

早期地震警報システムの系統化調査

Historical Survey on Earthquake Early Warning System

中村 豊 Yutaka Nakamura

佐藤 勉 Tsutomu Sato

齋田 淳 Jun Saita

■要旨

大きな地震が発生するとすぐにテレビやスマートフォン等で通知される緊急地震速報は、早期地震警報システムの一つである。2007年に一般提供が開始された緊急地震速報であるが、そのアイデアは1868年のサンフランシスコの医師の構想まで遡る。この構想は、地震波と電気通信の伝播速度差を利用して、震源近くで地震を検知し遠く離れた都市（サンフランシスコ）にいち早く伝えるというものであったが、当時の技術では実現できなかった。

それから約100年後、日本においても「10秒前大地震警報システム」という構想が発表される。相模湾内に地震計を設置することで、東京地方に大きな揺れが襲う前に警報を行うというものであった。しかし、これも実用には至らなかった。

この構想に関心を強く持った国鉄は、地震時の不測の事態に対応するためのシステムとして、1970年代から早期地震警報システムに関する研究・開発を始めた。まずは、震源近くに地震計を設置し、地震を検知・警報を行うシステムを東北新幹線へ整備した。その後、より迅速かつ的確な地震警報を求め、地震の初期微動（P波）から地震諸元を推定して、地震の大きさと震央距離の関係から想定される地震被害に基づく地震警報を発令する早期地震検知警報システム「ユレダス」を開発する。1992年に東海道新幹線「のぞみ」の開業と共に運用が開始されたユレダスは、P波初動で地震警報を発令する世界で初めて実用化された早期地震警報システムである。

ユレダスの実用化以降は、1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）や2004年の新潟県中越地震などを経験して開発された新たな早期地震警報システムも生まれている。また2007年には、これまで列車の運行制御などに限定的に利用されていた早期地震警報システムが緊急地震速報として一般の人々にも提供され、地震防災への関心の向上にも資することとなった。

海外に目を向けると、早期地震警報システムは1990年代にメキシコや米国で実用化され、その後、複数の国や地域においても来るべき地震に備えて開発が進んでいる。さらに巨大IT企業によるサービスが瞬く間に世界中に展開され、早期地震警報システムが広がっていった。

本系統化調査では、早期地震警報システムがどのようにして生まれ、そして発展してきたのか、その歴史を辿る。特に、世界で初めて実用化された早期地震警報システム「ユレダス」の誕生までの経緯やその背景にある思想、そしてその後の展開を中心に詳述するとともに、地震計や地震観測、地震そのものに関する研究の歴史などについても概括する。

■ Abstract

Earthquake Early Warning System, which is delivered via television, smartphones, and other media immediately after the occurrence of a large earthquake, constitute one form of a system to issue earthquake early warning. Although public dissemination of Earthquake Early Warning Issued by the Japan Meteorological Agency (JMA) began in 2007, the underlying concept dates back as far as an idea proposed in 1868 by a medical doctor in San Francisco. This concept sought to exploit the difference between the propagation speed of seismic waves and that of electrical communication by detecting earthquakes near the epicenter and rapidly transmitting warnings to the distant city of San Francisco. However, the technology available at the time was insufficient to realize this concept.

Approximately 100 years later, a similar concept known as 'A Plan for Strong Earthquake Alarm System 10 Seconds before it Attacks the City of Tokyo' was proposed in Japan. This plan aimed to issue warnings before strong ground motion reached the Tokyo metropolitan area by installing seismometers in Sagami Bay. However, this plan, too, never progressed to a practical stage.

Strongly intrigued by this concept, Japanese National Railways (JNR) initiated research and development on an Earthquake Early Warning System in the 1970s to manage unforeseen events during earthquakes. First, mirroring the earlier concept, a system was deployed on the Tohoku Shinkansen that used seismometers installed near potential epicenters to detect tremors and issue warnings. Subsequently, to enable faster and more precise alerts, JNR developed the UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System). This advanced system estimates seismic parameters from the primary wave (P-wave) and issues warnings based on expected damage, calculated from the relationship between an earthquake's magnitude and its distance from the epicenter. Launched in 1992 alongside the debut of the Nozomi service on the Tokaido Shinkansen, UrEDAS was the world's first operational Earthquake Early Warning System to issue alarms triggered by the initial detection of P-waves.

The successful implementation of UrEDAS was followed by the development of new Earthquake Early Warning Systems, informed by the experiences of major disasters such as the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake (Great Hanshin-Awaji Earthquake) and the 2004 Mid Niigata prefecture Earthquake. Then, in 2007, an Earthquake Early Warning System, which had been utilized mainly for railway operation control, was launched for public use as the Earthquake Early Warning Issued by JMA. This shift played a significant role in raising public awareness and engagement with earthquake disaster prevention.

Looking abroad, Earthquake Early Warning Systems were first implemented practically in Mexico and the United States during the 1990s. Development has since progressed in numerous other countries and regions in anticipation of major seismic events. Furthermore, a service rolled out by global technology giant has expanded worldwide, rapidly accelerating the global adoption of these Early Warning Systems.

This historical survey traces how Earthquake Early Warning Systems emerged and evolved over time. In particular, it focuses on the circumstances leading to the birth of UrEDAS, the world's first practically implemented Earthquake Early Warning System, the underlying concepts and philosophies that shaped its development, and its subsequent evolution. This survey also provides an overview of the history of research related to seismometers, seismic observation, and earthquakes proper.

■ Profile

中村 豊 Yutaka Nakamura

国立科学博物館 産業技術史資料情報センター 主任調査員

- 1977年 東京大学大学院工学系研究科土木工学専門博士課程 修了
工学博士
東京大学生産技術研究所 入所
- 1978年 東京大学生産技術研究所 退所
日本国有鉄道公社鉄道技術研究所(後に財団法人鉄道
総合技術研究所) 入所
早期地震警報システムなど地震防災に関する研究開発
に従事
地震防災研究室長, ユレダス開発推進部長を歴任
- 1997年 財団法人鉄道総合技術研究所(現 公益財団法人鉄道総合
技術研究所) 退所
株式会社システムアンドデータリサーチ 代表取締役就任
- 2006年 東京工業大学(現 東京科学大学)
大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 連携教授
就任
- 2012年 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム
専攻 連携教授 退任
- 2025年 株式会社システムアンドデータリサーチ 取締役会長就任
国立科学博物館産業技術史資料情報センター 主任調査員
急逝(2025年7月)

佐藤 勉 Tsutomu Sato

- 1999年 東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻博士
課程前期 修了
修士(工学)
- 2025年現在 株式会社システムアンドデータリサーチ 代表取締役

齋田 淳 Jun Saita

- 1991年 早稲田大学理工学部土木工学科 卒業
- 2025年現在 株式会社システムアンドデータリサーチ 常務取締役

■ Contents

1. はじめに	332
2. 地震観測・強震観測の歴史	334
3. 地震学から地震防災への発展と 早期地震警報システムへの道のり	367
4. 早期地震警報システムの開発とその進化	383
5. 現在稼働中の主な早期地震警報システム	404
6. おわりに	437
謝辞	439

1 | はじめに

地震災害は自然が人類にもたらす災害の中でも予測が難しいものの1つである。そして、それは地震による外力が都市や建物の耐力を上回ったときに生じる。このことから、以下の3つの対策が重要となる。

- ・事前に被害が生じる可能性のある構造物などの耐力を知り、必要な対策を講じること
- ・不断の地震観測により被害をもたらすような地震の発生をいち早く検知し必要な警報を発令すること
- ・地震が収束したことを的確に判断するとともに被害発生の可能性の高い場所をいち早く知り、必要な確認や救助などを行うこと

これを言い換えると、地震とはどのようなものかを知り、地震が起きたことを少しでも早く知り、地震の収束とともにそれがどのような地震であったのかを知る、ということになる。この地震を知るための機械が地震計である。地震計は千年を遥かに超える昔から開発されてきた。

初期の地震計は、地震が起きたことを単純に知るだけのものではあったが、地震の大きさを記録し、地震の様々な情報が得られるように進化してきた。ダイナミックレンジ（観測範囲）や周波数領域の拡大、センサーやそのほかのデバイスの進化による観測装置の小型化や観測精度の向上、記録方法の変化による地震観測後の研究への貢献など、様々な研究開発や実用化が行われてきた。

「早期地震警報システム」が実用化される以前にも、地震災害から人命や財産を守るための警報を発する地震計は存在した。いわゆる従来型の警報地震計は、設置された場所で一定以上の地震動を検知してはじめて必要な情報や警報を発令するものであり、甚大な被害をもたらすような地震動が到来するまでの余裕時間は非常に限られていた。また、近くで起きた被害を及ぼすほどではない地震に対しても過剰に警報を出してしまうこともあった。このような従来型の警報地震計や地震警報の弱点を克服し、いち早く的確な警報を発令しようとするのが早期地震警報システムである。

つまり、早期地震警報システムは、長きにわたる地震計による地震観測や警報地震計による警報発令の経験を踏まえて、その結果知るに至った欠点を克服するために生まれてきたもので、けっして突然現れたわけではない。本報告では、まず地震計の開発史を辿り、どのように地震計が進歩してきたのか、あわせてどのように地震観測やその結果を用いた警報の研究

がなされてきたのかを紐解いた。次に、この地震計や地震観測技術の進歩の中から生まれたリアルタイム地震防災という新しい概念について紹介し、これが世界初の早期地震検知警報システム「ユレダス Urgent Earthquake Detection and Alarm System」として結実していく過程を、バックグラウンドとなる思想と背景技術の両面から詳細に説明した。また、早期地震警報システムはその後開発が進められ、リアルタイム地震防災から新しい地震動指標が生まれ、警報を発令するまでの時間の短縮や、国民への周知方法など、様々な発展をしたことについても具体的なシステムとともに説明した。

日本国有鉄道（現在の JR 各社、以下、国鉄という）は、大量の旅客や貨物を輸送する使命を帯びており、その安全と安定のために地震時の列車運行についても絶え間なく研究開発を行っていた。その成果として地震の P 波の段階での警報発令を可能とするシステムを世界で初めて実用に供した。早期地震警報システムの技術開発の歴史については、国鉄から JR のみならず、様々な機関で連綿と受け継がれ進められてきた成果が論文などとして残され、その多くを参照することができた。個別の内容についてはそれぞれの章で紹介した。

その後も、新しい早期地震警報システムに関する技術は、地震の多い日本で数多く開発され、実用化されている。本報告の後半では、国内外で実用化されたさまざまな早期地震警報システムを紹介し、いくつかの地震の際に早期地震警報システムがどのように動作したのかをあわせて紹介する。

有名な警句「天災は忘れた頃にやってくる」は、物理学者であり夏目漱石門下の名随筆家でもある寺田寅彦が 1934 年に書いた随筆「天災と国防」¹⁻¹⁾の一文に端を発している。

文明が進むほど天災による損害の程度も累進する傾向があるという事実を充分に自覚して、そして平生からそれに対する防御策を講じなければならないはずであるのに、それがいっこうにできていないのはどういうわけであるか。そのおもなる原因は、畢竟そういう天災がきわめてまれにしか起こらないで、ちょうど人間が前車の顛覆を忘れたところにそろそろ後車を引き出すようになるからであろう。

なお、寺田が直接この警句を書き記したわけではない。寺田門下の中谷宇吉郎は、中谷の随筆「天災は忘

れた頃来る」で、あたかも寺田の随筆の中の言葉であるかのように引用してしまったと述懐している¹⁻²⁾。

防災に携わる者はこの寺田の言葉を肝に銘じて、より安全な社会を構築することを目指していかなばならない。早期地震警報システムが人々の安全と安心に資することができるよう、今後も技術開発が進んでいくことを願う。

参考文献

- 1-1) 寺田寅彦：「天災と国防」，寺田寅彦全集，第九卷，岩波書店，144-154（1961）
- 1-2) 中谷宇吉郎：「天災は忘れた頃来る」，中谷宇吉郎随筆集，岩波書店，270-272（1988）

2 | 地震観測・強震観測の歴史

本章では、地震観測の歴史を地震計の開発や地震観測網の整備の観点から概括し、早期地震警報システムがなぜ必要になったのか、その必然性を説明する。このために、まず表 2.1 に地震観測の始まりから、地震

計の開発、発展、そして現在の早期地震警報システムの開発までの歴史を、地震にまつわる主な出来事と合わせてまとめた。

表 2.1 地震観測に関する歴史

132 年	張衡の候風地動儀 世界で初めての地震計 (感震器)
1868 年	サンフランシスコの医学博士クーバー (J. D. Cooper) による早期地震警報 (前線検知) のアイデア ²⁻¹⁾ ※
1872 年	米国の宣教師かつ開成学校の数学教師グイド・フルベッキ (Guido Verbeck) による振り子を用いた地震観測の試み (ただし成功したかどうかは不明)
1873 年	函館測候所が気象官署として最初の地震観測を開始
1875 年	内務省地理局が東京気象台創立 パルミエリ (Palmieri) 地震計による観測を開始
1880 年	(旧) 日本地震学会設立 ²⁻²⁾ 世界で初めての地震学会が日本で設立
1880 年	ユーイング・ 그레이の円盤地震計 1884 年の地震記録が現存
1883 年	그레이・ミルン・ユーイング地震計 水平動・上下動に合わせ時刻も記録できる最初の地震計 東京気象台のパルミエリの地震計を置き換えて標準地震計として設置
1887 年	東京気象台を中央気象台と改称
1891 年	濃尾地震 (M 8.0) 日本最大の内陸地震、地震断層や建築物の耐震などの研究に大きく影響した
1894 年	ミルン水平振り子地震計 (重要文化財)
1898 年頃	大森式長周期地震計 それまでの地震計は地震検知後に波形記録を開始していたが、ドラム状の記録紙に連続的に記録し、地震波形の全体を記録できるようにした
1904 年	ガリッチン地震計 世界初の電磁式地震計
1923 年	関東地震 (M 7.9) いわゆる「関東大震災」が発生
1923 年	ウッド・アンダーソン式地震計
1931 年	東京帝国大学地震研究所初代所長の末広恭二が米国で「Engineering Seismology」の講義 強震計の開発や地震工学という研究分野の成立に多大な影響を与えた 石本式加速度地震計 (上下動成分) それまでの地震記録は変位だったのを加速度にして大地震を記録することを目的とする地震計、水平動成分の記録用は 1933 年に開発された
1932 年	米国海岸地質調査所 (USCGS, United States Coast and Geodetic Survey) が世界初の強震計として USCGS Standard 型強震計を開発 1933 年にはロングビーチ地震で強震波形を記録 USCGS は現在の米国地質調査所 (USGS, United States Geological Survey)
1935 年	リヒターによるマグニチュードの定義 ²⁻³⁾ ウッド・アンダーソン式地震計の地震記録に基づきリヒターが今日まで使われているマグニチュードをはじめて定義
1948 年	福井地震 (M 7.1) 震度 VII が定義される
1950 年	50 型強震計設置開始 中央気象台 (現 気象庁) が全国で 100 台以上の統一した地震計による強震観測を始める
1953 年	標準強震計試作試験研究委員会による SMAC 型強震計の設計試作 日本初の標準強震計
1954 年	世界初の遅延磁気記録装置を東京大学地震研究所からの依頼で東京通信工業 (現 ソニー) がテープレコーダーを使った装置として完成 ²⁻⁴⁾
1956 年	気象庁が運輸省の外局として発足 中央気象台が気象庁に移管される
1959 年	南極の昭和基地における地震観測がはじまる ²⁻⁵⁾ 当初は短周期の萩原式電磁地震計のみの観測であったが 1966 年以後はプレス・ユーイング型長周期地震計も併設され、世界標準地震計観測網 WWSSN 相当の観測点となり、地震情報の提供も行われた

1960 年	日本国内の主要な地震観測記録を集成した強震年報（英語名 STRONG MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPAN）が刊行される ²⁻⁶⁾ 2023 年の記録をまとめた強震年報 64 号まで現在も刊行が続いている ²⁻⁷⁾ （2025 年現在）
1961 年	世界標準地震計観測網 WWSSN (World-Wide Standardized Seismograph Network) が、米国地質調査所 USGS と米国海軍、国防総省の支援により地下核実験探知を目的として構築開始
1964 年	東海道新幹線開業 この時点では通常の警報地震計による在来線と同様の運転制御
1972 年	伯野元彦（元東京大学地震研究所長）らによる「10 秒前大地震警報システム構想」 ²⁻⁸⁾ ※
1982 年	東北新幹線開業に伴い前線検知の実用システムとして海岸線検知システムが稼働※
1983 年	世界初の早期地震検知警報システム「ユレダス (UrEDAS, Urgent Earthquake Detection and Alarm System)」のプロトタイプを国鉄技術研究所（現 公益財団法人鉄道総合技術研究所）が完成させる ^{2-9)～2-14)} 、1984 年から試験観測開始※
1988 年	気象庁 87 型電磁式強震計による観測開始 気象庁による強震記録のデジタル化
1988 年	青函トンネル向け UrEDAS が震源推定用として稼働※
1990 年	東海道新幹線向け早期地震警報システムとして UrEDAS の限定利用開始※
1991 年	メキシコ市の早期地震警報システム SAS 試験稼働 ²⁻¹⁵⁾ ※ 1985 年のメキシコ地震で震源から約 350 km 離れたメキシコ市で被害が生じたことを受けて、日本以外では初めての 前線検知型の早期地震警報システムが稼働
1992 年	東海道新幹線のぞみ号運転開始に伴い東海道新幹線に対する UrEDAS の運用がはじまり、世界初の P 波地震警報が実用化される※
1994 年	東京ガスの地震時導管網警報システム SIGNAL が稼働 ²⁻¹⁶⁾ 兵庫県南部地震以前に構築された稠密な地震計展開による地震動モニタリングと被害予測システム
1995 年	兵庫県南部地震 (M 7.3) いわゆる「阪神・淡路大震災」が発生
1996 年	それまで人の感覚などで決定していた震度を 95 型計測震度計により機械計測化 ²⁻¹⁷⁾
	防災科学技術研究所による K-NET (Kyoshin NETwork, 現 全国強震観測網) 運用開始 ²⁻¹⁸⁾ 全国に 1,000 箇所以上の強震計を整備し地震観測状況および観測波形の公表。兵庫県南部地震以後に多数運用される ようになった地震観測網の代表的なシステム
	山陽新幹線向け UrEDAS 運用開始※
1997 年	東北・上越新幹線向け Compact UrEDAS の設置と仮稼働 1998 年から P 波警報の実用化※
	帝都高速度交通営団（現 東京メトロ）向け Compact UrEDAS 導入 2000 年に国鉄 (JR) 以外の鉄道に対する P 波警報のはじめての実用化※
2004 年	気象庁による緊急地震速報が一部機関に対して試験運用開始※
	新潟県中越地震 (M 6.8) 上越新幹線に設置された早期地震警報システム Compact UrEDAS の P 波警報により複数の新幹線列車が緊急停止 新幹線初の脱線が発生したが新幹線列車同士の衝突を防ぎ、死傷者もなし ²⁻¹⁹⁾ ※
2005 年	早期地震警報システム「フレックル (FREQL)」開発※ 機器の小型化などにより P 波警報装置としては世界で初めて災害現場でも使える可搬型も開発された
2007 年	緊急地震速報の一般向けの運用開始※
2011 年	東北地方太平洋沖地震 (M _w 9.0) いわゆる「東日本大震災」が発生

