

第10回

地震計と警報システム

はじめに

地震計は地震波の強さや時間的変化を記録する機器を指します。地震計は地表面に固定されるため、地震が発生すると、地面と地震計が一体に動くこととなりますが、地震計内部の振子は慣性力を受け地面と異なる動きを示します。この相対的な動きを検出することで、地震動を検知し揺れの大きさや性質を評価することが可能となります。ここでは、地震検知や地震警報のアイデアに関する古い事例や、鉄道分野における地震計や警報システムの歴史について紹介します。

地震計の誕生(西暦132年)

後漢の張衡は西暦132年に、慣性を利用した人類初の地震計「地動儀」を発明しました。「地動儀」は円筒形の本体(直径約23cm)の8方向に設置された竜口は球をくわえており、地震動が到来した方向の球が落下し、その音で地震動の到来を知る仕組みでした。地動儀は約500キロ離れた地震を検知したとも言われています。簡易的な構造の地震計ではありますが、最も古い実用例と言えます。

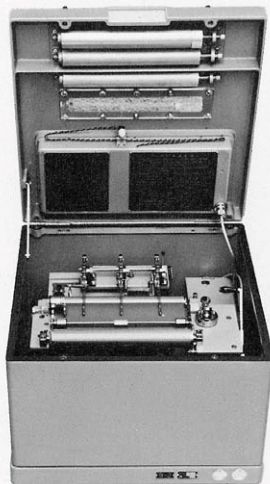


図1 SMAC-B2型地震計
(提供：(株)ミットヨ)

警報システムのアイデア(1868年)¹⁾

今から140年余り前に、サンフランシスコで地震が発生し、多くの被害が発生しました。地元で医師のクーバー博士は、地元の新聞¹⁾にあるアイデアを投稿しました。

そのアイデアは、地震発生が想定される活断層などの近くに地震計を配置し、地震発生的事实を通信回線を使用して伝達し、教会の鐘などを使用して多くの人に伝えることができれば、被害を少なくするというものでした。これは新幹線で現在稼働している早期地震警報システムまたは気象庁の緊急地震速報に通じるものですが、以下に示すようにその実現までには長い時間が必要でした。

国鉄における地震計の導入(1956年～)²⁾

1948年(昭和23年)福井地震で気象庁測候所の地震計が破壊され、強震動の記録が残されなかった経験を機に、1956年(昭和31年)に東京大学地震研究所に強震測定委員会(Strong Motion Accelerometer Committee)が設置され、日本における強震観測体制が整備されました。まず強い揺れの中で地震動記録を残すための地震計(SMAC型強震計)B



図2 SM-10A(1987年)

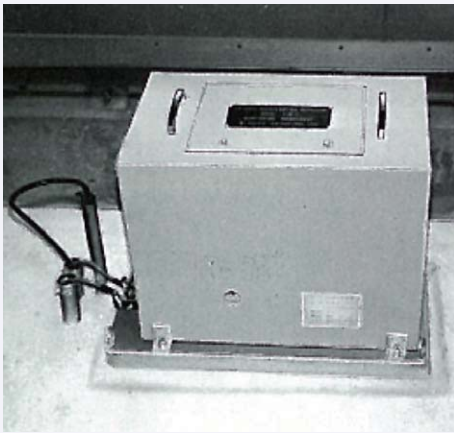


図3 AJA-2型地震計



図4 NEWS改地震計(2003年)

型が開発されました。国鉄に導入されたSMAC-B2型(図1)地震計は、機械的な構造をもち上下水平あわせて3成分の加速度を観測します。SMAC-B2型地震計には、落下球駆動式スタータ、振子、記録装置などが納められています。またSM-10A(図2)のような磁気テープによる地震波形収録装置を内蔵した地震計や、倒立振り子を用いたAJA-2型(図3)等が開発されました。当時の地震計の構造は、全ての機構が一つの筐体内に納められているという特徴がありました。

これらの地震計は、防災を目的として昭和30年代に在来線沿線に設置されました。列車規制方式は、地震計がある規定値以上の水平方向の揺れを検知した場合、主に駅に設置されていた表示装置に加速度情報を表示し、人手を介して列車の運行を規制するというものでした。当時、運行規制は気象庁震度階級に基づき決定していました。しかし当時の震度階級は体感に基づき定められていたため、観測された加速度値をもとに簡易的な対応表に基づき規制値を決定していました。

〔 新幹線への導入(1965年~)³⁾ 〕

東海道新幹線開業直前に発生した新潟地震を契機に、新幹線のための警報システム(対震列車防護装置)の検討が始められました。その結果、約20km間隔で変電所内に地震計を設置して、地震動を検知すると自動的に列車へのき電を停止して、車両に非常ブレーキを動作させるシステムが構築されました。これは今でいうリアルタイム地震防災の先駆的な事例と考えることができます。

