を表示することのできる電気式警報地震計(表示用地震計)が開業時(1982年)から設備され、その値が中央列車制御センター(CTC)の制御卓にリアルタイム表示されるようになった。ただし、それまで実績を積んできた機械式の制御用感震器(40Gal用)もいざというときのバックアップとして併設されている。なお、表示用地震計は地震波形も記録できる機能を持っている。

5. 規格統一した警報地震計NEWSシリーズの登場

1980年代に入ると、地震時の警報感震器の動作が妥当なものかどうか、これを管理している人達の

間から疑問の声が上がり始めた。警報感震器の動作状況が同じ地震動を受けた管理者の人体感覚とずれていると思われたことが原因である。

また、警報感震器の情報を外部機関で利用したいとの申し入れなどがあり、警報感震器の特性を改めて調査した。また、大きな地震が発生する度に警報感震器による地震動加速度を収集・整理して、国鉄地震情報として刊行してきた。これにより、警報感震器の管理担当者の実感と警報感震器が記録した値とを比較したり、さまざまな地点での地震動の大きさを比較して管理を担当する警報感震器の異常の有無を感得してもらうことを期待した。また、地震動の大きさに対する感覚を磨くことで、地震動に対してすぐさま的確な防災行動が起こせるようになることも期待したのである。警報感震器のデータを収集整理した結果、減衰器が正しく調整された警報感震器による最大加速度は全体としておおむね正しいものと判断された。しかし、地面がどのように揺れたかの記録は無く、耐震研究にはもどかしいものであった。

そこで、国鉄・鉄道技術研究所時代に、強震計としても十分な精度を持ち、警報もだせる新しい警報地震計NEWSを開発して設置を薦めた。警報地震計は、水平2方向の合成加速度の最大値をディスプレイに表示する（概ね10Gal以上）とともに各成分の最大値をプリントアウトする機能も持っており、現場管理者にも直ちに地震動の強さが定量的に認識できるように工夫されていた。もちろん、耐震研究にも役立つように波形記録もできるようになっている。実際の機器開発には競争開発の手法を取り入れたが、結果的には一社しか対応できなかった。実機が完成したのは1984年のことである。その後、この形式の地震計が全国展開されるに至り、国鉄の警報地震計の質は大いに向上し、設置コストは大幅に低減したのである。なお、現在までに全国でJR以外も含めて概ね400台が稼働中である。

NEWSシリーズの警報地震計による最大加速度は、振動数帯域0.1Hz～5Hzの加速度波形をとりだして、水平二方向をベクトル合成した大きさで計測される。NEWSではこうした最大加速度は1/10秒毎に出力され、監視に用いられている。なお、NEWSの波形記録は0.1Hz～10Hzまでで、プライベートメモリのないFMアナログ記録により、起動後からの地動加速度波形が記録されている。

東海道新幹線（1985年）と山陽新幹線（1987年）には新幹線用に改造されたNEWS改が設置されている。

6. 新しい地震動モニタリング

警報感震器、制御用感震器、表示用地震計、警報地震計NEWSなどはいずれも装置が設置された地点の地震動を監視するもので、ある一定の基準加速度を越えると警報を発令するものである。これらの警報装置の動作状況を検討すると、地震動加速度と被

害発生の間にはそれほどよい相関は見いだせないことがわかる。被害が生じないような小規模地震でも警報地震計の近くで発生すると、大きな加速度が観測される。これによって、列車の運行が大きく乱される事例が多発するようになり、より合理的な警報発令方法、地震監視方法が求められるようになってきた。また、新幹線の高速化にともない的確でより迅速な警報発令も要求されるようになってきたのである。

(1) 早期検知の基本的な考え方

的確な警報を実現するために、地震動を監視するのに加速度よりも被害との相関がよい物理量を用いるというやり方がまず考えられる。SI値（速度応答スペクトルから算出される地震動強度）を利用するものもその一つで、東京ガスなどで採用されている。しかし、ある基準値を越えた時に警報を出すという基本的な考え方は変わらず、警報が多少的確になったとしても発令時間は従来と大差ないものとなる。新幹線などのようにできる限り早い警報を必要とする機関においてはこうした警報では不十分である。

警報を早くするには、地震動のできるだけ早い段階で被害地震と認識し警報を発令する方法（P波警報）と、地震の発生をその震源域でいち早く検知し警報する方法（前線警報）とが考えられる。