（表中の※は早期地震警報システムに関する事項）

なお、本表をまとめるにあたり、各項目に示した参考文献以外に地震計の開発については国立科学博物館、東京大学地震研究所、気象庁などによる資料^{2-20)～2-27)}を参考にした。また、東海道新幹線、東北・上越新幹線、青函トンネルなど、国鉄から JR にかけての一連の早期地震警報システムの開発については中村豊の論文^{2-28), 2-29)}を参考にした。

本章では表 2.1 にまとめたことを含めて地震観測や地震計開発の歴史を辿る。

2.1 地震とは何か

地震とは、地球内部の岩石の破壊点（震源）から様々な波動（地震波）が伝達される現象のことを言う。

地球は核の周りにマントルがあり、その周りをごく薄い地殻が覆っているような構造になっている。マントルは常に対流しており、この対流により地殻と上部マントルが一体になった複数のプレートが移動している。地震はこのプレートの運動により発生する事象であり、プレートの沈み込みにより引きずり込まれた陸のプレートが跳ね上がる海溝型のプレート境界地震や、プレート内にひずみが蓄積してプレート内の断層

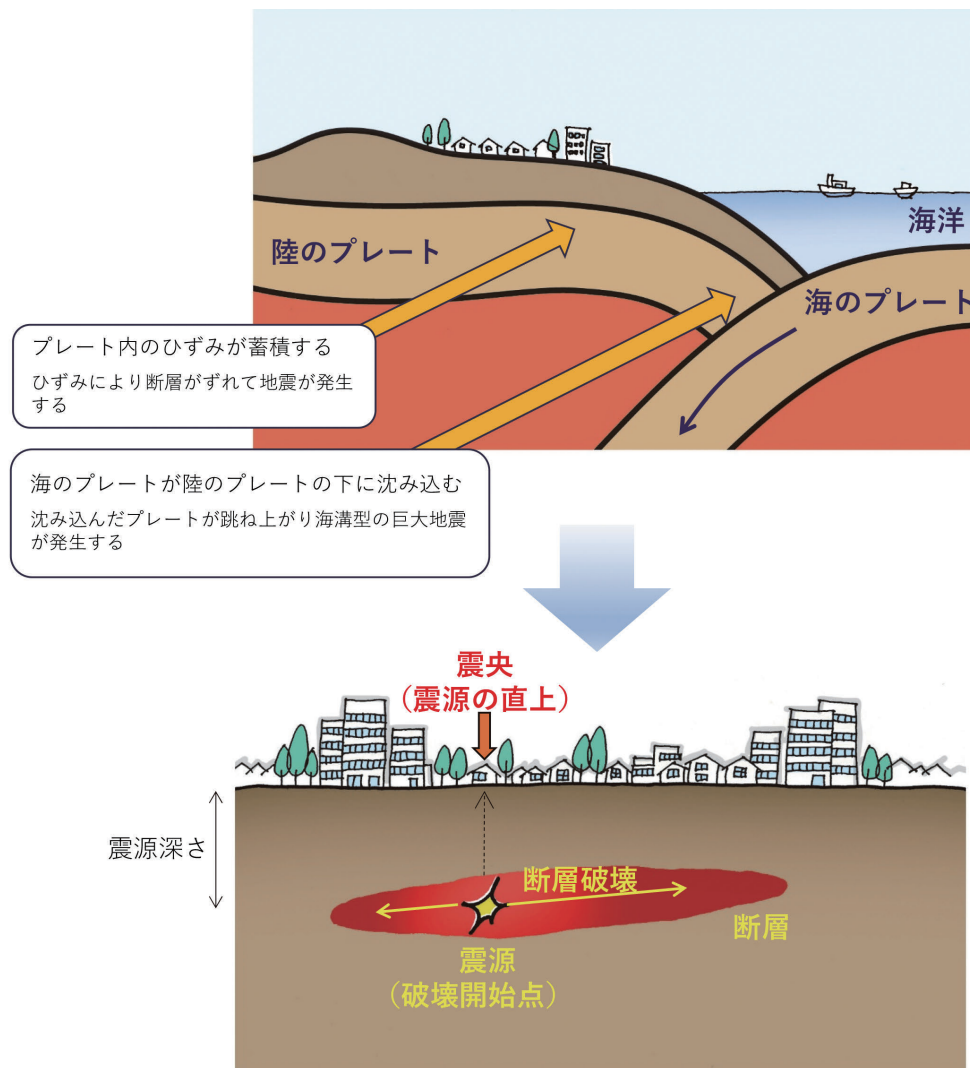


図 2.1 地震発生場所と定義 (提供：中村和延、謝辞参照)

がずれることで発生する活断層によるプレート内の地震と、発生のメカニズムが異なる地震がある。

特に日本は、海のプレートである太平洋プレート、フィリピン海プレートと、陸のプレートである北米プレート、ユーラシアプレートの境界に位置しており、日本で暮らすうえで「地震」は避けることのできないものである。

いずれにしても、地震は岩石の破壊により発生し、そこから多くの種類の波動が放出される。この波動を大別すると、地球を構成する岩盤そのものを伝わる実体波と、地表を伝わる表面波に分けることができる。地震が発生した時に最初に伝わることから“最初の”を意味するラテン語の“Primae”あるいは英語の“Primary”の頭文字をとったP波(初期微動)や、続いて到来する“第2の”を意味するラテン語の“Secundae”あるいは英語の“Secondary”の頭文字をとったS波(主要動)は実体波である。

P波は粗密波という媒質の体積変化が伝播する波動

(縦波)であり、S波はせん断波というずれが伝播する媒質の体積変化を伴わない波動(横波)である。媒質の変形をばねと同等に考えると、媒質が圧縮されたときの復元力は、せん断(ずれ)に対する復元力より大きいので縦波の方が速く伝播する。このため、P波が先に到来することになる。なお、粗密波は波動の進行方向と振動の方向が一致しているが、一般にP波は震源から地表の地震観測点に向かってはほぼ上昇波として入力されるため、地震動としては上下動が卓越した波動として観測される。

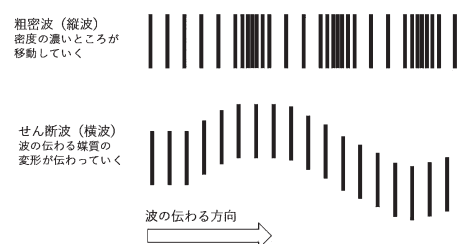


図 2.2 粗密波とせん断波 (筆者作成)

コラム 1：初期微動継続時間（S-P 時間）と震源距離の関係

地震波の伝播の様子を、震源から観測点までの距離と地震発生からの経過時間の関係として模式的に表すと図 C1.1 のようになる。

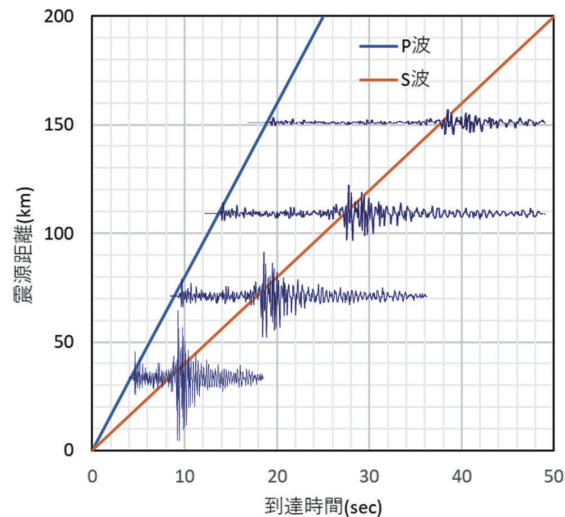


図 C1.1 地震動伝播のイメージ図（筆者作成）

この図からわかるように、震源（地震が発生した場所）から放出された地震波動は、遠くの観測点になるほどP波とS波の到達時間の差が大きくなる。このP波とS波の到達時間差を初期微動継続時間（S-P時間）といい、次式のように、初期微動継続時間に比例係数を掛けたものが、その観測点から震源までのおよその距離となることが知られている。このことは世界ではじめての地震学者大森房吉により提唱され^{C1-1}、この比例係数を大森係数という。

$$D = kT_{SP}$$

ここで、

D ：震源距離（km）

k ：大森係数（km/sec）

T_{SP} ：初期微動継続時間（sec）

である。

なお、大森係数は使用するデータの種類のによっていくつかの数値が示されている。大森が最後に発表した論文^{C1-2}では $k=7.42$ 、大森以外の研究者では、例えば和達清夫^{C1-3}は100 km以内の震源距離に対して $k=8.26$ 、Lay and Wallace^{C1-4}は経験的な目安として $k=8.0$ を示している。

また、大森係数を用いて震源距離を求めることは高校生などに対しても教科書で紹介されており、ここでも $k=8$ 程度の値が示されている^{C1-5}。

参考文献

- C1-1) 大森房吉：「地震ノ初期微動ニ關スル調査」，震災豫防調査會報告，29, 37-45（1899）
- C1-2) Omori, F.: "On the relation between the duration of the preliminary tremor and the epicentral distance for near earthquakes", Bull. Imperial Earthquake Investigation Committee, 9, 33-39（1918）
- C1-3) 和達清夫：「近地地震に就て」，験震速報，1, 126-143（1925）
- C1-4) Lay T. and T. Wallace: "Modern Global Seismology", Academic Press, 521（1995）
- C1-5) 加藤護，岡本義雄：「理科教育で用いられる距離に関する大森係数について」，地震，第2輯，第69巻，doi.org/10.4294/zisin.69.35, 35-39（2016）

なお、一般にP波はせん断を伴うS波に比べてエネルギーが少なく、被害を及ぼすことはほとんどないが、地震に関する情報が含まれていると言われている。一般的な警報地震計はP波に続くS波を観測し、その値が一定のレベルを超えることによって警報発令の判断を行っていた。このため、被害が起きるような地震動が到来するまでの時間的な余裕がないなどの課題があった。このことに鑑み、国鉄では鉄道輸送の安全を守るために、早期地震警報システムとして震源の近くで地震観測して警報を必要とする場所に通信で警報を伝達する方法(前線検知)や、さらに早い警報を実現するために、大きな地震動に先んじてP波に含まれる地震の情報をを用いて警報を出す方法(P波警報)を実用化することを目標として研究開発が進められた。

地震による建造物や施設などへの影響を知るためには、発生した地震の持つエネルギーや地震動を受けている場所や構造物の揺れの大きさを知ることが必要である。地震そのものの大きさをマグニチュードで表し、これに対して地震を観測した場所の揺れの大きさは震度など、必要に応じて様々な指標で表現されている。なお、マグニチュードの最大値は9程度で、日本の気象庁の定義した震度も最大値は7であるため、場合によっては混乱されていることがあるが、マグニチュードは地震の「出す」エネルギーで一つの地震に一つの値だけであり、震度などの指標は観測された場所に「来る」エネルギーとして様々な値をとる。以下に地震観測に関する様々な指標を説明する。

2.1.1 マグニチュード

地震の規模を表す指標がマグニチュードである。その定義に先んじて、中央気象台の和達清夫は日本の様々な観測地点の震央距離に対する地震記録の振幅をプロットし、地震の大きさをおおまかに比較していた²⁻³⁰⁾。次いで、この和達の論文をもとにカリフォルニア工科大学のチャールズ・リヒター(Charles Richter)は、1935年の論文²⁻³⁾で、震央距離100 kmの位置に置かれたウッド・アンダーソン式地震計で記録された変位波形の記録紙上の最大振幅をミクロン単位で読み取り、その常用対数をとった値をマグニチュードと定義した²⁻³⁾。もちろん必ずしも震央から100 kmのところには地震計があるわけではないが、和達²⁻³⁰⁾は震央距離と波形記録の振幅について詳細に検討していたため、リヒターは和達の成果により得られた式を用いてマグニチュードの算出方法を定めた。このリヒターによるマグニチュードは、提唱者の名前をとってリヒタースケール、あるいは近地の地震を対象

としていることからローカルマグニチュード M_L と呼ばれることもある。このマグニチュードという指標が導入されたことで、地震の大小の目安になる尺度がわかりやすい形で得られるようになった。

なお、リヒターはマグニチュードを定義した論文²⁻³⁾で、マグニチュードは地震そのもののエネルギーで、観測点における地震動の大きさを示す震度とは違うものであることを明記している。前述のように、現代においてもマグニチュードと震度は混同されがちであることを先取りしているように見えるのが興味深い。

また、リヒターのマグニチュードはカリフォルニアの地震記録から導かれたものであったが、遠くで発生した地震波の中で地球の表面を伝わってくる表面波に着目した表面波マグニチュード M_S 、地球の深い場所で発生した地震では表面波が発生しにくいいため地球内部から伝わってくる実体波を使った実体波マグニチュード m_b も定義された。さらに、日本国内では、気象庁が日本国内の地震観測結果から導き出した気象庁マグニチュード M_{JMA} を定義している。

このようなマグニチュードには巨大地震では値が飽和してしまう問題があった。これに対して、カリフォルニア工科大学の金森博雄(Hiroo Kanamori)により断層運動としての地震のエネルギーに着目したモーメントマグニチュード M_W が提唱され²⁻³¹⁾、現在では世界的に広く使われるようになった。ちなみに「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」のマグニチュードの気象庁発表値は M_{JMA} が7.3に対して M_W は6.9である。これに対して「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」のマグニチュードの気象庁発表値は M_{JMA} が8.4に対して M_W は9.0となっている。

2.1.2 震度

マグニチュードは地震そのもののエネルギーを表す指標で、一つの地震に対して一つの値となる。これに対して、震度は地震動を観測した地点の揺れの大きさを表す指標で、いくつかの階級(震度階級)として示される。日本における震度階の始まりは、1884年に関谷清景らが地震被害報告の手順を定めた「地震報告心得」で定めた「中央気象台震度階」である。これがいくつかの地震を契機として見直され現在の震度階となっている。表2.2に震度階の変遷を示す^{2-32)~2-35)}。また、中央気象台の震度階とは別に、1898年には大森房吉により、加速度の値により0~7の8段階に区分した「絶対震度階」も作られている。

なお本表に示すように、震度階の値は1936年の定義ではローマ数字、1996年の定義ではアラビア数字

表 2.2 日本における震度階の変遷

制定年	震度階
1884	微、弱、強、烈
1898	微(感覚なし)、微(感覚あり)、弱(弱き方)、弱、強(弱き方)、強、烈
1936	無感、Ⅰ微震、Ⅱ軽震、Ⅲ弱震、Ⅳ中震、Ⅴ強震、Ⅵ烈震
1949	無感、Ⅰ微震、Ⅱ軽震、Ⅲ弱震、Ⅳ中震、Ⅴ強震、Ⅵ烈震、Ⅶ激震
1996	0、1、2、3、4、5弱、5強、6弱、6強、7

となったため、本稿でもそれに従う。中央気象台震度階は1898年には微震と弱震に「(弱き方)」を追加して細分化され、1908年に大森は具体的な被害などとの対比によりこれを解説している。その際に、その当時海外で使われていたロッシ・フォーレルの震度階は西洋の家屋に対する被害をもとにしたものであり、日本とは家屋の造りが違うので援用することができないと述べている²⁻³⁶⁾。その後、1936年には震度をⅠ～Ⅵと階級で表すようになり、さらに1948年の福井地震(M 7.1)の大被害をもとに震度Ⅶが定義された。なお、1995年以前は基本的に気象台などの人間の感覚や実際の被害の程度により震度階級が定められていたため、震度を地震後に迅速に公表することは難しかった。とくに、福井地震をきっかけに定められた震度Ⅶは、実際の被害調査により判定するように定義されたため、例えば1995年の兵庫県南部地震の際に震度Ⅶを観測したと最初に発表があったのは地震から3日過ぎた1月20日であった。この1995年の兵庫県南部地震をうけて1996年4月から震度の機械計測化がはじまり、それ以前の震度に対して計測震度と呼ばれるようになった。この計測震度は、計測震度計と呼ばれる地震計で観測された加速度記録から算出され、その計算方法は1996年2月の官報第1831号の気象庁告示²⁻³⁷⁾で示された後、気象庁により、書籍²⁻¹⁷⁾やウェブサイト²⁻³⁸⁾で公開されている。また、地震発生後に気象庁から発表される震度階級は計測震度から換算されたもので、表2.3のように対応している。

計測震度や震度階級は日本独自の指標であり、性能を統一した計測震度計により気象庁をはじめとして各

表 2.3 計測震度と震度階級の対応

震度階級	計測震度	震度階級	計測震度
0	0.5 未満	5 弱	4.5 以上 5.0 未満
1	0.5 以上 1.5 未満	5 強	5.0 以上 5.5 未満
2	1.5 以上 2.5 未満	6 弱	5.5 以上 6.0 未満
3	2.5 以上 3.5 未満	6 強	6.0 以上 6.5 未満
4	3.5 以上 4.5 未満	7	6.5 以上

種研究機関、全国の自治体によって世界に類がないほど稠密に計測されている。地震が発生すると震度は気象庁から一括して発表され、地震の揺れの大きさを示す指標として最も身近なものとなっている。なお、2.6.2で気象庁の地震観測の歴史を紹介する。

世界に目を向けると²⁻³⁹⁾、1780年代にイタリアの物理学者ドメニコ・ピニャターロ(Domenico Pignataro)が過去の1,181回の地震を見直して、slight、moderate、strong、very strongの4段階の震度階としたのが、世界ではじめての震度階といわれている。これにはさらに、1783年のカラブリア地震によりviolentという階級が追加された。1828年にはピーター・イーゲン(Peter Caspar Nikolaus Egen)が6段階の震度階を定め、震度の最大のものの中心を地震が発生した地点とした。現代の震度階は、1883年にイタリアのミケーレ・ロッシ(Michele Stefano Conte de Rossi)とスイスのフォーレル(François-Alphonse Forel)による震度階(10段階)が世界で広く使われるようになったのが始まりといわれる。これがイタリアのジュゼッペ・メルカリ(Giuseppe Mercalli)により1902年に12段階に拡張されたものがメルカリ震度階である。これが1956年に修正され、米国で標準的に使われている改正メルカリ震度階(MMI, Modified Mercalli Intensity)やヨーロッパで使われているMCS(Mercalli-Cancani-Sieberg)震度階となった。この他にも、1964年に定義された12段階のMSK(Medvedev-Sponheuer-Karnik)震度階があり、ロシアなどのCIS諸国や、東欧諸国、イスラエル、インドなどで使われている。このように、日本以外の国々では異なる震度階が用いられている。なお、これらは基本的に計測震度以前の日本の震度のように、実際の地震被害や人間の体感により定義されている。

ちなみに、建築構造学者の佐野利器が「家屋耐震構造論」^{2-40), 2-41)}で定義した「震度」は建物に作用する地震力として定義した耐震設計に用いる指標であり、これまで紹介した震度とは違うことに注意が必要である。

2.1.3 加速度、速度、変位

日本では地震観測における加速度の単位として主としてガル(Gal)が用いられる。これは、1604年に「加速運動について」を書いたガリレオ・ガリレイ(Galileo Galilei)の名に由来²⁻⁴²⁾する単位であり、SI単位系では cm/sec^2 となる。地震の揺れの大きさを示す以外では利用されることの少ない単位でもあり、重力加速度1 Gは、980 Galとなる。特に構造物に対する被害との関係が強く、各種工場や鉄道、発電所、道路、港

湾等々多種多様な施設において、地震の揺れの大きさを示す指標や地震警報のトリガーとして利用されている。なお、加速度は世界的に見ると重力加速度を単位として、例えば 98 Gal だと 0.1 G あるいは 10 %G のように表されることが多い。

地震の揺れの大きさを速度で示す場合は、カイン (kine) という単位が使用される。SI 単位系では cm/sec である。2.1.4 で説明する SI 値でも同じ単位が使われるため混同される場合があり、注意が必要である。