また、1982年東北新幹線開業に伴い、新しい警報システムの研究開発が進められました。その結果、海岸に沿線と同じ地震計を設置し、地震発生後いち早くき電を停止させる早期地震警報システム「海岸線検知システム」が導入されました。このシステムは、加速度によるしきい値判定による地震計を海岸線に設置することによって、主に海溝型地震とよばれる規模の大きな地震に対して、沿線に設

置された地震計よりも早く警報を出すことを可能とします。列車規制方式は、海岸線に設置された地震計がある一定以上の水平方向の揺れを検知した場合、予め定められた区間の変電所のき電を停止し、新幹線の運行を規制するものです。これは固定範囲制御と呼ばれており、S波による最初の早期検知・警報システムと言えます。

〔 当時の地震計観測の課題⁴⁾ 〕

1980年代前半に、鉄道技術研究所が国鉄の在来線における地震計の実態調査を行いました。その結果、当時地震計は9種類存在し、地震計の記録特性が異なること、また特定の機種においては、同一機種であっても地震計の記録特性がさらに多岐にわたることが確認されました。これでは地震動の強さについて正確な比較や評価ができません。

そこで、当時の技術者は地震計の記録特性を厳密に規定した仕様の作成、および地震計の製作に取り組みました。新しく定められた仕様は、1984年に国鉄仕様(JRS)として規定され、地震警報用フィルター(通過帯域0.5~5.0Hz)と地震記録用フィルター(通過帯域0.5~9.0Hz)が定義されました。さらに、この仕様に基づいた地震警報記録装置(NEWS)が作成されました。この地震計は在来線および新幹線の地震計として広く導入されました。また1985年(昭和60年)より東海道・山陽新幹線にNEWSの故障検知・通報機能を強化したNEWS改(図4)が順次導入されました。NEWS改は2000年前半まで新幹線の沿線地震計として用いられていました。NEWSの登場により、鉄道における地震計の記録特性の統一が図られ、これは現在まで引き継がれています。

〔 ユレダスの登場(1992~2005年)^{5),6)} 〕

1980年代までは前述のように地震の大きな揺れ(S波)

の検知による警報判定が行われていました。地震波は通常初期微動であるP波と主要動であるS波から構成されています。一般的にS波は秒速3~4kmであり、P波は秒速6~8kmとされています。S波到来の前にP波を捉え、列車を停止することができれば、列車の安全性は大きく向上することになります。この目的を達成するために、新たにP波検知技術が開発され、1987年モニタリングシステムとして青函トンネルへの導入(図5)を経て、P波検知情報を用いた世界初の早期地震検知警報システムとしてユレダス(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)が1992年東海道新幹線に導入されました。

ユレダスの構造はセンサー部とAD変換部、そして演算部に分かれており、それぞれが専用ケーブルで結線されていました。地表面の振動をセンサーにてアナログ信号に変換されたのちに、AD変換部により離散化データとなり演算処理されます。このときP波およびS波の識別、地震検知後数秒のデータを用いたマグニチュード、震央方位(地震計から震央までの方位)、震央距離(地震計から震央までの水平距離)の推定、震央距離とマグニチュードの関係による警報判定を次のサンプリングまでに処理します。

ユレダスは沿線の変電所内に設置された沿線地震計と、海岸線付近に設置された海岸地震計をアナログ専用回線により結び警報システムを構成していました。中央処理装置と地震計間の通信仕様は専用プロトコルによるリアルタイム演算および情報伝送が行われていました。ユレダスの演算量は当時の演算機器にとって負荷の高いものでした。そこで当時の演算部は高性能ファクトリーコンピューターを使用していました。

初期のユレダスから海岸地震計においてP波検知機能が

採用され、列車規制方式は海岸地震計が推定したマグニチュードの大きさによって、新幹線の運転規制区間が変わる方式となりました。これはマグニチュードが大きいほど、被害範囲が大きくなるという経験則に即した手法で、可変範囲制御と呼ばれています。またP波検知が行われなかった場合でも、海岸線検知システムと同様に、固定範囲制御による新幹線の運転規制が行われます。沿線地震計は、水平方向合成加速度が規定値以上の揺れを検知した場合、地震計はき電遮断信号を変電所に対して送信し、変電所の送電区間内を走行する新幹線の運行を規制します。ユレダスは東海道新幹線導入後、1996年山陽新幹線(図6)、1997年東北・上越・北陸新幹線(図7)に順次導入されました。

【 新しい早期警報用地震計の導入(2006年~) ⁷⁾ 】

ユレダスの実績と経験をもとに、このシステムをさらに発展させるため、2000年から2004年にかけて鉄道総研と気象庁が連携して次世代のP波検知アルゴリズムの共同研究を行いました。このアルゴリズムはB- Δ 法と名付けられ、この手法に基づき鉄道分野では新しい早期警報用地震計が、気象庁では緊急地震速報がそれぞれ開発されました。新しい早期警報用地震計はユレダスの後継機種として、現在全ての新幹線に導入されています。