(2) 前線警報

前線警報のアイデアは、すでに130年前の1868年に発表されている。これはサンフランシスコを対象にしたものであるが、大地震の原因となる断層の近くに感震器を設置し、大きな地震動を感じた瞬間に自動的に電信でサンフランシスコに通報して市中心部に作られた大きなベルタワーから警報を市民に伝えるという構想である。この構想を発表したのはJ.D.Cooper医師で、日本の磁石を使った地震予知がうまくいかないことに端を発しているのは興味深い。日本でも、伯野元彦東京大学名誉教授らが中心となって1972年頃にまとめた「10秒前検知システムの構想」がある。これは東京を対象にしたものである。これらの先駆的アイデアを実現したのが、東北新幹線の海岸線検知システムであり、メキシコシティの警報システムSAS（Seismic Alert System）である。

a) 東北新幹線の海岸線検知システム

東北新幹線の海岸線検知システムは、東北沿岸の太平洋海底下に発生する巨大地震の発生をいち早く捉えて警報しようとするもので、東北地方の太平洋沿岸に80km～100kmの間隔で在来型の警報装置（制御用感震器と表示用地震計）を設備して、大きな地震動をいち早く捕捉して、東北新幹線に到達する前に警報を発令する。これは東北新幹線の開業時（1982年）から実際に運用されている。

b) メキシコシティ警報システムSAS

メキシコシティに大災害をもたらした1985年のミチョアカン地震の後、太平洋沿岸のアカプルコを

中心に25km間隔で警報地震計を海岸線に沿って一列に配置してココスプレートの潜り込みに起因する巨大地震をいち早くとらえ、メキシコシティの市民に警報を出すシステムSASが1991年から試験運用されている。このシステムは東北新幹線の海岸線検知システムに類似しているが、主たる警報対象が一般市民であること、警報が主としてラジオやスピーカによって警報音と音声で伝えられる点が異なる。一般市民への警報という点でユニークである。これを実現するに当たって、また、円滑に運営するに当たって、多くの問題を克服し、また克服しつつあるものと考えられ、この経験から学ぶべき事柄も多いものと推測される。

(3)P波警報

地震動のできるだけ早い段階で被害地震と認識し警報を発令する方法として、P波初動での地震警報(P波警報)がある。これまでの地震動モニタリングは地震動の大きさをリアルタイム監視し、地震動の大きさがある基準値を越えれば警報を出すというものである。したがって、警報が地震動のどの段階で出されたものかは不明であった。

強震記録を分析した結果、地震の40Gal検知から最大加速度発現までの時間(いわゆる余裕時間)は、大きなばらつきはあるものの4秒程度であり、警報を出してからすぐに最大の地震動に襲われていることがわかった。つまり、基準値を超えるのは一般にS波以後(S波警報)であり、P波初動で警報(P波警報)が出せれば、余裕時間は少なくとも初期微動継続時間だけ増やすことができるものと期待されたのである。さらにこの地震を震源域などで前線検知して警報することができれば、この間のP波伝播時間分が付加されることになる。

具体的には、警報対象域で震源距離100kmの地震を検知した場合12.5秒余裕時間を延ばすことができ、震源域でこの地震を捕捉すればさらに12.5秒が付加される。結局、余裕時間は警報対象域で地震を検知した場合16.5秒、震源域で地震を検知した場合29秒となる。なお、ここではP波、S波の伝播速度をそれぞれ4km/s、8km/sと仮定している。震源域で地震を検知した場合、P波警報もS波警報も原理的には余裕時間にそれほど差異はない。しかし、それ以外の地点で地震を検知した場合、P波警報による余裕時間がS波警報による余裕時間を上回る。日本の場合、直下地震も含めて震源付近で地震を検知することはほぼ不可能であるから、ほとんどすべての場合においてP波警報が有利ということになる。ただし、実際にはP波警報のためには処理時間が必要になり、その時間の量によってはP波警報が有利となる場合が若干減少する。

a) M-Δ警報

P波警報機能を実現したものがユレダス(UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System)であり、1992年春から東海道新幹線で実用化されている。1996年からは山陽新幹線で

も実用化され、東京博多間の新幹線を取り囲むように19カ所のユレダスが配置されている。これらのユレダスは、P波を検知すると、3秒で検知地震の規模・発生方位・距離・深さを自動的に推定する。さらに、地震動の大きさではなく、地震の規模と発生位置・深さの情報を基にいわゆるM-Δ関係図から警報をどこに出すべきかを判断する。M-Δ関係図によれば、地震動の大きさで判断するよりも確かな警報を出すことができる。ユレダスはこれにより設置点周辺以外にも警報が出せるようになったのである。M-Δ関係図に基づく判断結果にしたがい、P波を検知してから4秒以内に必要箇所に直接警報が届くように警報を出すとともに、管理センターに検知情報・警報情報を自動送信する。これがユレダスの機能である。初期微動継続時間が4秒以下の地震(すなわち震源距離が30km以下の地震)に対しては、従来の沿線地震計によるS波警報の方が速い場合がある。東海道新幹線や山陽新幹線用のユレダスは過去の大地震を対象として、沿線から離れたそれらの震源近傍に設置されている。