また、初期の地震計で観測された波形は変位波形であったため、変位も地震の観測に多く用いられてきた。例えば、前述のようにマグニチュードの最初の定義も変位量をミクロン単位で読み取ったものを使っている。多くの場合 cm 単位で計測される。

加速度、速度、変位は地震計のセンサーの種類や特性を調整することで観測することができ、加速度は強震動など構造物に対する慣性力との相関が高く比較的短い周期の帯域に対応する。これに対して速度は比較的長い周期の地震動に対応しており長大構造物や高層建築の被害との関係があり、地球物理的な研究に用いられる広帯域地震計も速度計である。さらに変位は地殻の変動など、地球そのものの変形に対する研究などに用いられる。

2.1.4 SI 値

SI 値 (スペクトル強度, Spectrum Intensity) は、1961 年に米国の地質学者ジョージ・ハウスナー (George W. Housner) により提唱された、地震動による構造物の揺れやすさを示す指標である²⁻⁴³⁾。単位は、先の速度と同じカイン (kine) が用いられる。地震動を、周波数に対応して図示した速度応答スペクトルとして考えたときに、固有周期 (個々の構造物の持つ揺れやすい周期) が 0.1 秒～2.5 秒の間にあることか

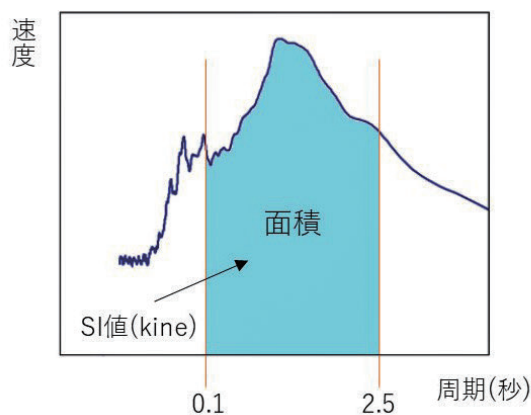


図 2.3 SI 値 (スペクトル強度) の概念図
(筆者作成)

ら、この周期の範囲の速度応答スペクトルの平均値を SI 値として定義した。具体的には、図 2.3 に示すように速度応答スペクトルの周期 0.1 秒～2.5 秒の面積を 2.4 で割った値 (周期 0.1 秒～2.5 秒の平均値) となる。現在は、ガスや鉄道などの社会基盤で利用されている。

2.1.5 リアルタイム震度 (RI)

リアルタイム震度 (RI)^{2-44), 2-45)} は、2003 年に中村豊により計測震度相当値をリアルタイムに把握できる指標として提唱された指標であり、リアルタイム震度の英語表記 Real-time Intensity の頭文字から RI と呼ばれる。地震動の仕事率に関する物理量 DI (Destructive Intensity)²⁻⁴⁶⁾ から算出される RI は、地震の揺れの最中でもリアルタイムに計測震度相当値を得ることができる指標である。それまで震度階級を求めるには、定義上、地震終了後の観測波形が必要であったが、RI を用いることで直ちに (サンプリング周期が 0.01 秒であれば 0.01 秒ごとに) 震度階級相当の値を知ることができるようになった。なお、計測震度は体感をもとに数値化したものであるのに対し、RI は地震動の仕事率に関する物理的意味のある指標であることも大きな違いである。

図 2.4 は、リアルタイム震度 (RI) と気象庁による計測震度の関係を示したものである。RI と計測震度との差が平均 0.05、標準偏差は 0.134 と相関が高い²⁻⁴⁴⁾ ことから、地震検知とともにリアルタイムに計測震度相当値を得られる指標として、工場や鉄道の他、多種多様な分野で利用されている。

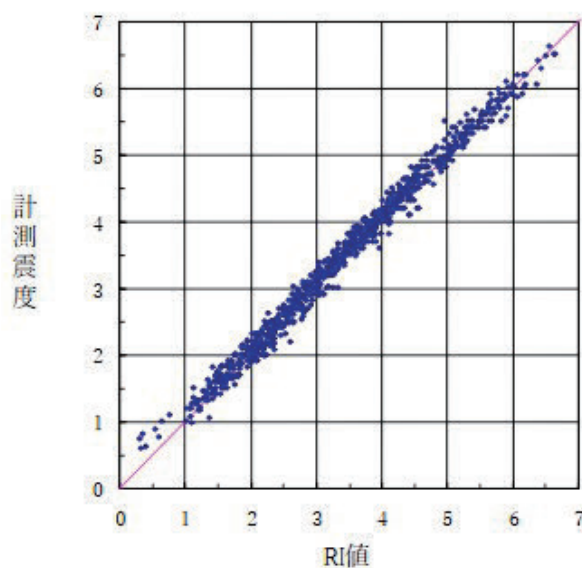


図 2.4 リアルタイム震度 (RI) と計測震度の関係²⁻⁴⁴⁾
(掲載許諾)

コラム 2：中村のひとりごと～地震動のエネルギーを別のものに例えと～

リアルタイム震度 (RI) は、地震動の持つエネルギー供給能力を数値化した物理的な指標である。このエネルギーは瞬時値として与えられているので、これをワット (W) の単位で考えてみる。1 W は 1 J のエネルギーを 1 秒間で使う仕事率なので、

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/sec} = 1 \text{ Nm/sec} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/sec}^2 \times 1 \text{ m/sec}$$

となる。このとき単位質量当たりの仕事率を PD (W/kg) と定義する。

ここでリアルタイム震度 RI は

$$RI = DI + 2.4$$

と定義されており、 DI は加速度 (cm/sec^2) と速度 (cm/sec) の内積の対数である。ここで DI の単位を ($\text{cm/sec}^2 \times \text{cm/sec} = 10^{-4} \times \text{m/sec}^2 \times \text{m/s}$) と変換して単位系を MKS 単位系にそろえると、

$$DI = \log PD + 4$$

$$RI = \log PD + 6.4$$

となる。

ここでリアルタイム震度 $RI=6.4$ の地震動を考えると、 $PD=1 \text{ W/kg}$ に相当することがわかる。さらに、位置エネルギー E (J) は、 m : 物体の質量 (kg)、 g : 重力加速度 (約 9.8 m/sec^2)、 h : 高さ (m) とすると、

$$E = mgh \text{ (J)}$$

と表される。高さ $h=E/mg$ と変形すると、単位時間あたりに供給されるエネルギーは 1 J/kg なので $E/m=1$ から $h=1/9.8$ となり、地震動を受けている物体を約 10 cm 持ち上げるエネルギーとなる。

また、同じく震度 6 弱 ($RI=6.4$) の地震動が単位時間あたり 1 W/kg のエネルギーとなることを電球のワット数として考えると、体重 60 kg の人がこの地震動を受けることは、60 W の電球を光らせるエネルギーを受けていることに相当する。

この地震動のエネルギーは、震度が 1 小さくなるとおおよそ $1/10$ となる。たとえば震度 4 ($RI=4.4$) の場合は震度 6 弱の $1/100$ になり、約 1 mm の位置エネルギーにしかない。もちろん地震動の継続時間が長くなると供給されるエネルギーは大きくなるが、 $RI=4.4$ の地震動が 100 秒継続したエネルギーが $RI=6.4$ の地震動が 1 秒継続したエネルギーに相当するので、いずれにしても震度 4 の場合は被災の可能性が低いことがわかる。このことから、いたずらに震度の大きさだけを気にするのではなく、地震防災の基本は建物などの耐震化であることをはっきりと認識し、想定される地震動に対応することが重要であることがわかる。

このように、地震動を位置エネルギーや電球の光に例えて考えてみると、地震動の持つエネルギーを別の視点からイメージすることができて面白いのではないだろうか。

2.1.6 リアルタイム震度(防災科研方式)

2006 年に、功刀卓らによって新たに発案されたリアルタイム震度^{2-47), 2-48)}は、2.1.5 のリアルタイム震度 (RI) と同様に、気象庁の計測震度相当値を高い精度でリアルタイムに算出可能な指標である。なお、本報告書では、2.1.5 のリアルタイム震度 (RI) と区別するため、この震度を、功刀らが所属する国立研究開発法人防災科学技術研究所の略称を用いてリアルタイム震度 (防災科研方式) と呼ぶ。

リアルタイム震度 (防災科研方式) は、時間領域で定義された近似フィルタを利用する数値処理によって、随時計測震度相当値を算出する。その精度は、99 % の確率で ± 0.15 以内に収まり、その標準偏差は

0.058 程度となる。

この指標は、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET および KiK-net のほか、気象庁の震度計にも実装されており、緊急地震速報の PLUM 法 (5.1 参照) でも利用されている。また、防災科学技術研究所のウェブサイト上で公開されている「強震モニタ」(図 2.5)²⁻⁴⁹⁾や WEB サービス上での天気・ニュースサイト、スマートフォンアプリでも活用が広がっている。このような有用性に鑑み、このリアルタイム震度 (防災科研方式) は、2023 年度日本地震学会技術開発賞を受賞している²⁻⁵⁰⁾。

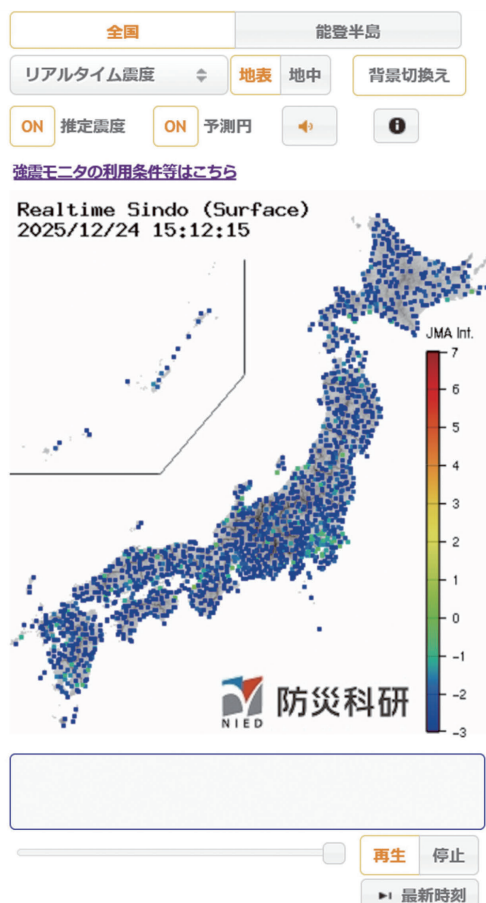


図 2.5 強震モニタ²⁻⁴⁹⁾ (掲載許諾)

2.2 地震観測のはじまり

2.1 で述べた地震そのものを観測し様々な指標を与える観測機器が地震計である。地震計の嚙矢といえ、後漢書の張衡列伝²⁻⁵¹⁾にみられる後漢の張衡が132年(陽嘉元年)に考案した候風地動儀であろう。この観測器の実物は残されていないものの、張衡列伝には簡単な構造が述べられており、意識すると以下のようになる。

本体は銅で鑄造されており、その直径は約184 cmで蓋の部分が隆起した酒樽のような形をしたものに彫刻が施されており、その内側の中央には柱があり八方向に支柱が伸びて大きな音が出るようになっている。外側にはこれに従って八つの龍が銅の球を咥えており、下には大きな口を開けた蟾蜍があり、この球を受けるようになっている。この樽状の内部には精巧なからくりがあり、地震を検知すると竜が球を吐いて蟾蜍がこれを咥え、その時に大きな音がして周りの者が地震に気づくようになっている。

この記述に基づいて多く再現模型が作成されており、国立科学博物館などに収蔵されている(図 2.6)。

また後漢書の張衡列伝には、この八龍のうち一龍の

みが大きな音を出したもののほかは動かず、これにより地震の起きた方向を知ることができる。実際に、候風地動儀から大きな音がしたのに震動を感じなかったことがあり、これを都ではおかしいと思っていたが、数日後に駅伝の早馬でその方角で地震があったことを知り、これ以降は役人に地震の方向を記録させるようになったという逸話が残されている。

これに対して近代的な地震計は、明治時代の日本において、いわゆるお雇い外国人として日本に来ていたジョン・ミルン(John Milne)、ジェームス・ユーイング(James Ewing)、トマス・グレイ(Thomas Gray)らによって開発された。ミルンは鉱山・冶金、ユーイングは機械工学、グレイは通信工学と、地震の専門家として来日したわけではない彼らが1880年の横浜地震(M 5.5 ~ M 6)などに触発されて日本で地震の研究をはじめ、世界で初めての近代的な地震計の開発や、世界で初めての地震学会である日本地震学会を1880年に設立した²⁻²⁾ことは、諸外国に比べて日本がいかに地震の多い国であるか、そして外国人技術者にどれほどのインパクトを与えたかを示しているようで興味深い。なお蛇足ではあるが、この日本地震学会はその後



(a) 国立博物館所蔵の再現模型
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)



(b) 株式会社システムアンドデータリサーチ所蔵の再現模型
(中国国家地震局から寄贈)

図 2.6 候風地動儀の再現模型



図 2.7 ミルンの水平振り子地震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

震災予防協会などへと発展的に解消されているため、現在の日本地震学会とは別の組織である。地震計については、グレイは上下動を振り子によって記録する地震計を開発し、ユーイングは水平動を記録する振り子にグレイの上下振り子を改良して加え、煤を塗布した円盤に地震波形を記録する地震計を 1880 年代の初めには開発していた。この地震計により 1884 年に観測された地震波形が残されている。さらにミルンらにより地震波形にあわせて時刻を記録することができるグレイ・ミルン・ユーイング地震計が 1893 年に開発され、その性能が認められて東京気象台に設置されることになった。なお、ミルンによって作られた水平振り子地震計は重要文化財となっており、国立科学博物館に実物が収蔵されている (図 2.7)。

2.3 地震計のしくみ

前述した候風地動儀は、地震の発生を知ることはできても、その大きさや地震波形などを記録することができない。このような観測器は感震器と呼ばれ、現在でも使われている例として、ガスメーターなどで使われている固定された球が振動により落下することで地震を検知する落球式地震計がある。これに対していわゆる地震計は地震の波形や時刻などの記録ができるものをいう。

ここで、簡単に地震計の原理を説明する。地震動により地上の物体はすべて動いてしまい、単純に記録することはできない。この動きを記録するための工夫として、最初期の地震計は観測しようとする地面の動きに対して十分重いおもりがばねで支えられている振り子構造としている。地震動で地面が動き出してもおもりは慣性の法則に従って静止したままとなり不動点とみなすことができる。さらに、その後に続く地震動に

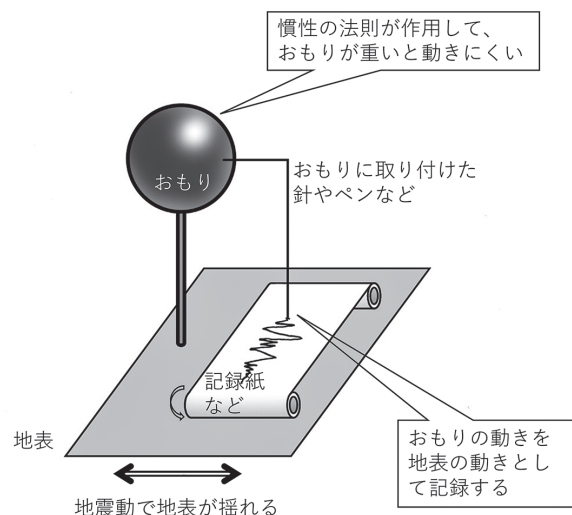


図 2.8 地震計の動作原理のイメージ
(提供：中村和延、謝辞参照)

より動き出した振り子を止めるために減衰器も取り付けられている。振り子のおもりの重さやばねの特性、減衰特性を適切に設定することで、対象とする地震動を地表面に対する振り子のおもりの相対的な動きとして記録しようとするものが最初期の地震計であった。この地震計の動作原理のイメージを図 2.8 に示す。また、動作原理を上下動と水平動に分けてアニメーションでわかりやすく解説したものが、国立科学博物館の WEB サイト「地震資料室」²⁻⁵²⁾で公開されている。

また、さらなる工夫として、微細な地震動を記録するために、てこなどを用いて振り子の動きを拡大することや、機械的な摩擦を避けるため、動きを光学的に拡大することも行われていた。

観測された地震動を記録する方法は、煤をつけた用紙の上に細い針で記録することで接触部の摩擦を極力減らすものが一般的であった。この針と用紙の間の摩擦をなくすため、針の代わりに光源を置き感光紙に記録するといった工夫がなされてきた。前述のミルンの地震計は、暗箱の中に石油ランプの光源と印画紙を置いて地震の波形を記録する地震計となっている。さらに、地震計の機構そのものを暗室内に設置するものもあった。このような地震動を物理的にセンサーから取り出す機械式地震計に対して、次の世代の地震計として、おもりを磁場の中で動かし、その動きの大きさを電気的に取り出す電磁式地震計がロシアのボリス・ガリツチン (Boris Golitsyn) により 1904 年に開発された (図 2.9)。

電磁式地震計は、てこなどの機械的な機構を用いなくても電気的に出力を拡大することができるので、その出力をペンの動きに変換して記録紙に描くことや磁

気テープに記録することが可能になった。

ここまで述べた地震計は、地震動を検知するセンサーとして振り子を利用しているが、これ以外にも様々なセンサーがある。それらの種類と特徴を表2.4にまとめる。

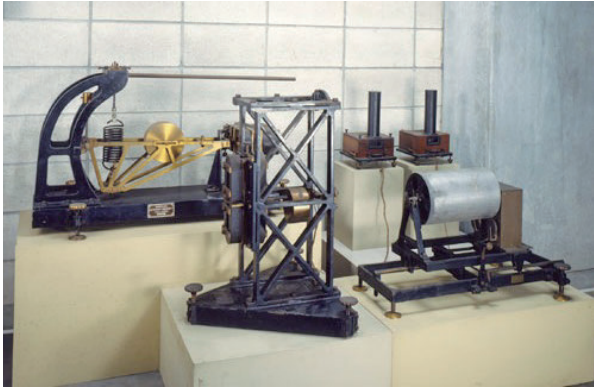


図 2.9 ガリツチン式地震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

表 2.4 主要な地震計のセンサー

種類	構造および特徴
落球式	受座の上に鉄球などが乗せてあり、一定の加速度で鉄球が落ちるように、受け座の寸法と鉄球の径を調整している。落ちた鉄球がマイクロスイッチなどを押すことにより地震発生を知らせる。候風地動儀もこの方式ということができる。
振り子型	おもりをばねまたは支点で支え、地面の動きと慣性質量の相対変位を測定する。いわゆる地震計で最初に開発されたのはこのタイプである。なお、倒立振り子に適切な減衰器を組み合わせ、一定レベルの地震動で振り子がスイッチを動作させる、記録の残らない簡易的な感震器もある。
トーションバー型	トーションバー（ねじれ棒）とおもりで構成されており、地震で動いたおもりによってトーションバーに生じたねじれにより地震を観測する。最初のマグニチュードを決めるのに使われたウッド・アンダーソン式地震計もこのタイプである。
電磁誘導型 (ムービングコイル型)	筒状の磁石の中でコイルが動くことで、電磁誘導により発生した電流を記録するもので、堅牢かつ単純な構造であり、センサーそのものには電源が必要ないシンプルなものである。ジオフォンともいわれ、通常の地震観測以外にも地盤の探査などにも使われる。
サーボ型	センサー内で振り子のおもりが動こうとするのを、電氣的に静止状態を保たせるように（帰還するように）制御するもので、この制御に使うフィードバック回路（負帰還制御回路）の出力を記録するものである。おもりを動かさないようにするため振り子が振り切れず、ダイナミックレンジ（測定範囲）を広げやすく、また長周期まで観測できるという特長がある。
静電容量型	コンデンサの電極のうち一方を可動にし、地震動により静電容量が変化するのを記録するものである。超小型軽量かつ低消費電力なので、近年は半導体センサ（MEMS 型センサ）として安価なものも開発されており、機器への組み込み用としても使われている。
圧電型	圧電素子とおもりを組み合わせて、おもりの動きを記録する。電氣的なノイズが少なく地震動への応答が早いという特長がある。
レーザー干渉型	レーザー反射光の干渉を利用して高精度に変位を計測する。地殻変動の検出などに利用される。
光ファイバー型	光ファイバー内のレーザー光の散乱パターンが、地震動によりファイバーが変形することで振動を検出する。海底での地震観測などに使われる。
超電導重力計	重力計のセンサーを超電導磁場内で磁気浮上させ、微小な重力変化で地震をとらえるものである。南極における地震観測にも使われている。
傾斜計	水柱の高さの変化などで地盤などの傾きを計測する。非常に長周期の地震動や地殻変動をとらえることができる。
ひずみ計	2点間をつなぐ棒の動きなどから、地殻のひずみ量など、微小な変動をとらえ活断層の監視などに利用するものである。
周波数変化型	センサー素子（例えば水晶など）をばねとして共振周波数を計測し、地震動により素子が変形して周波数が変化することにより加速度を検出するものである。素子に音叉構造を用いることにより、高い安定性と高分解能なセンサーとなっている。