新しいP波検知アルゴリズムは、P波検知から2秒間のデータを使用し、予め準備していた関数をフィッティングさせることにより、加速度上下成分の振幅増加率特性を求め、さらに得られた振幅増加率から震央距離を求めます。この手法はユレダスに比べ3割程高い精度を示すことが確認されました。



図5 青函ユレダス(1998年)



図6 山陽新幹線ユレダス(2002年)



図7 コンパクトユレダス(2007年)



図8 早期警報用地震計(2011年)

また、地震計の仕様のみならず、中央処理装置と地震計間の通信仕様についても鉄道総研が新たに提案しました。現在沿線地震計および海岸地震計は全てデジタル専用回線で双方向通信を行っており、小規模な警報システムの場合でもユレダスの約300倍以上のデータ量を扱っています。通信の内容は、地震警報情報の伝送部分と、地震波形の回収やプログラムの遠隔更新などサービス情報の伝送部分に分けられます。後者は本システムの複雑な機能にうまく対応できるよう汎用プロトコルを使用しており、ユレダス以降機能充実が図られています。

さらに、地震計の構造も大きく進歩しました。センサーとAD変換部は同一躯体に収容され、処理部まではデジタル伝送となりました。これにより変電所などの環境下においても信頼性の高いデータ伝送が実現されました。処理部の機能はユレダスと殆ど同じですが、機器構造はファクトリーコンピューターではなく、専用の処理装置となり、ユレダスと比較してよりコンパクトな構造となりました。

列車規制方式は、これまでの海岸地震計の固定範囲制御および可変範囲制御、沿線地震計の固定範囲制御に加えて、沿線地震計同士で推定したマグニチュードと震央位置(緯度、経度)の情報を交換して、新幹線を制御する可変範囲制御機能が追加されました。これは直下型地震に対してより早い警報判定を行うためです。

地震計と警報システムの今後の展望^{8),9)}

これまでの事例で紹介したように、鉄道に初めて導入された頃の地震計は機械的な駆動システムでしたが、現在では電子化が進みより高機能になってきました。また通信技術の進歩とともに、今後はより多機能化が進むと考えています。

多機能化する地震計あるいは警報システムについて、これまでと同様の信頼性を保つには、さらに多角的な取り組みが必要となります。言うまでもなく地震計は電子機器であり、ソフトウェアおよびハードウェア両面の信頼性向上が

必要となります。今後、ソフトウェアの分野では、より精度の高いP波検知技術の研究開発が必要となります。既に現行方式より早く正確な技術が開発されており、現在地震計への実装を検討しています。ハードウェアの分野では、地震計が設置されている変電所内の環境に適合した、より信頼性の高いハードウェアの構築技術の確立が必要となります。そこで、鉄道総研は2年前に国際規格であるIEC61000およびIEC62236シリーズに準じる地震計製作仕様書を策定しました。これらの取り組みを含めた様々な開発や品質向上策を実施することによって、新しい地震計および警報システムの実現に取り組みたいと考えています。

おわりに

内閣府の資料によると、世界で発生したマグニチュード6.0以上の地震の約20%が日本付近で発生しています。このような状況下で古くから鉄道は地震計を取り入れ、安全対策を積極的に行ってきました。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、海岸地震計(海岸線検知システム)がいち早く新幹線を停止させました。早期検知技術を開発し、世界に先駆けて実用化した諸先輩の先見の明に改めて尊敬の念を覚えました。本システムおよび技術は、世界に冠たる技術であると考えています。これまでの実績を更に越えていけるよう努力していきたく思います。

最後に原稿の作成に関して、JR北海道、JR東日本、JR東海、JR西日本、JR九州、鉄道運輸機構のご協力を頂きました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

(佐藤新二/防災技術研究部 地震防災研究室)

文献

- 1) San Francisco Daily Evening Bulletin, 3rd November 1868
- 2) 大谷圭一：強震観測事業の現状について，防災科学技術，No.47，1982
- 3) 中村豊：国鉄における地震警報システム，鉄道技術，1985.10
- 4) 中村豊：在来線用警報地震計の現状と問題点，鉄道技術研究所速報，No.A-85-62，1985.3
- 5) 美藤恭久，中村豊，富田健司：東海道・山陽新幹線のための地震時ダウンタイム短縮化対策，鉄道技術研究所報告，No.1294(施設編第567号)，1985.3
- 6) 北川修三，中村豊：青函トンネルの地震防災システムについて，第19回地震工学研究発表会，1987
- 7) 佐藤新二：新幹線用早期地震防災システムの実用化，電気評論，2012.5
- 8) 野田俊太，山本俊六，佐藤新二：早期地震検知における地震緒元推定方法の精度および即時性向上，鉄道総研報告，Vol.25.No.7，2011.11
- 9) 佐藤新二，山本俊六，川崎邦弘：国際規格に適合した新しい新幹線用早期検知地震計の開発，日本地球惑星科学連合，2012年度連合大会