1995年兵庫県南部地震でも東海道新幹線のユレダスはP波警報を出しているが、沿線警報地震計によるS波警報とほとんど同時であった。1995年兵庫県南部地震は神戸市直下を震源とする地震であり、山陽新幹線の直下でもあった。震源域とその近傍には新幹線のための警報地震計NEWS改が2カ所、在来線用の警報地震計が3カ所、その周辺にはさらに数カ所の警報地震計が設備され、地震発生とともにいち早く警報を発令している。

b) PI警報

兵庫県南部地震の際、神戸市内のコンビニエンスストアの防犯カメラに記録された地震時の映像によると、震央域であっても、地震のP波を感じてから大きく揺れ始めるまでに数秒の遅れがある。住民の話では、この数秒間は何が起きたのかわからず非常に不安であったが、大きく揺れ始めて、はじめて地震であることに気づき却って安心したという。いずれにせよ、処理時間を含めた警報時間が4秒では警報時には震央域では大きな地震動に襲われていることになる。しかし、1秒程度で警報が出せれば、震央域であっても警報後数秒たってから大きな地震動がやってくるという状況を作り出すことができる。これを目指したものがコンパクトユレダス(Compact UrEDAS)である。コンパクトユレダスは東北・上越新幹線や営団地下鉄などに合計62台設置されている。

コンパクトユレダス用の新しいソフトシステムでは、警報対象域を狭めてP波警報処理を簡素化したPI警報を実現している。このシステムは、従来のS波警報機能とP波警報機能を併せ持つ新しいタイプのリアルタイム地震動モニタリングシステムである。S波警報については従来と同様の加速度によるもの、より被害と密接に関係したDI値(発災強度指数)によるもの、などが選択できる。また、このシステムに含まれるP波警報機能は、まずP波を識別してあ

る基準時間（通常1秒）内のDI値の最大値（PI値という）で発災強度を評価して警報を出すというものである。DI値の変動を監視して、警報すべきPI値を越えた時にP波であったかどうかを確認して警報を出す方法もある。これらをPI警報と呼ぶ。

DI値とは、地震動加速度ベクトルと速度ベクトルの内積の絶対値の常用対数で定義されるものである。つまり、DI値は、地震動を受ける物体に対して地震動がする最大の仕事率をその物体の質量で除したものとなる。DI値が大きければ大きいほど物体の受ける単位時間当たりのエネルギーは大きく、物体は変状しやすいと推測される。地震動を監視する周波数範囲を適当に選ぶことにより、気象庁の計測震度階と極めて相関の高いものとするができる。計測震度階には、①物理的意味が不明、②その定義上リアルタイム計測できない、などの問題がある。これに対し、DI値は物理的な意味が明確であり、リアルタイムで地震動の持つ発災強度を的確に把握することができる特長を有する。

7. 地震計以外のセンサーを用いたリアルタイム地震動モニタリング

ユレダスのM- Δ 図による被害地震評価は、地震動を直接的に取り扱った従来の地震動モニタリングの考え方からはやや異質なものであり、地震そのものの性質を利用して発災危険度を評価したものと考えることができる。同様に地震動にこだわらずに、当該地震の発災危険度を計測しようとする試みもいくつか行われている。

1988年に開業した青函トンネルには青函トンネル地震防災システムが設備され、地震時の警報とともに被災の程度を迅速に把握することができるように工夫されている。トンネル部分や地上部分に設置されたNEWS型警報地震計8台やユレダス4台とともに、海底のトンネル覆工部分には断面変形やトンネルの伸縮などを計測するため、4つの場所（断層破碎帯など）に合計84個のひずみ計が設置されている。また、トンネルに変状が生じた時その位置を把握するため、トンネル内の排水溝に流量計を合計27箇所設置して湧水量を常時計測している。普段はひずみ計や湧水量は1分毎に計測されているが、地震時には、ひずみ計は地震動が継続している間1/100秒間隔で計測され記録される。これらの計測値はCTCで一括してリアルタイム管理され、地震後、直ちにリモートで被害の有無を判断することができる。

東京ガスでは、軟弱な地盤におけるガス導管の異常を迅速に把握するために、液状センサを開発して液状化の発生を直接的に監視している。

8. おわりに

リアルタイム地震動モニタリングの歴史は浅く、せいぜいここ数十年のことである。最近では様々な

分野に浸透して地震防災の大きな流れになっている。現在では、警報に直結しない稠密なリアルタイム地震動モニタリングも実施されており、より深く地震動を理解するための助けになっている。これは、地震に対する恐怖を風化させないためにも有益である。

今後も、地震防災を取り巻く数多くの分野の発展が取り入れられ、より合理的で効果的な地震防災技術が構築されることを期待したい。

参考文献

- 1) J.D.Cooper: Earthquake Indicator, San Francisco Daily Evening Bulletin, 3rd November 1868.
- 2) 伯野・高橋：10秒前大地震警報システム、自然、9月号、1972.
- 3) 中村：総合地震防災システムの研究、土木学会論文集I、No. 531/1-34、1996-1
- 4) Yutaka NAKAMURA: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, EWC98, September 7-11, Potsdam, Germany.
- 5) JRガセット1998年11月号、特集防災対策.