コラム 3：ウッド・アンダーソン式地震計とマグニチュード

ウッド・アンダーソン式地震計は 1923 年に開発されたねじれ振り子を使った地震計で、南カリフォルニアの 5 箇所の地震観測所に設置されて震源決定に用いられていた。この地震計はすべての機器を暗室に収めて光学的に記録する非常に大掛かりな地震計であった（図 C3.1）。この地震計は、周期 0.8 秒、減衰定数 0.8 という特性を持っており、観測された変位波形を倍率 2,800 倍に拡大して記録する。

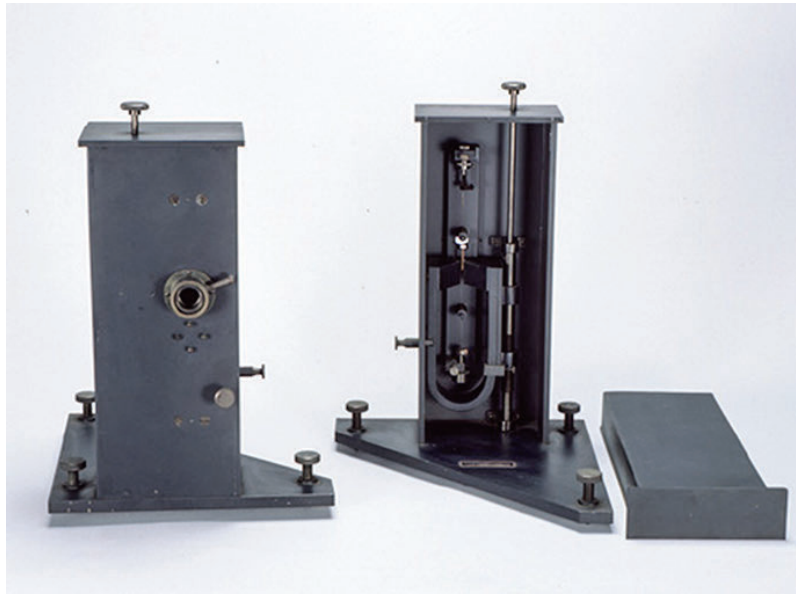


図 C3.1 ウッド・アンダーソン式地震計（国立科学博物館から許諾を得て掲載）

1935 年にカリフォルニア工科大学のチャールズ・リヒター（Charles Richter）は地震の大きさを示すマグニチュードを初めて定義した^{C3-1)}。その研究に用いた地震計がこのウッド・アンダーソン式地震計であり、現在も使われているマグニチュードの原点ともいえるのがこの地震計である。

参考文献

C3-1) Richter, C.: "An instrumental earthquake magnitude scale", Bulletin of the Seismological Society of America, 25 (1), 1-32 (1935)

2.4 地震計の観測特性や記録方法

地震動は幅広い周波数帯域の波動から構成されており、またその大きさも場合によっては重力加速度 (1 G) を大きく超える。このような地震動の姿をすべて記録することは、特に地震観測の初期においては非常に難しかった。地震計のおもりを十分に重くした場合は大きな地震動でも振り切れない地震計となるが、構造が大きくなり製作が難しく、多く発生する小さな地震動を記録することができないという問題点があり、ほとんどの場合はそこまでおもりを重くすることができなかった。例えば、1923 年の関東地震の際には震源に近い観測所では記録が振り切れてしまってい

る。一方記録の残された著大な加速度記録としては、近年の地震では、1985 年にカナダのナハニ (Nahanni) 地震 (M_s 6.9) の際に観測された 2.4 G や 1994 年に米国のノースリッジ (Northridge) 地震 (M_w 6.7) で観測された 2.3 G などがある。なお、2.1.3 で述べた通り日本では加速度の単位として Gal が用いられることが多いが、海外では重力加速度 G を単位とすることが多いため、ここではそれに倣っている。前者は記録紙上ではスケールアウトした記録からの推定値であり、後者は構造物上の記録であるため地盤上よりも大きな値になったものと考えられるが、ともに重力加速度の 2 倍以上の値が記録されている。日本国内においても、1993 年北海道南西沖地震の余震観測のために仮設した地震計で最大余震 (M 6.5) の際に 1,574 Gal、

1994年北海道東方沖地震(M 8.2)の際にJR 北海道の厚岸駅において926 Galといった大きな加速度が記録されている。

このような状況に鑑みると、地盤上と構造物上での想定すべき最大値は異なるであろうが、よく使われていた1 G フルスケールの記録範囲では明らかに不十分であることがわかる。このため、たとえば兵庫県南部地震の後に防災科学技術研究所が全国に1,000 台以上設置したK-NETの強震計では設置当初から2 G フルスケールとなっている²⁻¹⁸⁾など、現在使われる強震計では巨大な地震動に対応したダイナミックレンジ(観測範囲)となっている。

初期の地震計は、地震波形の記録を、煤をつけた円盤や用紙の上に細い針で描く、印画紙の上に光学的に描く、また電気信号に変換してペン書きするなど、線描して残していた。後の研究者はこれをデジタルデータに変換して解析してきた。しかし、時代が進むにつれてこのようなアナログな波形記録から、直接波形をデジタル記録できるように改良されていく。

世界ではじめてのデジタル記録収録できる地震計は、1976年に米国のKinematics社で開発されたDSA-1 型強震計といわれている²⁻⁵³⁾。この地震計は、地震動を200 Hz サンプリングで12 bit のデジタルデータとして、デジタルカセットに最低でも23 分間記録することができる。なお、この他にも地震トリガー前の波形を記録するため、2.53 秒のプレイベントメモリが追加ボードとして提供されており、2 枚まで組み込むことができるようになっている。図2.10に国立科学博物館が所蔵している米国Kinematics社製DSA-1 型強震計の外観を示す。

このように12 bit の分解能で始まった地震計のデジタル記録であるが、その後14 bit、16 bit とその精度が向上していく。日本では、気象庁83 型強震計はアナログとデジタルの両方で地震波形を記録し、その

A/D 変換器は12 bit のものが採用された。続いて開発された87 型強震計はデジタル記録のみとなり、その分解能は16 bit と向上した。

この当時のデジタル化した地震波形はカセットテープに記録するのが主流であったが、駆動部分の故障も多かった。そこで国鉄の中村らは、代わりに家庭用のVTR レコーダーでより多くの情報量を記録し、なおかつ故障時に交換が容易になるようにすることを考えた²⁻⁵⁴⁾。家庭用VTR レコーダーを改造せずに使うため、地震波形をPCM 方式によるパルス列として標準テレビ信号に重畳させて、12 bit の分解能で記録するというものであった。黎明期の地震記録装置として非常に面白いものである。

その後、1980 年代ごろからはさらに高性能なA/D 変換器として $\Delta\Sigma$ 変調を用いたものが使われるようになってきた。なお、この $\Delta\Sigma$ 方式のA/D 変換器は世界で非常に広く使われているが、基礎となる理論は東京大学の大学院生だった安田靖彦が1960 年代に考え付いた日本発祥の技術である^{2-55), 2-56)}。この $\Delta\Sigma$ 方式のA/D 変換器により現在では24 bit の分解能を持つ地震計が主流になっている。

観測された地震波形を使って、地球そのものの構造や震源域の特性、波動の伝播特性、観測点周辺の表層地盤の特性、そして構造物そのものの振動特性など、さまざまな分野の研究が行なわれており、また警報発令もされている。これらの研究や警報の対象により対応する周波数帯域は異なっているので、幅広い周波数帯域を記録できるようにすることが理想ではある。しかし、例えば構造物によって振動しやすい周波数があり、そこに合わせて帯域を設定することが一般的である。

観測する周波数帯域については、旧来のアナログ記録方式の場合は通常0.1 Hz ~ 20 Hz 程度が一般的であり、これがデジタルで記録されるようになり0.03 Hz ~ 25 Hz 程度まで帯域が広がった。しかし、原子力発電所などの耐震設計の場合は50 Hz 程度までの記録が必要とされるようになってきた。これに合わせ、現在の地震計では50 Hz 程度まで観測可能なセンサーが主流となってきた。当然、分解能とも相まって、波形のデータ量が膨大になり、遠隔地から波形を自動転送する際の転送時間や帯域の問題も考慮する必要がある。

地震の震源における破壊運動、いわゆる震源過程を明らかにする研究の一環として、地震観測に96 dB 以上の分解能で0.1 Hz ~ 200 Hz までの広帯域の観測が可能な地震計を用いて地震観測を行った研究²⁻⁵⁷⁾では、この地震計と通常の30 Hz までの地震計の観測記録とを比較して、最大加速度が上下動では1.8 倍~ 3 倍、

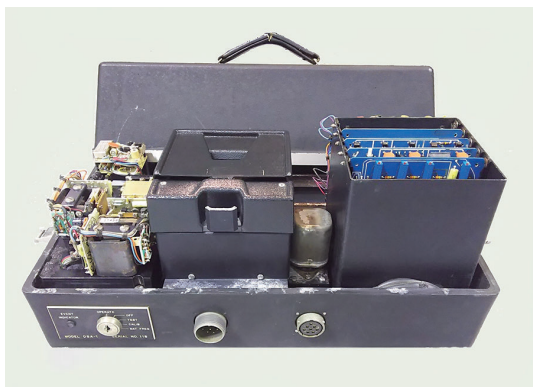


図2.10 米国Kinematics社製DSA-1 型強震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

水平動でも 1.4 倍～1.8 倍になる場合があることを示している。つまり、広帯域の地震計により最大加速度を与える周波数帯域についての検討の必要性を示唆している。なお、一般に高い振動数の地震動には構造物を破壊するようなエネルギーは含まれておらず、強震観測の場合は対象とする構造物の固有振動数(構造物が振動しやすい特定の振動数)も 20 Hz 程度であるため、30 Hz 以下の帯域で観測されることが多い。

また低い周波数帯域については直流 (DC) 成分まで観測できることが望ましく、この場合は加速度記録を 2 回積分することで地震時に発生した変位量を求めることができる可能性がある。特に安定性の高いサーボ型のセンサーを用いて DC 成分から記録することで、安定した結果を得られるものと考えられるが、温度変化などにより DC 成分が変動する場合があります、波形解析の際には注意が必要である。

以上述べたような地震計の特性の考え方をもとに、国鉄では鉄道構造物に対する地震被害と警報地震計の特性についての検討を行い、適切な列車や鉄道構造物に対する地震警報についての研究を行ってきた(例えば2-58)～2-60)。

まず、その当時国鉄で標準的に使われていた明石製作所製の警報地震計 AJA-2R 型(固有振動数 10 Hz、減衰定数 0.7)が 80 Gal 以上で警報を出した地震の最大加速度を検討した結果、マグニチュードが小さい地震でも震央付近で観測された最大加速度は大きな値になり、しばしば 120 Gal を超えることがわかった。次に波形記録用の明石製作所製 SMAC-B2 型強震計(固有振動数 7.14 Hz、減衰定数 1.0)と AJA-2R 型の感度特性を比較すると、5 Hz 以上で乖離が大きく AJA-2R 型の方が感度が高く、AJA-2R 型による最大加速度が 2 倍以上大きくなる可能性があることがわかった(図 2.11)。地震動は様々な周波数の波動の重ね合わせにより構成されているため、多くの周波数のピークが存在する。このため、地震動を振動数ごとの大きさとして見ると、特に大きな値となる振動数が存在する。この振動数を卓越振動数という。特に、マグニチュードが小さい地震は卓越する振動数が高いため、高い振動数でより大きな最大加速度となりやすい。さらに、建築物や構造物の場合にも、地震などにより振動した時の振動波形に地震動と同じく多くの振動成分が含まれ、そのうちの大きな値を示す振動数を固有振動数という。この固有振動数は、構造物などの共振現象により破壊が発生することに関係する重要な数値である。鉄道構造物の固有振動数は概ね 5 Hz 以下なので、卓越振動数の高い小さなマグニチュードの地震による大きな最大加速度値は、鉄道構造物の被害や列車の走行

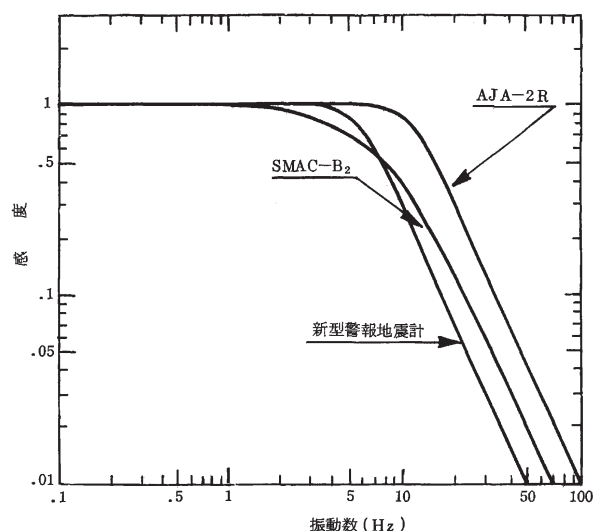


図 2.11 各地震計の感度曲線の比較²⁻⁶⁰⁾(掲載許諾)

障害には結びつかないことが多い。このため、新しい警報地震計の感度特性として固有振動数 5 Hz と減衰定数 0.7 を設定して最大加速度のシミュレーションを行ったところ、地震被害が発生しないと考えられるマグニチュード 5 以下の地震に対しては 120 Gal を超えることが少なくなることが確認された。

以上の研究の成果を踏まえ、国鉄では内部規格として 1984 年から警報地震計の特性を定め、警報については周波数帯域を DC～5 Hz、減衰定数 0.7、記録波形としては余裕をもって周波数帯域を DC～10 Hz とした。この規格の制定以降に設置された警報地震計により国鉄から JR にかけて全国の鉄道網では均質で的確な警報を発令することができるようになった。現在でもこの規格に準拠した地震計は JR のみならず私鉄でも用いられている。以上述べた、AJA-2R 型、SMAC-B2 型および新しい警報地震計の感度曲線を図 2.11 に示す。

この JR の規格による見かけ上の最大加速度低減の効果として、2004 年に発生した新潟県中越地震 (M 6.8) の際に震源近傍の防災科学技術研究所 K-NET 小千谷観測点で観測された DC～30 Hz の波形の最大加速度 1,502 Gal が、JR の警報地震計相当の DC～5 Hz に変換すると 1,167 Gal になることが確認されている²⁻¹⁹⁾。なお、JR の警報地震計では新川口 SS の 846 Gal が最大であった。

2.5 強震計の開発

前述のように、地震計はその観測特性を適切に調整することで対象とする地震を設定することができる。例えば、おもりを比較的軽くすると波形を詳細に記録することができる反面、大きな地震動では波形が振り切れてしまう。例えば、1923年の関東地震の際には震源に近い観測所では記録が振り切れてしまった。図2.12に東京帝国大学本郷において観測された地震波形を示す²⁻⁶¹⁾。SNとDUと書かれた成分が観測してすぐに記録が途切れてしまっていることがわかる。

このような大きな地震動でも振り切れずに観測できるように特性を調整した地震計を強震計という。強震計の開発は、1932年に米国での土木学会や多くの大学において、東京帝国大学附属地震研究所の初代所長末広恭二がEngineering Seismology²⁻⁶²⁾と題する講演を行い、強震観測の重要性を説いたことに端を発する。この講演の中で末広は、地質学者は詳細に記録された地震動を用いた震源位置の特定や地震波の伝播速度などを対象とし、構造工学者は地震の主要動の大きさなどを必要とするが、地震計はどちらかというと地質学者の領域に属していたと述べている。その上で工学的には地震動を加速度計で観測することの重要性を説

き、その当時使われていたユーイングの地震計を改良することで構造工学者が必要な強震計(Strong-Motion Seismographs)になりうることを示唆した。末広を米国に招待した土木工学者ジョン・フリーマン(John Freeman)はこの講演に触発され、連邦政府に働きかけて強震計の開発の支援を取り付けた。この結果として世界でも最初期の強震計として、1932年に米国の沿岸測地測量局(USC&GS, United States Coast and Geodetic Survey)により開発されたUSCGS Standard型²⁻⁶³⁾が生み出され、カリフォルニアの多くの観測点で地震波形が記録されるようになった。この強震計により1933年のロングビーチ地震(M_w 6.4)の際に震央から約25 kmに位置するビルの地下1階で、震源域における約300 Galの強震波形が振り切れずに記録されていることから、これが世界で初めての強震記録といわれる^{2-63), 2-64)}。また、1940年のインペリアルバレー地震(M 6.4)の際に断層から6 km程度しか離れていないエルセントロ市の変電所で300 Galを超える地震波形が振り切れずに記録され²⁻⁶⁵⁾、その後の構造物の設計などの標準波形として広く使われるようになった。この波形を図2.13に示す。

日本においても、米国では1930年代から強震観測が行われ、南カルフォルニアだけでも約50台の強震計が設置されて記録が得られていることは知られていた。また1948年福井地震(M 7.1)により非常に大きな被害が発生したが、被災メカニズムを検討するために必要となる震源域や被災地における地震波形の記録が残らなかった。このような状況に鑑み、被害地震の地震波形を必ず記録することを目指して1951年に東京大学地震研究所、東京大学建築学教室、建築研究所、明石製作所の研究者と技術者によって標準強震計試作試験研究委員会が組織され、その成果として1953年にSMAC型強震計が開発、試作された^{2-25), 2-66)}。このSMACという名称はこの委員会の英語名称、Strong Motion Accelerometer Committeeの頭文字からとられた。この成果として、国内最初の量産モデルのSMAC-A型強震計が標準強震計として株式会社明石

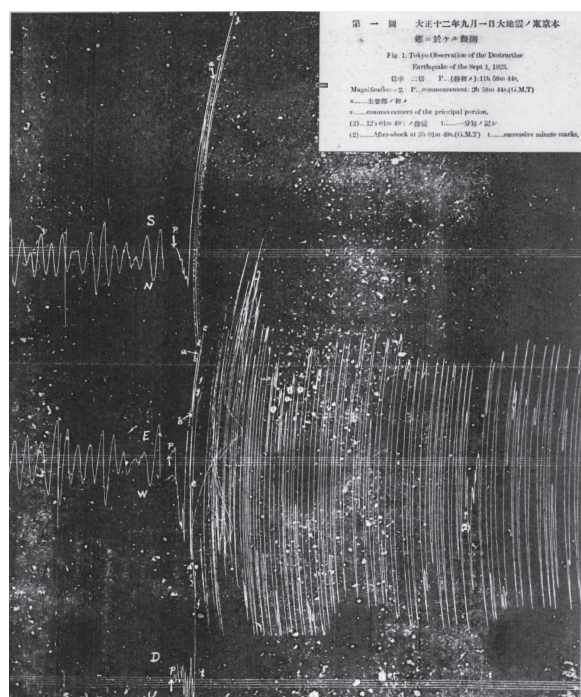


図 2.12 東京帝国大学本郷における
1923 年関東地震の観測波形
(国会図書館デジタルコレクション
(<https://dl.ndl.go.jp/pid/974361/1/99>)、
公共データ利用規約(第 1.0 版) PDL1.0 により引用)

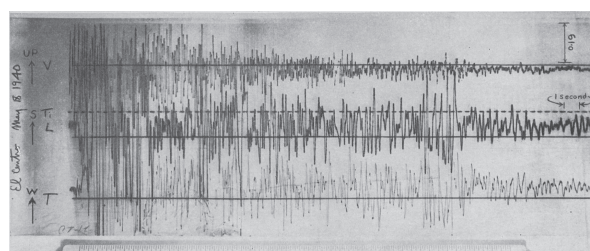


図 2.13 1940 年インペリアルバレー地震の
エルセントロにおける強震波形²⁻⁶⁵⁾

製作所により製作された。図 2.14 に SMAC-A 型地震計の外観、表 2.5 に主要な諸元を示す²⁻⁶⁷⁾。なお、ここに示した外観写真や仕様書は、SMAC 強震計を製作した明石製作所を継承した株式会社ミットヨから提供いただいた。ここに示すように、SMAC 強震計の観測範囲は最大 1,000 Gal、電源には乾電池を使い、記録紙の送りにはゼンマイを用いて、大地震が発生しても余震を含めて観測できるように設計されていた。SMAC 強震計は改良型が開発されていったため、試作型が SMAC 強震計、これに続く量産型の最初のものが SMAC-A 型と呼ばれ、その後 SMAC-B 型などの改良型が製作されている。

日本における最初の系統立てた強震観測は、SMAC 型強震計の第 1 号機が 1953 年 7 月に東京大学地震研究所の地下 2 階観測室に設置されたことから始まり、続いて建築物・橋梁・ダム・港湾施設などの各種構造物を主たる対象として設置されていき、ほぼ 10 年後には全国に設置された強震計は約 200 台になった。この中には、1958 年に東京タワーの展望台(高さ 125 m)と下の建物に設置されたものもある。



図 2.14 明石製作所製 SMAC-A 型強震計
(ミットヨ測定博物館からのご厚意により掲載)

表 2.5 SMAC強震計の主要諸元(仕様書²⁻⁶⁷⁾を基に筆者作成)

地震計形式	3 成分振子型加速度計
固有周期	0.1 秒
感度	記録紙上 25 Gal/mm
拡大装置	機械的 (16 倍)
記録範囲	10 Gal ~ 1,000 Gal (中震~超烈震)
動作	3 回始動 毎始動 3 1/3 分間運転 (本震以後余震 2 回を自動記録)
始動装置	機械的 1 回始動 (感度 100 Gal)、2 回目以降は電氣的
トリガー方式 ガバナー	上下動加速度計、周期 0.3 秒で 10 Gal 超過 遠心即動式 (即座に記録紙を全速で送り始めるため)
記録方式	スタイラス紙引掻、巻取式 (10 倍程度に引伸焼付可能)
記録速度	毎秒 1 cm
駆動	手巻ゼンマイ動力式
刻時	電気始動式手巻電接時計で毎 1 秒
外形	84 cm × 74 cm × 56 cm
電源	平型 3 号 3 個



図 2.15 米国 Kinematics 社製 SMA-1 型強震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

なお SMAC 型強震計は高価であったため、これを補助する安価な地震計として、観測成分を水平 2 成分として SMAC 型強震計からの信号で起動、時刻とともに波形記録を行う DC 型強震計も 1955 年 5 月に開発され、保坂振動計器製作所(後の振動技研)で製作された。この DC 型強震計も SMAC 型強震計第 1 号機と同じ東京大学地震研究所の地下 2 階観測室で観測をはじめ、その後各地に設置されていった。

また、このころ東京大学地震研究所では地震動の全貌を記録するため、磁気ヘッドの位置の調整などで地震トリガー以前の波形を記録することができる装置の開発をしていたが、1954 年に世界初の遅延磁気記録装置として東京通信工業(現 ソニー)がテープレコーダーを使った装置を実用化した。これを担当したのは当時地震研究所の助手をしていて、のちにソニーの社長になる岩間和夫であった²⁻⁴⁾。

米国では 1960 年代に入って、USCGS Standard 型をもとにした Kinematics 社製 SMA-1(図 2.15)に代表される軽量小型化と安定化が図られた第二世代の強震計が登場し、より多くの観測点で地震が記録されるようになった。

日本でも SMAC-A 型を原型として小型軽量化された SMAC-B 型(1960 年)、壁面に設置でき、かつ記録装置が電気モーター駆動になった C 型(1962 年)、B 型および C 型の記録感度を向上させた B2 型(1961 年)、C2 型(1962 年)と進化したモデルが量産され、国内外で観測に用いられた。このなかでも特に SMAC-B2 型強震計は非常に多くの観測点に設置され、1995 年の兵庫県南部地震の際にも現役の強震計として地震波形を記録した。さらに、筆者は遠くメキシコシティにも SMAC-B2 型強震計が設置されているのを見て驚いたことがある(図 2.16)。

その後、さらに小型軽量化などアップデートされた SMAC-E 型、Q 型等も普及した。なお、SMAC 型



図 2.16 メキシコシティの SMAC-B2 型強震計 (筆者撮影)

強震計の観測波形は、開発された当初からペン書きのアナログ方式で記録されたものであり、解析者が数値化して利用していた^{例えは2-68)}。これをアナログ磁気テープに記録するように改めた強震計 (SMA-2 型、SMAC-M 型など) も開発されているが、観測範囲 (ダイナミックレンジ) には大きな差がない。ちなみに 2025 年現在でも SMAC-MDU 型は現役で活躍している。あわせて、DC 型強震計もスターターの内蔵や、上下動成分の追加など改良が加えられた。

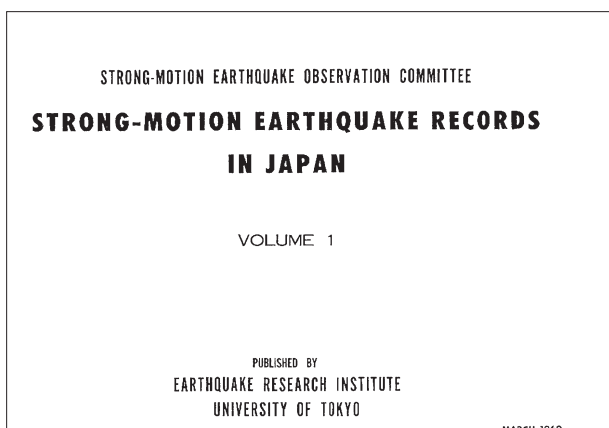
また、SMAC 型強震計はいわゆる機械式地震計であるのに対して、港湾技術研究所は電磁式強震計である ERS 型強震計^{2-69), 2-70)}を開発して港湾施設などで地震観測を行い、それを構造物の耐震設計などに用い

てきた。この港湾施設における地震観測については、2.6.3 (1) で詳説する。

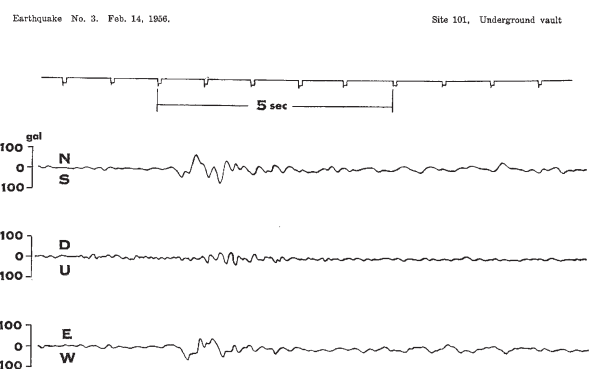
1956 年には、強震計の維持や観測、観測結果の刊行などを目的に強震測定委員会が発足し、1960 年にそれまでの観測記録が東京大学地震研究所から「STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPAN VOLUME 1」として刊行された²⁻⁶⁾。この強震年報の第 1 号では、地震学のみならず地震工学の地震災害の軽減のための研究にも必要不可欠な強震観測の重要性が政府にも国民にも認識されており、その結果として国の予算で強震計が設置されるようになったこと、そして得られた地盤振動や構造物の応答記録の有用性を理解した国や大学、民間企業などが公開することを認めたことへの謝辞を緒言 (オリジナルは英語) で述べている。

その後、強震年報はほぼ毎年強震測定委員会と強震観測事業推進連絡会議が交互に発行した後、現在は強震観測事業推進連絡会議から発行されるようになった。「強震年報 41 号 (2000 年)」からは CD 配布と WEB 上の公開となり、最新のものは 2024 年 12 月に発行された「強震年報 64 号 (2023 年)」²⁻⁷¹⁾となっている。1960 年の Vol.1 では 35 観測点 70 台 (SMAC 型強震計 54 台、DC 型強震計 16 台) の強震計が、2023 年の Vol.64 では 12 機関 3,124 台 (地震計特性は 43 機種分が記載されている) となっており、強震計の数が飛躍的に増えたことがよくわかる。

図 2.17 に、STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPAN VOLUME 1」の表紙と収録された波形の例を示す。観測波形は、タイムスタンプとともに A3 判に鮮明に印刷され、デジタル化しやすいように配慮されたものになっている。



(a) 表紙



(b) 波形の例 (1956 年 2 月 14 日の地震を東京大学地震研究所の SMAC-A 型強震計で観測したもの)

図 2.17 「STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPAN VOLUME 1」
(早稲田大学理工学図書館所蔵) (掲載許諾)

2.6 地震観測網の歴史

地震計は、単体で設置することでもその地点の揺れの大きさを知り、それに基づいた避難行動やその後の対策などに役立てることができることは言うまでもない。しかし、発生した地震の位置や大きさ(マグニチュード)などを正確に把握し、地球そのものの成り立ちを理解することや地域全体の地震動に対する特性を知ることや地震被害を軽減する防災の観点から、均質なデータを取得するために多くの地震計を適切に配置して地震観測網を構築することは非常に重要である。世界や日本国内においても、様々な目的のため多くの地震観測網が構築されてきたので、ここではそれらを概観する。

地震観測網の中でも、地震警報に関係の深い強震アレイ観測に関する初期のワークショップとして知られているのは、1978年にハワイで国際地震工学会IAEEやUNESCOなどにより開催された「INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRONG-MOTION EARTHQUAKE INSTRUMENT ARRAYS」である²⁻⁷²⁾。この国際ワークショップで強震アレイ観測に用いる地震計については、絶対時刻を刻時精度0.01秒で記録すること、地震検知前からの波形を記録することができるように2.5秒のブリーブ(遅延)メモリーを備えること、ダイナミックレンジを0.001 G～2 G、周波数レンジを0.1 Hz～30 Hzに拡大することなどが提言された。

その後、日本を含め多くの国で地震観測網が整備されていったが、とくに日本においては1995年兵庫県南部地震を契機として防災科学技術研究所のK-NETをはじめとする多くの強震観測網が構築され、この結果として地震計の設置数が飛躍的に増えていった。また、国としても地震調査研究推進本部は「地震に関する基礎的調査観測計画」の中で、高感度・広帯域地震計や強震計、GPSの観測網を基礎的観測として整備する方針が出された。これにより警報などに直結する強震計だけではなく、防災科学技術研究所のHi-netの500点以上の高感度地震計の設置がなされた。さらに、2002年には大学や気象庁の観測点を加えた1,100点以上の高感度地震計による15 km～20 kmの三角網で国土を覆う観測が行われるようになった。

ここでは、兵庫県南部地震以前から防災などの重要性に早くから気付いて整備された初期の地震観測網を中心に、代表的なものを紹介する。とくに国鉄の強震観測網は、全国に張り巡らされた公共交通機関である鉄道の安全と安定輸送を守るために発展していったも

ので、兵庫県南部地震以前に既に日本全国に400台以上の強震計を主として鉄道沿線に設置し、気象庁と並んで国内有数の稠密な地震観測網となっていた。さらに、実際に警報地震計を使って地震時の列車運行の安全性を確保するための研究開発とその成果としてのシステムの構築を絶え間なく行い、着々と実用化してきたことが、今回のテーマの早期地震警報システムにつながっていったこともあり、詳しくその発展の経緯を見ていく。

2.6.1 国鉄およびJRの地震観測網と列車制御

前述のように、日本における標準強震計としてSMAC型強震計が開発され観測を始めたのは1953年(昭和28年)であるが、国鉄はすでに昭和30年代には防災を目的とした簡易地震計を沿線に設置し始めた²⁻⁵⁹⁾。ただし、この地震計は一定以上の水平合成加速度を検知すると警報を発令するとともに、記録の振幅で最大加速度値を概略記録するもので、地震波形そのものは記録できなかった。それぞれの地震計は加速度の大きさで受け持ち区間の列車を停止し、最大加速度から推定した、あるいは気象庁から発表された震度値をもとに係員が運転再開を判断するという手順が定められていた。

これらの在来線の沿線の警報地震計は各鉄道管理局・総局が独自に設置したものがほとんどで、国鉄全体で、どこにどのような機種が設置されているのかは1982年から1983年にかけて初めて調査された。その結果、地震波形の残らない警報地震計が6機種257台、波形の残る強震観測用地震計が3機種30台の合計287台が全国の在来線の沿線に設置されていることが確認された。また設置場所については、鉄道ならではの線路に近すぎる場所、急斜面、斜面の上下、近接した構造物などの影響を受ける可能性のある場所など、地震動が正常に観測されないような場合があることがわかった。代表的な機種を振動台上で同時に加振したところ、鉄道構造物に影響を与えない高い周波数成分が観測されるなど、観測特性にバラツキがあることもわかった。この調査結果により、一律の基準によって警報を出す必要のある鉄道にとっては非常に問題が大きくなり、国鉄は警報地震計としてあるべき特性を規定することとなった。その後も在来線については40 Galの地震警報を確実に発令するため、地震動の減衰を考慮して概ね40 km～50 km間隔で警報地震計の設置が進められた。これらと新幹線の警報地震計を合わせて、1995年の兵庫県南部地震の時点では全国に400台以上と、その当時としては国内でも有数の警報

地震計を有する稠密な強震観測網が構築されていた。

次に警報発令や列車制御の考え方であるが、国鉄や JR で列車停止に用いる警報地震計(列車運行を制御するため「制御用地震計」とも言う)は、標準的には 5 Gal で強震計の動作が起動し、40 Gal で列車停止のための地震警報を発令する。加速度の値は水平方向の加速度の合成値であり、40 Gal は地表面で観測した際に震度値Ⅳに相当する値として設定された。これより小さい値の場合は、周辺の道路や工場など社会活動の振動による誤作動(過剰警報)が多くなる可能性がある。また、警報地震計は線路の沿線に設置されることが多いため列車振動についても検討されており、ロングレールの直線区間を時速 60 km ～ 80 km で走行する通勤電車の場合で線路中心から 5.5 m 離れたところで最高 9 Gal、2.5 m 離れたところで最高 15 Gal という測定結果がある。これに線路継ぎ目の振動やより重量のある貨物列車などによる振動を考慮して、線路から少なくとも 20 m 程度は離して設置することが望ましいとされた。

また、地震警報による列車停止の方法は、新幹線は架線への給電を止めると列車は非常ブレーキがかかり自動的に緊急停止する。このため変電所に警報地震計を設置し少しでも早く給電を停止するようにシステムが構築された。これに対して在来線の場合は、電車の場合でも給電が停止しても滑走し、また電化されていない区間も多くあることから、列車を停止させるためには信号制御などが必要となるなど、同じ警報地震計を使っているにもかかわらず安全に列車を停止させるためのシステムは異なった思想の下で設計されている。

高速走行する新幹線に対しては²⁻⁷³⁾、1964 年 6 月 16 日の新潟地震(M 7.5)を契機として新しい地震警報装置の検討がはじめられたが、同年 10 月の東海道新幹線開業時には在来線と同じ簡易的な警報地震計が設置され、運転規制の考え方も在来線のものに準拠していた。開業の翌年の 1965 年に大井川河口付近で発生した地震(M 6.1)により東海道新幹線の構造物に軽微な損傷が発生したこともあり、起動レベルを 40 Gal にした機械式の警報地震計を制御用地震計として沿線 25 カ所の変電所に約 20 km 間隔で設置し、1965 年 11 月に自動列車停止システムとして仮使用を開始した。さらに 1966 年 10 月には、地震波形を記録してシステムの動作状況を確認するために SMAC-B2 型強震計も併設された。その後、1966 年 12 月からこのシステムは正式に運用開始され、40 Gal の警報を出した変電所から両隣の変電所までの区間で「き電」(架線への給電)を停止してその区間内の列車を緊急停止

させ、警報地震計の最大加速度値から読み替えた震度値や気象庁から発表される周辺の震度値により点検の有無を判断して運転再開する手順となった。しかし、この方式では地震計の観測精度が低いことなどから不必要に列車を停める恐れがあり、また震度の発表を待つため運転再開に時間がかかるなどの欠点があった。そのため、1968 年 10 月には新たに 80 Gal で警報発令する制御用地震計を追加して設置し、1970 年からは 2 段階の制御地震計の警報とした。警報発令後は、80 Gal 未満の場合は係員が添乗して 70 km/h の徐行運転で異常確認、それ以上は徒歩による巡回による異常確認とし、気象庁の震度に拠らない手順となった。この 80 Gal は被害が発生すると考えられる震度階Ⅴ(当時は強弱の区別はなし)の下限值相当として定められた。さらに気象庁の震度階の発表の迅速化により、1973 年からは 80 Gal 未満の場合は近くの測候所の震度がⅢ以下であれば係員の添乗による巡回を省略できるように手順が変更された。

国鉄が地震時の新幹線の走行安全性を守りながら迅速な運転再開を目指した運転再開手順の変遷を表 2.6 にまとめる。

なお、1992 年以降は「ユレダス」(4.3 で詳説)による M-Δ 図法(4.2 で詳説)に移行し、表 2.6 のマニュアルは廃止された。

また、1982 年に開業した東北新幹線では、従来通り沿線 40 Gal 以上の地震動を検知すると「き電」を停止する従来の警報地震計に加えて、前線検知型の早期地震警報システムが実用化された。これは、東北地方に多い太平洋に震源を持つ地震をできるだけ早く検知するために太平洋沿岸に海岸線検知点を設け、そこからの通信で内陸を走る列車に停止信号を発出するものであった。開業から 1 か月経過した 1982 年 7 月 23 日に茨城県沖地震(M 7.0)が発生したが、このシステムにより沿線検知点で 40 Gal を超えるまでに 10 秒程度の余裕時間が得られたことが報告されている²⁻⁷⁴⁾。

このように的確な列車停止とダウンタイム(運行停止時間)短縮を目指して運転取り扱いの手順の変更を経てはいるが、いずれにしても警報地震計が一定のレベルを超えたことで列車停止をすることには変わりなく、地震警報が発令されてから大きな地震動が到来するまでの時間が短く緊急停止が間に合わない可能性がある、また地震計近傍のあまりマグニチュードの大きくない地震で過剰に警報を出してしまう、という本質的な問題を解決することができなかった。この点を解決するために考えられたのが、本系統化調査でとりあ

表 2.6 東海道新幹線の運転再開手順の変遷 (中村の論文²⁻⁵⁹⁾を筆者修正)

気象庁 震度階		加速度	40 Gal 未満	40 – 80 Gal 未満	80 – 120 Gal 未満	120 Gal 以上
開業時	Ⅱ 以下	運転再開				
	Ⅲ	30 km/h 駅収容				
	Ⅳ 以上	地上巡回				
1966 年	Ⅲ 以下	運転	70 km/h 運転再開			
	Ⅳ		30 km/h 運転再開			
	Ⅴ 以上		地上巡回			
1970 年	—	運転	70 km/h 添乗巡回	地上巡回		
1983 年	Ⅲ 以下	運転	70 km/h 運転再開	地上巡回		
	Ⅳ 以上		30 km/h 駅収容			
1985 年	Ⅲ 以下	運転	70 km/h 運転再開	30 km/h 運転再開	地上巡回	
	Ⅳ		30 km/h 運転再開	部 分 地上巡回		
	Ⅴ 以上			地上巡回		

げる早期地震警報システムである。この開発経緯については第 4 章で詳述する。

なお、国鉄から JR のある時期までは、被害が発生するなど記録に残しておくべき地震については、国鉄沿線の地震記録と被害状況などを鉄道技術研究所が集約し、1983 年の日本海中部地震についてまとめて「国鉄地震速報 No.1」として発刊して以後、「国鉄地震情報」（民営化以後は鉄道総合技術研究所による「JR 地震情報」）として刊行し、地震情報を国鉄部内で共有するのみならず、平時にはともすれば存在を忘れがちな地震計について観測することの意義や観測結果の見方などを示し、地震防災の啓蒙などに役立ててきた。

特に、1995 年兵庫県南部地震の記録をまとめた「JR 地震情報 No.23d」²⁻⁷⁵⁾は一般にも公表され、これに合わせて観測波形も研究および設計業務を目的として配布された。なかでも JR 西日本の鷹取駅付近の施設（以下、JR 鷹取）における地震波形は、震源域における観測波形であることや道路橋示方書 V 耐震設計編で第Ⅱ種地盤の設計照査用の波形として採用されていることもあり、広く報告書^{例えば 2-76)、2-77)}や多くの論文、例えば地震発生から半年程度しか経っていない 1995 年 7 月の地震工学研究発表会でも引用されている²⁻⁷⁸⁾ほか、その後も度々引用されている^{例えば 2-79)、2-80)}。

なお、JR 鷹取などの波形は地震情報利用研究協議会を通じてデータが提供されている²⁻⁸¹⁾。そのデータによる JR 鷹取における兵庫県南部地震の波形を図 2.18 に示す。

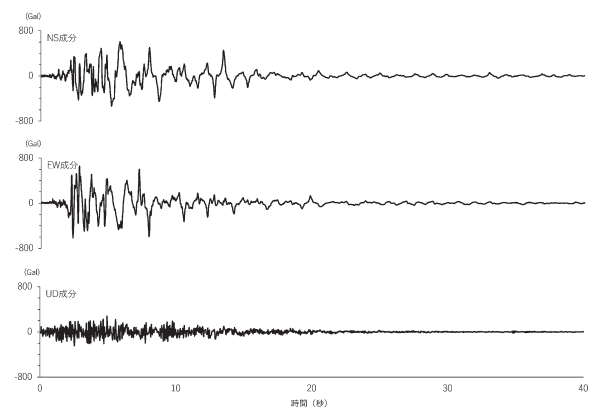


図 2.18 1995 年兵庫県南部地震の際の JR 鷹取の波形 (地震情報利用研究協議会により提供されたデータをもとに筆者作成)

2.6.2 気象庁の観測の歴史

日本における国土を網羅する系統だった地震観測は気象庁によってなされているため、ここではその歴史を、強震観測を中心にして概括する^{2-82)~2-87)}。

(1) 日本の地震観測の始まりと機械式地震計の時代

日本の地震観測は、1872 年にグイド・フルベッキ (Guido Verbeck) らによって個人的に始められた²⁻³⁵⁾。気象官署として初めての地震観測は、1873 年に函館測候所で職員が地震を感じたことを記録することで始まり、1875 年には内務省地理局東京气象台 (1887 年に中央气象台と改称、1956 年からは気象庁本庁) が創立され、パルミエリ地震計 2 台による観測を開始した。このパルミエリ地震計は、1856 年にヴェスヴィオ天文台でルイジ・パルミエリ (Luigi Palmieri) が開発し



図 2.19 パルミエリ地震計 (復元器) ²⁻⁸⁸⁾

た、最大値とその時刻を記録することができる、いわゆる感震器である。また、パルミエリ地震計が日本に導入された当初の目的は、内務省地理局が近代的測量事業を始めるにあたり、測量中の地震により基点位置に誤差が発生するのを防ぐためであった²⁻³⁵⁾。現在ヴェスヴィオ天文台を運営しているイタリア国立地球物理学火山学研究所 (INGV, Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia) によるパルミエリ地震計の復元器を図 2.19 に示す。

次に、東京帝国大学の 그레이、ミルン、ユーイングの三人が地震波形と時刻を記録できる地震計を 1883 年に開発すると、東京気象台はパルミエリ地震計に代わってこの 3 人の開発者の名前をとった 그레이・ミルン・ユーイング地震計を設置した。これが内務省地理局による全国的かつ組織的な地震観測の始まりである。また、これに伴い東京気象台は 1884 年「地震報告心得」を制定し、全国の測候所・県庁・郡役所、灯台等を対象とした地震動の時刻、地震動の性質、関谷の制定した震度等の報告を指示した。 그레이・ミルン・ユーイング地震計は、1923 年には 39 の気象官署に設置されていた。

その後、全国の気象官署には、1900 年に開発された倍率 2 倍の大森式強震計や、1910 年に開発され

たこれも倍率 2 倍の今村式強震計が設置され、さらに、中央気象台では 1927 年には拡大率を 1 倍とした中央気象台式強震計を開発し、設置した。その後も中央気象台は 1941 年に開発した新中央気象台式強震計 (41 型強震計) を全国に展開した後、最後の機械式強震計として、1950 年から 1952 年にかけて 50 型～52 型機械式一倍強震計を開発して、1961 年までに 106 台を設置した。

(2) 電磁式地震計

ここまでは、振り子の振動を直接記録する機械式地震計で観測が行われていたが、次世代の地震計として、気象庁でも振り子の動きを電気信号に変換して記録する電磁式地震計の開発を始め、1959 年に 59 型光学式電磁地震計と 59 型直視式電磁地震計として運用されることになった。また、1960 年にチリ地震による津波被害が発生したことから、固有周期を長くして遠地の巨大地震を観測できる 61 型直視式電磁地震計も指定官署に設置した。

(3) 記録が磁気テープに、そしてデジタル強震観測網の構築

気象庁では長期にわたり地震波形を煤書き、光学式、ペン書きなど、いずれもアナログ波形として記録してきたが、時代の要請もありこれを磁気テープに保存することができる地震計の開発をはじめ、67 型磁気テープ式電磁強震計が誕生した。これは全国約 60 箇所に設置され、さらにこの中の 4 官署については津波予報作業を迅速化するために観測データをリアルタイムテレメータする速報装置も取り入れられ、現代的な観測に近づいた。この地震計は短周期の高感度地震計であり、地震を検知する前の波形も記録できるように遅延装置も設置された。ただし波形記録の品質が低いという欠点があり、76 型磁気テープ式電磁強震計へと進化していった。

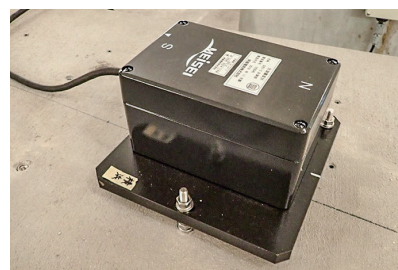
ここまで説明した気象庁が地震のマグニチュードの決定や津波予測などのために配置していた地震計は、機械式 1 倍強震計と呼ばれる変位計であり、いわゆる強震計とは違い大きな地震動では記録が振り切れることがあった。これに対して、1978 年に測地学審議会長から「地震予知の推進に関する第 4 次計画の実施について」²⁻⁸⁹⁾の建議がなされ、大・中・小地震観測を担当している気象庁に対しては、以下が示された。

既存の観測網の大地震に対する観測能力の維持向上を図り、特に、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

つまり大地震の波形が完全に記録されないことが指摘されており、これを受けた気象庁では大地震でも波形が記録できる地震計の研究を始めた。この成果として、サーボ型の加速度計を採用し観測波形がデジタル記録できる 83 型強震計、続いて 87 型電磁式強震計が開発され全国約 80 カ所以上の気象官署に設置された。なお、87 型電磁式強震計で観測された波形は、1993 年の釧路沖地震から 1995 年の兵庫県南部地震までの 5 地震について今でも公開されている²⁻⁹⁰⁾。さらに兵庫県南部地震を契機として、それまでは体感で発出していた震度を機械計測化することになり、気象庁は 95 型震度計を開発し、87 型電磁式強震計を置き換えとともに観測点の拡充を図った。2025 年現在では、95 型震度計は順次 07 型震度計に更新され、多機能型地震観測装置²⁻⁹¹⁾と合わせて、全国の 671 箇所の観測点の情報をを用いてマグニチュードや震度の算出を行っている。この多機能型地震観測装置²⁻⁹¹⁾には、検知網型と呼ばれる津波地震早期検知網の地震計を改修したものと、官署型と呼ばれる気象官署に整備された計測震度計の一部を更新したものがある。これらの最大の特徴はナウキャスト機能と呼ばれる、緊急地震速報のための震源推定機能を搭載していることにある。図 2.20 に横浜地方気象台に設置された多機能型地震観測装置²⁻⁹²⁾、図 2.21 に気象庁の計測震度観測網²⁻⁹³⁾を示す。



(a) 処理部



(b) センサー

図 2.20 多機能型地震観測装置²⁻⁹²⁾

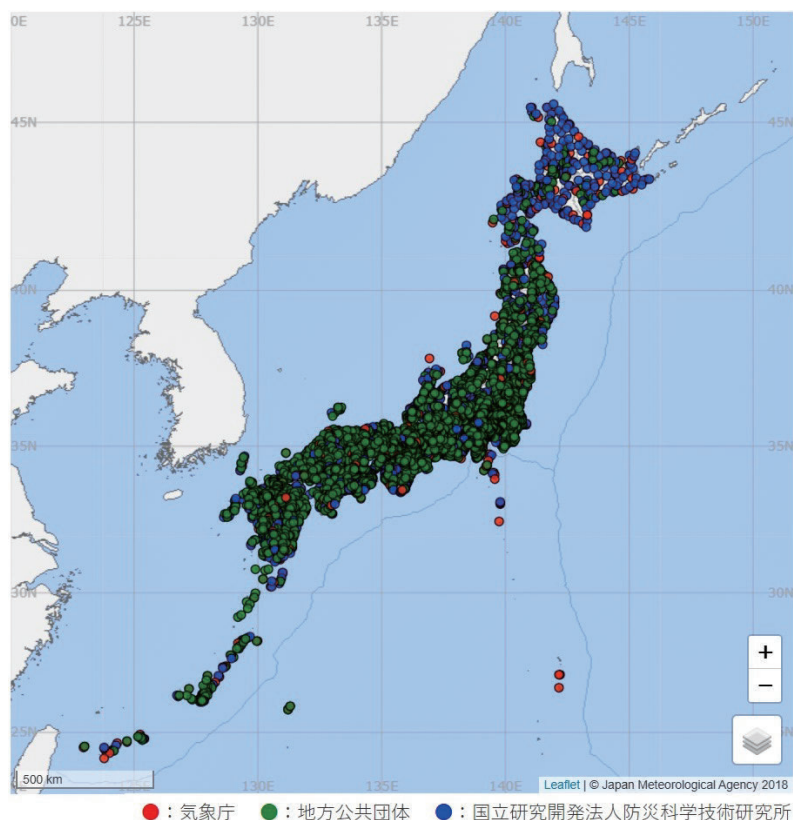


図 2.21 気象庁の計測震度観測網²⁻⁹³⁾

2.6.3 その他の地震観測網

日本においては、特に1995年兵庫県南部地震をきっかけに多くの地震観測網が整備され、防災科学研究所が全国強震観測網 K-NET として1,000台を超える地震計を設置し、観測点の地盤条件を表す地質柱状図と合わせて強震波形を公開するなど、現在では公表されているものだけでも数千台の地震計が設置され、その設置数は世界でも有数のものとなっている。こうした地震観測網の中でも、港湾技術研究所(現 港湾空港技術研究所)は国の港湾関係に古くから地震計を設置し、その観測結果を公表してきている。また民間会社である東京ガスも兵庫県南部地震以前から高密度な地震観測網を構築しており、さらに関西地震観測協議会のように産官学が参加する任意団体の観測網が存在している。これらは兵庫県南部地震以前から地震観測の重要性を認識し、それぞれに地震観測網を構築してきた。ここでは国内の代表的な地震観測網を紹介する。

(1) 港湾地域強震観測

港湾地域における強震観測は、被害地震が発生した場合に被害分析に利用できる波形を記録すること、港湾の地盤特性を解明すること、中小地震の記録を強震動予測に活用すること、などを目的として1962年に11台のSMAC-B2型強震計により開始された²⁻⁹⁴⁾。この強震観測網では、港湾建設局などが強震計の維持管理を行い、港湾技術研究所(現 港湾空港技術研究所)が記録の解析を担当しており、観測記録は港湾地域強震観測年報として1968年に1963・1964年のものがまとめられ²⁻⁹⁵⁾、最新のものは2025年9月に発行された2022年版²⁻⁹⁶⁾となっている。

また、港湾地域においては地震記録を用いて構造物の耐震設計を行うために、地盤上と構造物上、具体的には栈橋やボアホール(観測用井戸)に地震計を設置して観測を行う必要がある。しかし、SMAC型強震計はセンサーと記録部が一体化されていて専用の観測室が必要で、このような目的に用いることができない。このため、港湾地域に適した独自の地震計として、港湾技術研究所耐震構造研究室は、感震器と記録装置を分離し、記録も電磁的に行うことができる地震計として電磁式地震計を開発し、ERS型強震計と名付けた^{2-69), 2-70)}。なおこの名称は、耐震構造研究室の英語名称(Earthquake Resistant Structures Laboratory)から採られたものである²⁻⁹⁷⁾。

日本の地震観測でも長い歴史を持つ港湾地域強震観測では、1968年5月16日に発生した十勝沖地震(M_w 7.9)の際の八戸港の記録(いわゆる「八戸波」)が

当時の代表的な強震記録として知られる。この波形は、高層建築物の耐震安全性検討のために動的解析を行う際に用いられるべき長周期成分等を含む地震波形の代表例であり、現在でも高層建築物の耐震設計の際の標準的な動的解析用地震動として用いられている²⁻⁹⁸⁾。

なお、この強震観測網は、1995年の兵庫県南部地震が発生する以前の1994年末の時点で、全国56の港湾に89台の強震計が設置されており²⁻⁹⁹⁾、これが2025年3月現在では、全国70港に167台となっている(図2.22参照)。

(2) 関西地震観測研究協議会^{2-100)~2-102)}

1995年に兵庫県南部地震により未曾有の地震災害に見舞われるまで、「関西には大きな地震が来ないのではないかと、まことしやかに言われていた。このような状況にありながら、京都大学教授(当時)の土岐憲三と大阪地質試験所所長(当時)の岩崎好規の呼びかけで、産官学共同の強震観測プロジェクトとして、任意団体としての関西地震観測研究協議会が1991年に発足した。協議会では独自の観測点を10点設置したほか、観測委託をうけた1観測点を加えて1994年から観測を始めた。協議会独自の観測点では、大阪平野に特有の長周期地震動をターゲットとして、速度サーボ型強震計とデジタル収録器を組み合わせる観測を行い、観測情報は電話回線やポケットベルにより情報伝達されていた。1995年兵庫県南部地震の本震や余震がこの自動観測システムにより震源近傍の高精度な波形記録として観測され、その結果は研究者らに広く公開された。

その後も独自の観測点、委託観測点ともに増加し、2024年7月時点では自前の観測点20点に加え、管理点4点、地震観測記録の提供を受けている観測点5点の合計29観測点が、大阪平野を中心として、盆地・平野部と周辺の山地に設置されている。また地震の観測も設置当初はイベントトリガ(地震検知とともに記録する)方式の速報システムであったものが、2018年からは連続観測方式に移行している。

この協議会による地震情報は会員にe-mailで配信されるとともに協議会のウェブサイトで公開される。なお、協議会は、2024年時点で大学等研究者85名を筆頭に、法人個人含めて136の会員により構成されている。

(3) 東京ガスのSIGNAL および SUPREME

都市ガスは社会のインフラとして非常に重要であるが、過去の地震により繰り返し被害を受けてきた。

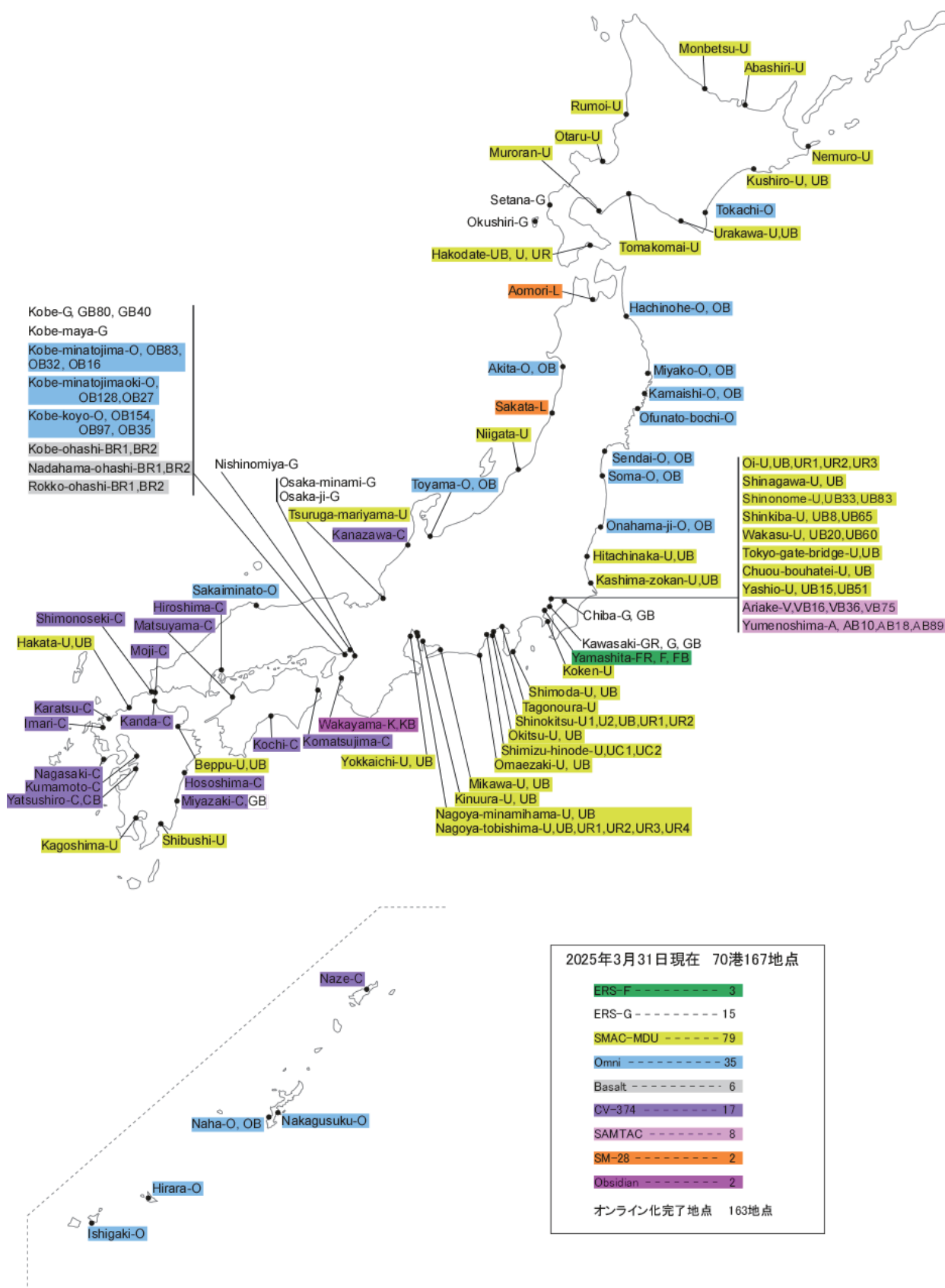


図 2.22 港湾地域強震観測の観測点 (提供：港湾空港技術研究所)

1978年の宮城県沖地震の被害によってもガス導管の被害が発生し、これを契機として「地震防災対策ガイドライン」が策定された²⁻¹⁰³⁾。この中でブロック化による緊急措置と情報収集システムの確立が提唱されている。

このため、東京ガスではガバナステーションやガスホルダーと地区ガバナを結ぶ中圧導管網をブロック化して供給停止の判断を行ってきた。そして1987年に地震直後にガス導管網の被害の全体像を定量的に把握することを目的として、SIGNAL (Seismic Information Gathering & Network ALert system) という早期地震時被害推定システムの構築に着手し、1994年から稼働させた^{2-104), 2-105)}。これは、都市ガスに対する、いわゆるリアルタイム地震防災の分野の実用化システムとしては世界初の事例であり、なおかつ1995年の兵庫県南部地震以前に稼働した先見性のあるシステムである。

SIGNALは地震動モニタリングシステム、震源推定システム、被害推定システムの3つのサブシステムにより構成され、事前に地盤や導管などのデータベースを整備している。この中で地震動モニタリングシステムは、供給区域内に331箇所(各低圧ブロックに3箇所)の観測点でSI値を計測するSIセンサネットワークである。なお、このSI値というのは、2.1.4で説明した地震動による構造物の揺れやすさを速度応答スペクトルから算出するもので、過去の地震動記録からSI値とネジ接主管被害率の相関が高いことから、東京ガスは東京大学生産技術研究所と共同でSIセンサーを開発した²⁻¹⁰⁶⁾。東京ガスの地震動モニタリング用SIセンサーは、地震が発生すると地震動のSI値と最大加速度を観測し、本社の防災・供給センターへ無線によりリアルタイムで送信する。また、SIセンサー以外にも地震の震源やマグニチュードを独自に迅速に推定することを主たる目的として、地表及び地中の地震計を供給エリアの外周部に5箇所設置している。地中地震計は深さ20m～40mの比較的固い地盤に埋設され、3方向成分の加速度を観測して、無線で本社に波形を送信する。さらに、液状化の危険性の高い地区には、新たに開発した液状化センサー²⁻¹⁰⁷⁾を20箇所設置し、地震時のセンサー内の水位上昇量を本社に無線連絡し、液状化発生の有無を知らせる仕組みとなっていた。

SIセンサーからのデータは被害推定システムに入力され、低圧及び中圧導管の被害程度が推定される。このシステムは、まずメッシュごとの標準被害率を算定し液状化を考慮して被害率を求め、さらにこれを管

種と口径で補正を行い、埋設管延長を被害率に乗じてメッシュごとの被害数を求める。これにより供給停止などの緊急措置の必要性を判断する。

一方で震源推定システムは、前述した5箇所の基盤地震計からの連続波形を用いてP波とS波の初動時刻を求め、理論走時と観測走時の誤差最小になるように震源の位置を決め、気象庁の方式によりマグニチュードを決定する。これによりSI値の震源からの距離減衰式による被害推定も行う。SIGNALのシステム構成とデータ処理の流れを図2.23に示す。

なお、SIGNALはその先見性^{2-104), 2-105)}を高く評価され、土木学会より平成8年度土木学会技術開発賞「地震時導管網警報システム-SIGNAL-の開発」を贈られている。

1995年兵庫県南部地震以後は、様々な分野で高密度地震監視網の整備やリアルタイム被害推定システムの構築が行われてきているが、東京ガスでも防災レベルの向上を目指して、地震の情報をほぼリアルタイムに収集する新しい防災テレメータ装置(DCX)を整備するとともに新SIセンサーを開発し²⁻¹⁰⁹⁾、これらを供給区域3,100km²に対して約3,700箇所のすべての地区ガバナに設置しモニタリングする、つまり約1km²に地震計1台という世界一超高密度なリアルタイム地震防災システムSUPREME (Superdense Realtime Monitoring of Earthquakes)の構築を

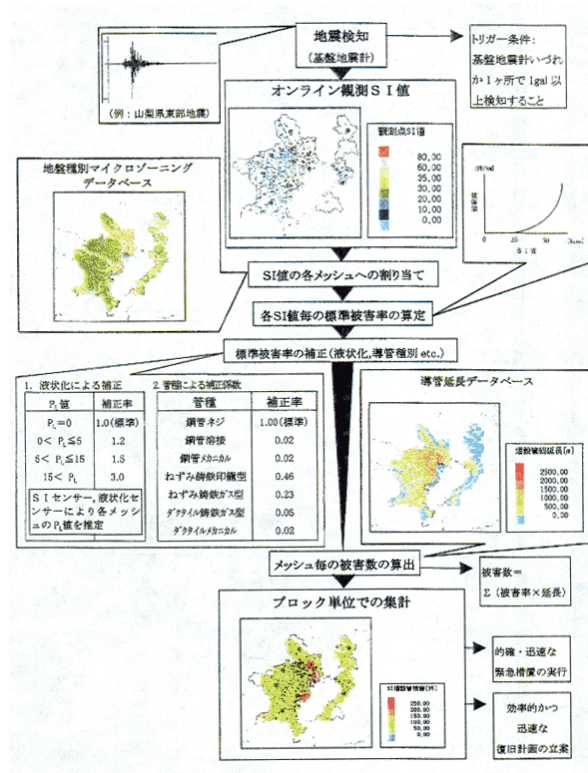


図2.23 SIGNALの構成とデータの流れ²⁻¹⁰⁸⁾

1998年から始め、2001年から稼働開始した^{2-110), 2-111)}。SUPREMEは、それまでのSIGNALを包括して拡張したシステムで、観測密度が大幅に高まっている。地震情報取得のための通信は自営無線と一般回線を併用し、地震が発生して指令センターに情報が集まると、SI値の地表面における空間的な分布を推定する。この情報と、あらかじめ防災GISの50 mメッシュに地盤増幅特性や導管情報などを与えてあり、それらを組み合わせて50 mメッシュ単位で演算した結果により被害箇所数分布を算定している。また、低圧導管網からの漏洩ガスによる二次災害を防止するための地区ガバナの感震遮断状況も監視して、必要場合は遠隔遮断するなどの制御で災害の低減を行うことができるようになっている。図2.24にSUPREMEのシステム構成を、また図2.25にSIGNALとSUPREMEの地震計配置を示す。

SUPREMEに対して、兵庫県南部地震のデータを用いて東京におけるシミュレーションを行ったところ、従来の感震自動遮断の場合では供給停止を完了させるためには約40時間必要であったところが、SUPREME

の遠隔遮断を用いることで約10分にまで短縮することができている。

そして、2011年の東日本大震災の際の検証結果²⁻¹¹³⁾は以下の通りであった。東京ガスの供給区域内の日立市で震度6強が観測され、東京の都市部を中心に広い範囲にわたって震度5弱から5強が観測された。この地震動により各家庭のマイコンメーターのうち約300万件が自動遮断され、まずはお客様の安全を確保した。SUPREMEでは地震情報が約5分で収集され、この結果により地区ガバナのうち14基がSIセンサーと連動した遮断装置により、安全のため低圧ガスの送出を停止した。また日立市においては観測された最大SI値が70 cm/sec以上となり、あらかじめ定められた供給停止判断基準によりブロック供給停止を行い、地震時の被害が大きいと考えられる地域を分離した。この結果約30,000戸のガス供給を停止したが、SUPREMEを軸とした迅速な対応によりお客様の安全を確保し、2次災害が発生することはなかった。このときのSUPREMEの動作状況により、SI値推定結果とK-NETなどによる観測値(実測値)とを比較し

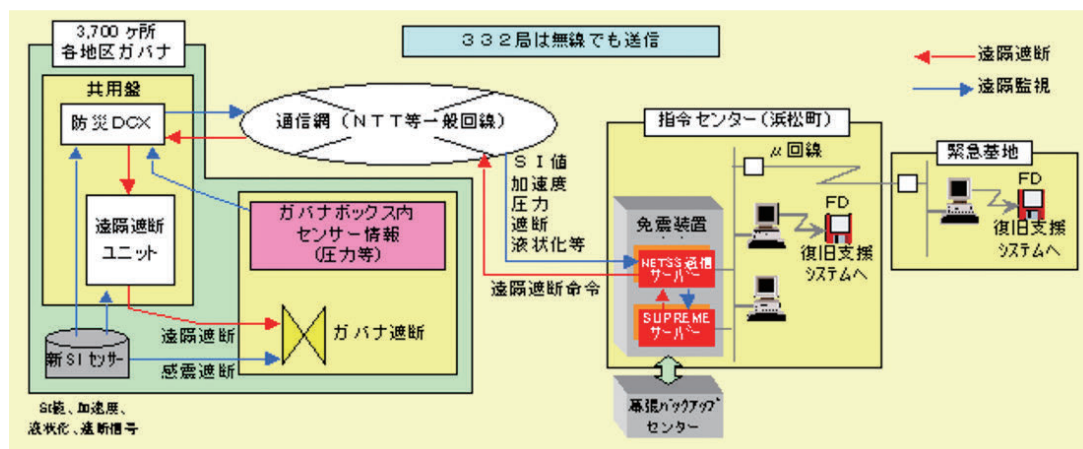


図 2.24 SUPREME の構成²⁻¹¹²⁾ (掲載許諾)

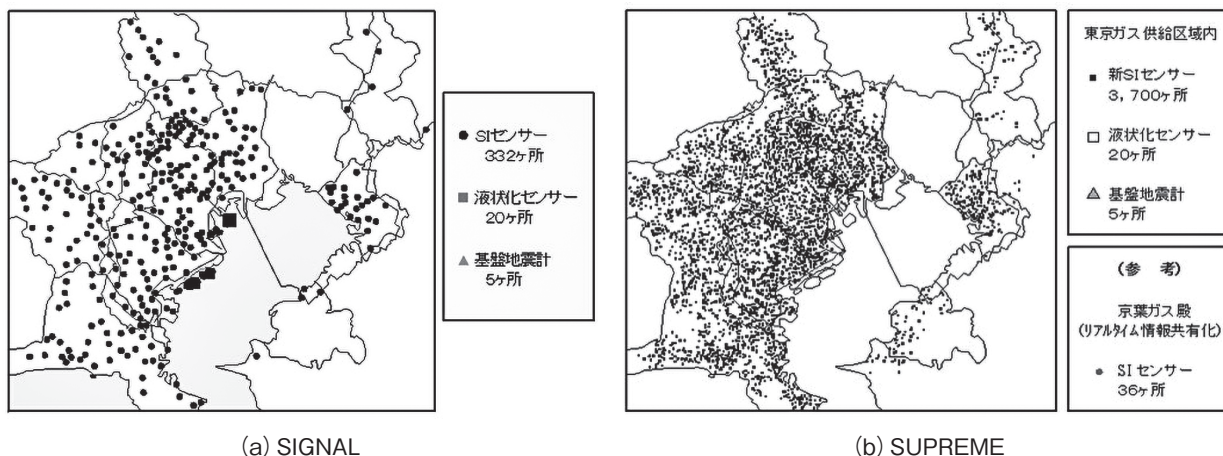


図 2.25 SIGNAL と SUPREME の地震計配置²⁻¹¹²⁾ (掲載許諾)

て推定に用いる地盤増幅度が妥当であることが確認され、また被害についても SUPREME の被害推定式の推定精度の高さが検証された。

(4) 防災科学技術研究所

1995 年の兵庫県南部地震の際に震度 7 を観測したエリア、俗にいう「震災の帯」の中では強震記録がほとんどなく、そこで起きた破壊現象などを把握することが難しいことが防災上の問題点となった。このことを踏まえ、防災科学技術研究所では、日本及び周辺で起きる地震による強震波形を全国でくまなく観測するための強震観測網として K-NET (全国強震観測網, Kyoshin Network)、KiK-net (基盤強震観測網, Kiban Kyoshin Network) を構築した²⁻¹¹⁴⁾。

K-NET は全国を約 20 km 間隔で均質に覆うように配置された 1,000 箇所以上の観測点で構成されたネットワークで、地震被害に直接関係する自由地盤上(地表面)における強震動を取得することを目的として、1996 年から観測を始めた。

また KiK-net は、総合的な地震防災対策を推進するために、政府の「地震に関する基盤的調査観測計画」の一環として、約 700 箇所の観測点で構成されるネットワークである。観測点には深さ 100 m 内外、場合によっては 2,000 m を超える観測用の井戸(観測井)が掘削されており、地表と地中(井戸底)の双方に強震計が設置され、基盤と地表の地震観測特性の違いを確認することができるようになっている。KiK-net は 1997 年から観測を始めた。

KiK-net の設置されている基盤観測網の観測点には、他にも高感度地震観測網(Hi-net)や広帯域地震観測網(F-net)の地震観測網の地震計が設置されている²⁻¹¹⁵⁾。この高感度地震観測網(Hi-net)は、人間には感じられない非常に小さな地震による揺れを地盤の構造の解析などに役立てるため、深井戸の底に高感度の地震計を設置して地震以外のノイズを観測しないようにした地震観測網である。また広帯域地震観測網(F-net)は、地震の発生メカニズム解明等に活用するために、広帯域地震計と速度型強震計の組み合わせで非常に広い周波数帯域の地震動を記録することができる地震観測網である。

これらの地震観測網は、すべての観測波形が、観測点の位置や地質の情報、地震計の観測特性などと共に公開されている²⁻¹¹⁶⁾。

(5) その他の観測網

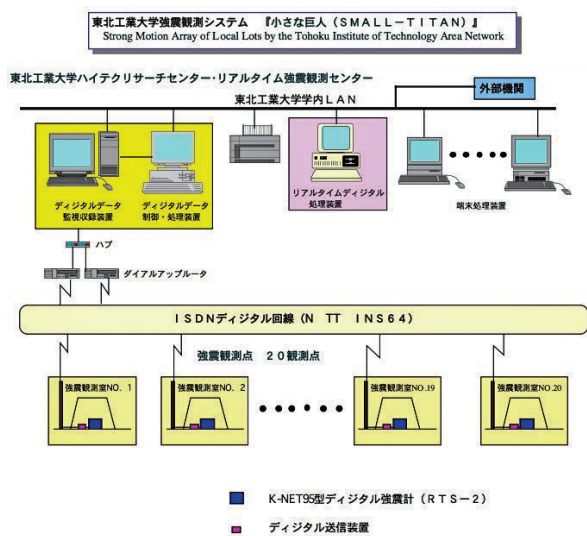
地方自治体においては、それぞれの地域防災計画な

どに組み合わせる形で地震観測網を構築しているところが多い。この中で、川崎市震災対策支援システムは 1995 年の兵庫県南部地震以前から稼働しているシステムとして特筆される。現段階のシステムでは、市内 10 箇所に設置された計測震度計で観測された震度値は気象庁に共有され、気象庁から受信した震度値は総合防災情報システムに取り込まれて地域住民に必要な情報が伝達される²⁻¹¹⁷⁾。また、兵庫県南部地震以後に構築された多くの自治体の地震観測網の中では、1997 年に観測を開始した広島市のネットワーク²⁻¹¹⁸⁾が、実際に被害地震を経験した最初のものになる²⁻¹⁴⁾。このシステムは県内 99 箇所に計測震度計を配置し地震情報を県庁に集約して県内の被害状況の推定を行うことで迅速な応急対策の検討に役立てるほか、各市町においても震度値を初動対応に活用でき、さらに消防庁と連携することで全国の震度情報把握に役立てることを目的としている。2001 年の芸予地震(M 6.7)の際には 88 カ所の観測点で地震を検知し、そのうち最大震度 6 弱を 4 箇所で観測した。この情報をもとに、地震発生の 8 分後に陸上自衛隊に偵察要請できたほか、12 分後には広島県防災ヘリコプターや広島県警本部ヘリコプターによる偵察を始めることができ、震度の大きい地域の初期被害状況の把握に大きな効果があった。

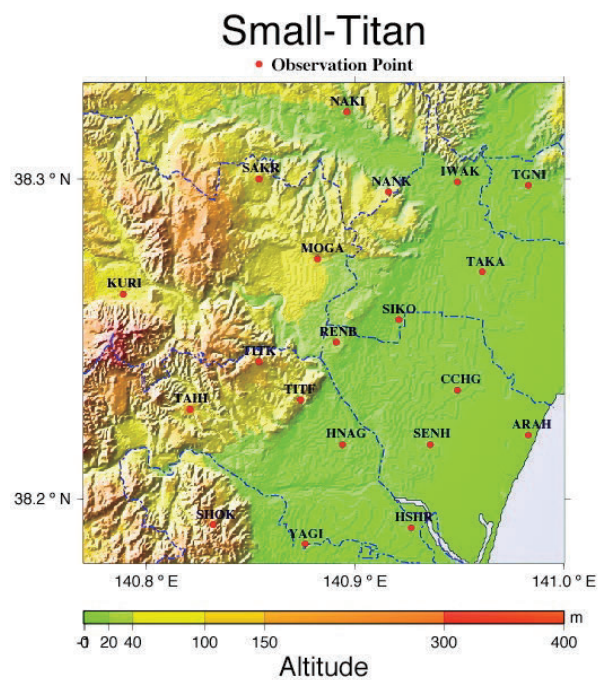
また、東京帝国大学の時代から連綿と観測を続けている東京大学をはじめとして、多くの大学で様々な地震観測網を構築し、主として研究用に活用している。この中で、東北工業大学が構築した強震観測システム Small-Titan (Strong Motion Array of Local Lots by the Tohoku Institute of Technology Area Network)²⁻¹¹⁹⁾は、仙台市圏に 20 箇所の観測点を設置し、これをデジタル回線でリアルタイムに強震動を得ることで、震源・地震波の伝播経路、各地域に対する地震動の影響等の基礎研究に資するだけでなく、地域地震防災システムへの応用として分散処理型アレイ観測のモデルを東北地方の自治体関係者に提起することも意図している。

本システムは図 2.26 に示すような機器構成で 1998 年から順調に地震を観測し、2011 年の東北地方太平洋沖地震を迎えることとなる²⁻¹²⁰⁾。地震後に回収された観測波形の解析結果により、震度 7 が仙台市内でも観測されていたことがわかったことも、このシステムによる成果と言えよう。

なお、東北工業大学の神山真による報告²⁻¹²⁰⁾によると、東北地方太平洋沖地震では 20 箇所の観測点のうち 1 箇所(ARAH 観測点)が津波の襲来を受け、図 2.27 に示すように観測装置を収めた機器箱ごと海水に水没



(a) 機器構成



(b) 観測点配置図 (ARAH 観測点が津波により水没した)

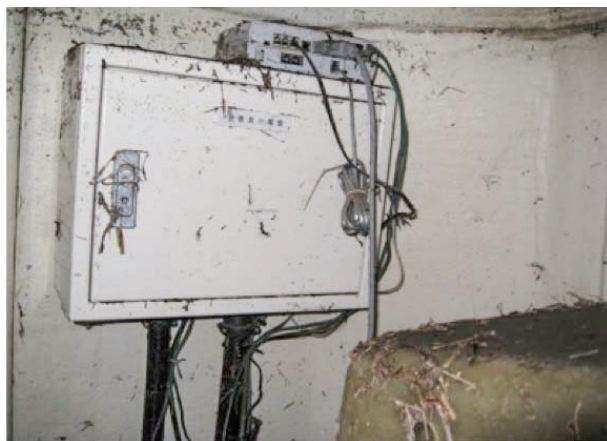
図 2.26 Small-Titan のシステム構成図 (掲載許諾)



(a) 被災状況 (遠景：赤いガソリンスタンドの残骸の向こうに観測点のある小学校が見える)



(b) 被災状況 (近景：機器収納箱に津波の痕跡があるが移動はしていない)



(c) 被災状況 (機器収納箱内部：機器収納箱内部が完全に水没したことがわかる)



(d) 被災状況 (機器内部：内部にも泥が入っている)

図 2.27 津波で水没した ARAH 観測点 (掲載許諾)

してしまうという被害を受けてしまった。ちなみにこの観測点は仙台市立荒浜小学校で、震災の際には校舎の2階まで津波が押し寄せたが、校舎の屋上に避難した児童や教職員や周辺住民約320人が救助された。現在は廃校になっているが、この被災した校舎は「震災遺構 仙台市立荒浜小学校」²⁻¹²¹⁾として津波の威力や脅威を実感し、防災減災の意識を高めるための施設となっている。

地震後1ヶ月弱でようやく現地(ARAH観測点)に立ち入り可能な状態になったため、神山らが被災機器からデータ記録用のCFメモリを回収することができた。このCFメモリに対して洗浄など様々な試みを行った結果、データの読み取りに奇跡的に成功し、本震を含め15時52分54秒まで16波の地震波形が記録されていることが確認できた。この時間は地震計機器類、すなわちこの観測点に津波が襲来したことを暗示しているものと考えられる。このことを踏まえ、このシステムを整備した神山眞は、以下のように地震工学者としての心情を吐露している²⁻¹²⁰⁾。

本震から最終収録余震までのこの時間差は防災・減殺対策を考える上で多くの示唆を与えてくれる。荒浜地区から津波の防波堤となった仙台東部道路堤まで約2kmの短距離を考えると、ここで明示的に収録されている1時間という時間差は日ごろの防災啓発運動から避難が十分可能な時間差であり、荒浜地区で200~300名の犠牲者が出ってしまったことは返すがえすも悔やまれることである。

2.6.4 地下核実験探知のための地震観測網²⁻¹²²⁾

地震学や地震観測の発展と地下核実験には深い関係がある。核実験による大きな振動は人工的な振動とみなすことができ、自然現象としての地震波の伝播と同様に地震計で検出可能である。

1957年にそれまでは大気中で行われていた核実験を、米国が初めての地下核実験として行くと、その波動伝播を地震学的に解析する技術はその当時のソ連の方が進歩していることが明らかになった。このため、米国は1960年に地下核実験探知技術向上のための地震学振興を目的とした計画Vela Uniformを開始した。このなかで、世界標準地震計観測網WWSSN(World-Wide Standardized Seismograph Network)が、米国地質調査所(USGS)と米国海軍、国防総省の支援により構築された。各観測点にはベニオフ式短周期地震計(周期1秒)とプレス・ユース・ユース式長周期地震計(周期30秒、のちに安定性を重視して15秒)が設置され、地震動をガルバノメーター(検流器)の動きと

して光学的に記録するようになっていた。この観測網は、1961年に最初の観測点がアルバカーキーに設置されたのを皮切りに、世界各国(60か国以上)に最終的に127地点の観測点が整備、運用された。なお、ソ連は当然として日本の地震計はほとんどWWSSNには組み込まなかった。

1968年には、このWWSSNの観測結果を踏まえ、地質によって20kt~60kt以上の爆発は自然地震と識別可能で、表面波マグニチュード M_s と実体波マグニチュード m_b の比較が有効であることが報告された。

WWSSNはその後1973年には米国地質調査所(USGS)に移管され、1970年代後半には一部観測点がデジタル化されてDWWSSNとなった後、1984年には、大学間地震学研究所連合(IRIS)がWWSSNを拡張して全球地震計ネットワーク(GSN)として継承した。

また、地下核実験の監視は包括的核実験禁止条約(CTBT)の枠組みの中で国際監視制度(IMS)の一環として、地震は、放射性核種、水中音、微気圧振動などと一緒に監視されており、日本にもこのための地震観測点が松代ほかに6箇所設置されている。この観測網で観測された核実験の規模はTNT火薬相当量として発表されており、例えば2013年の北朝鮮の地下核実験は最大40kt相当のエネルギーで、マグニチュード5.1に相当するとされている²⁻¹²³⁾。この時の波形を見ると、マグニチュード5程度の自然地震の波形に比べて核実験の破壊は短く爆発的に終了していることが確認できる。

2.7 主要な地震計メーカー

これまで述べてきたように、日本には多くの地震観測網があり、その他にも産業用地震計として、例えば鉄道の場合、「鉄道営業法」の規定に基づき、国土交通省の「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の中で「暴風雨、地震等により列車に危険の生ずるおそれがあるときは、その状況を考慮し、列車の運転の一時中止その他の危険防止の措置を講じなければならない。」とあり、このために地震計が設けられている。また、民間企業の場合でも工場などで設備や労働者の安全を守るための地震計を設置しているところは多い。このような、地震観測や警報に対するニーズを満たすため、日本国内には地震計に関するメーカーが数多く存在する。ここではそれらのメーカーを筆者の知る範囲で表2.7にまとめる。なお、表中に示した株式

会社ナリカの簡易地震計（水平動型）は、警報用などの動きを学習するための教育用地震計という興味深い製品である。

表 2.7 日本国内の主な地震計メーカー

IMV 株式会社 https://we-are-imv.com/business/products/seismometer/
アズビル株式会社 https://aa-industrial.azbil.com/ja/products/temperature-humidity/earthquake-sensor-seismic-detector
株式会社岩崎 https://www.iwasakinet.co.jp/product/measure/seismograph-2hz/
応用地震計測株式会社 https://www.oyosi.co.jp/
オムロン株式会社 https://www.fa.omron.co.jp/products/category/sensors/liquid-leakage-sensors/vibration-sensors/
株式会社勝島製作所 https://www.katsujima.co.jp/archives/product
株式会社カネコ https://www.kaneko-ks.co.jp/products/kisyou/jisin.html
株式会社近計システム https://www.kinkei.co.jp/products/category/emergency/#cat_emergency01
国際計測器株式会社 https://www.kokusaikk.co.jp/product/tester/vibration/ksg.html
株式会社システムアンドデータリサーチ https://www.sdr.co.jp/seihin.html
昭和測器株式会社 https://www.showasokki.co.jp/product_cat/jisinnkei/
株式会社高見沢サイバネティックス https://www.tacy.co.jp/products/tokki/str/
東京計器株式会社 https://www.tokyokeiki.jp/products/sensor/
株式会社東京測振 https://www.to-soku.co.jp/index.html
内外ゴム株式会社 https://www.naigai-rubber.co.jp/product/indust/seismic_sensor.html
日本システム工業株式会社 http://www.nsi-bizjp.com/
株式会社ナリカ https://www.rika.com/product/detailed/K50-1209
株式会社ナレッジフォーサイト https://knowledgeforesight.com/
白山工業株式会社 https://www.hakusan.co.jp/products/keisoku/
株式会社ホトロン https://www.hotron.co.jp/recommend/HK-2_lp/
明星電気株式会社 https://www.meisei.co.jp/products/products_category/earthq/earthq_earthq
明豊トレーディング株式会社 https://www.meihou-trd.co.jp/index.php
ユーアイニクス株式会社 https://www.uinics.co.jp/product/gc5000/
リオン株式会社 https://svmeas.rion.co.jp/products/?value=%E5%9C%B0%E9%9C%87%E8%A8%88&name=product

（なお、URL は 2025 年 12 月時点の表記である）

参考文献

- 2-1) Cooper, J. : "Earthquake Indicator", San Francisco Daily Evening Bulletin, November 3 (1868)
- 2-2) 萩原尊禮 : 「第2部各研究機関の歴史 第1章 日本地震学会」, 地震 第2輯, 34 (特別号), 135-138 (1981)
- 2-3) Richter, C. : "An instrumental earthquake magnitude scale", Bulletin of the Seismological Society of America, 25 (1), 1-32 (1935)
- 2-4) 宮村撰三 : 「回想の地震学人生」, 新日本出版社 (1991)
- 2-5) 金尾政紀 : 「南極事業と地震観測 : 半世紀の歩み」, なみふる, No.24, 日本地震学会, 2-3 (2001)
- 2-6) STRONG-MOTION EARTHQUAKE OBSERVATION COMMITTEE: "STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPAN", Vol.1, EARTHQUAKE RESEARCH INSTITUTE, UNIVERSITY OF TOKYO (1960)
- 2-7) <https://www.k-net.bosai.go.jp/KYOUKAN/No64/start.html> (2025年7月7日閲覧)
- 2-8) 伯野元彦, 高橋博 : 「10秒前大地震警報システム」, 自然, 9, 74-79 (1972)
- 2-9) 中村豊, 上野真 : 「地震早期検知警報システム UrEDASの開発」, 日本地震工学シンポジウム講演集, 2095-2100 (1986)
- 2-10) Nakamura, Y. : "ON-SITE ALARM-THE EFFECTIVE EARTHQUAKE EARLY WARNING", 5th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 45-53 (2008)
- 2-11) Satriano, C., Y-M. Wu, A. Zollo and H. Kanamori: "Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 106-118 (2011)
- 2-12) Gasparini, P., G. Manfredi and J. Zschau (Eds.) : "Preface", Earthquake Early Warning Systems, Springer, V - XI (2007)
- 2-13) 山崎文雄 : 「リアルタイム地震防災システムの現状と展望」, 土木学会論文集, No.577, I-41, 1-16 (1997)
- 2-14) 菊池正幸 : 「リアルタイム地震学」, 東京大学出版会, 80, (2003)
- 2-15) Espinosa-Aranda, J. M., A. Jiménez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostroza and S. Maldonado. : "Mexico City Seismic Alert System", Seismological Research Letters, Vol.66, No.6, 42-53 (1995)
- 2-16) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田茂, 吉川洋一, 大谷泰昭 : 「大規模都市ガスマン導管網の地震時警報システムの開発」, 土木学会論文集, No.525, I-33, 331-340 (1995)
- 2-17) 気象庁 (監修) : 「震度を知る」, ぎょうせい (1996)
- 2-18) Kinoshita, S. : "Kyoshin net (K-net)", Seismological Research Letters, Vol.69, No.4 (1998)
- 2-19) 中村豊 : 「早期検知と脱線」, 土木学会第28回地震工学研究発表会論文集, Paper No.115, 1-11 (2005)
- 2-20) 大迫正弘 : 「ユーイングの円盤記録式地震計について」, Bulletin of the National Museum of Nature and Science, Ser. E, 30, 45-54 (2007)
- 2-21) <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ayumi/2614/> (2025年6月21日閲覧)
- 2-22) https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/past_permanent/rikou/seismology/seismology-index.html (2025年6月21日閲覧)
- 2-23) 東京大学地震研究所 : 「地震計博物館」, 東京大学地震研究所, 6-16 (2023)
- 2-24) 気象研究所地震火山研究部 : 「83型強震計の開発 第4章あとがき」, 気象研究所技術報告, 7, 123-126 (1983)
- 2-25) 高橋龍太郎 : 「SMAC型強震計」, 地震, 第2輯, 6 (3), 117-121 (1953)
- 2-26) 柿下毅, 笹川巖, 永井章, 小林正志, 浜田信生 : 「気象庁87型電磁式強震計記録を用いた気象庁マグニチュード決定式の評価」, 地震, 第2輯, 第45巻, 263-277 (1992)
- 2-27) 横田崇 : 「緊急地震速報の実用化の経緯」, 日本地震工学会誌, 第38号, 19-22 (2019)
- 2-28) 中村豊 : 「研究展望 : 総合地震防災システムの研究」, 土木学会論文集, No.531, I-34, 1-33 (1995)
- 2-29) 中村豊 : 「世界最初の実用P波警報システム「ユレダス」の現状と将来」, 第2回土木学会リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 107-112 (2000)
- 2-30) Wadati, K. : "Shallow and deep earthquakes, 3rd paper", Geophysical Magazine, 4, 231-283 (1931)
- 2-31) Kanamori, H. : "The Energy Release in Great Earthquakes", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, Vol.82, No.20, 2981-2987 (1977)
- 2-32) 河角廣 : 「震度と震度階」, 地震, 15, 6-12 (1943)
- 2-33) 河角廣 : 「震度と震度階(続き)」, 地震, 15, 187-193 (1943)
- 2-34) 高木聖 : 「震度は加速度ではない(震度の人体実験)」, 気象研究所研究報告, 第23巻, 第3号, 215-223 (1972)
- 2-35) 石垣祐三 : 「明治・大正時代の震度観測について—震度データベースの遡及—」, 駿震時報, 第70巻, 29-49 (2007)
- 2-36) 藤井陽一郎 : 「日本の地震学」, 紀伊国屋新書, C-19, 紀伊国屋書店 (1967)
- 2-37) 気象庁告示, 官報, 本紙, 第1831号, 6 (1996)
- 2-38) 気象庁 : 「計測震度の算出方法」, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html (2025年9月21日閲覧)
- 2-39) Alexander, D. : "Introduction: Earthquake intensity scales", Natural Disasters, Taylor & Francis, 28 (2001)
- 2-40) 佐野利器 : 「家屋耐震構造論 上編」, 震災予防調査会報告, 第83号, 1, 1-142 (1916)
- 2-41) 佐野利器 : 「家屋耐震構造論 下編」, 震災予防調査会報告, 第83号, 2, 1-137 (1917)
- 2-42) 大崎順彦 : 「地震と建築」, 岩波新書, 240, 岩波書店 (1983)
- 2-43) Housner, G. W. : "Vibration of Structures Induced by Seismic Waves", Shock and Vibration Handbook, 3, Edited by Cyril M. Harris and Charles E. Crede, McGraw-Hill, 10-32 (1961)
- 2-44) 中村豊 : 「合理的な地震動強度指標値の検討—DI値を中心にした地震動指標値間の関係—」, 土木学会地震工学論文集 第27巻, 論文番号290, 1-4 (2003)
- 2-45) 株式会社システムアンドデータリサーチ : 「地震動の危険度モニタリング手法」, 特許第3764943号 (2006年登録)
- 2-46) Nakamura, Y. : "A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System", Early Warning Conference '98, Potsdam, Germany, (1998)
- 2-47) 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 原広行, 森川信之 : 「震度のリアルタイム演算法」, 地震, 第2輯, 第60巻, 243-252 (2008)
- 2-48) 独立行政法人防災科学技術研究所, 功刀卓, 青井真, 中村洋光 : 「計測震度概算装置、それを用いた計測震度概算システム及び計測震度概算方法」, 特許第4229337号 (2008年登録)
- 2-49) 国立研究開発法人防災科学技術研究所, 強震モニタ <http://www.kmonibosai.go.jp/> (2025年12月24日閲覧)
- 2-50) 公益社団法人日本地震学会, 技術開発省受賞一覧, https://www.zisin.jp/awards/zisin_technology02.html (2025年9月21日閲覧)
- 2-51) 後漢書は南朝宋の范曄によって432年(元嘉9年)に成立したとされるが、ここでは、吉川忠夫(訓注) : 「後漢書第7冊 列伝五」, 岩波書店, 266-267 (2004) の読み下し文に拠った。
- 2-52) 国立科学博物館 WEB サイト : 「地震計資料室」, https://www.kahaku.go.jp/research/db/science_engineering/namazu/02keiki/keiki.html (2025年11月2日閲覧)
- 2-53) Pauly, S. : "Strong Motion Acceleration Section",

- Proceedings of the Eighth World Conference of Earthquake Engineering, volume II, 47-54 (1984)
- 2-54) 中村豊, 齊藤明夫, 堀井宜房:「家庭用 VTR を利用した多チャンネルデジタルデータレコーダの試作」, 土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集, I-291, 580-581 (1981)
- 2-55) 猪瀬博, 安田靖彦, 村上純造:「符号化変調による一通信方式— $\Delta \cdot \Sigma$ 変調」, 信学誌, Vol.44, No.11, 1775-1780 (1961)
- 2-56) 安田靖彦:「デジタル情報通信の発展とともに歩んで」, 通信ソサイエティマガジン, 電子情報通信学会, 2007 年冬号 (第 3 号), 4-10 (2007)
- 2-57) Glassmoyer, G. and R. Borchardt: "Source parameters and effects of bandwidth and local geology on high-frequency ground motions observed for aftershocks of the northeastern Ohio earthquake of 31 January 1986", Bulletin of the Seismological Society of America, 80 (4), 889-912 (1990)
- 2-58) 富田健司, 中村豊:「強震計の特性補正に関する 2, 3 の考察」, 土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, I-392, 783-784 (1984)
- 2-59) 中村豊:「国鉄における地震警報システム」, 鉄道技術, Vol.42, 371-376 (1985)
- 2-60) 美藤泰久, 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」, 鉄道技術研究報告, No.1294 (施設編第 567 号) (1985)
- 2-61) 今村明恒:「関東大震災調査報告」, 震災予防調査会報告, 第 100 号 (甲), 21-65 (1925)
- 2-62) Suyehiro, K.: "Engineering Seismology, Note on American Lectures", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 38 (4), 9-110 (1932)
- 2-63) Trifunac, M.: "75th anniversary of strong motion observation—A historical review", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 591-606 (2009)
- 2-64) 翠川三郎:「関東地震による強震動と強震観測への動き」, 日本地震工学会誌, 第 49 号, 9-16 (2023)
- 2-65) Ulrich, F.: "The Imperial Valley earthquakes of 1940", Bulletin of the Seismological Society of America, 31(1), 13-31 (1941)
- 2-66) 田中貞二:「日本における強震計の開発と初期の地震観測」, 強震データの活用に関するシンポジウム, 日本建築学会地震災害委員会・強震観測運営委員会・強震データ小委員会, 39-48 (1995)
- 2-67) 株式会社明石製作所:「SMAC 型強震計仕様書」
- 2-68) 井合進, 倉田栄一, 土田肇:「強震記録の数値化と補正」, 港湾技研資料, No.286 (1978)
- 2-69) 林聰, 宮島信雄, 川田通一郎:「全国主要港湾における強震観測 (第 2 報)」, 港湾技研資料, No.15 (1965)
- 2-70) 土田肇, 倉田栄一, 須藤克子:「港湾地域強震観測年報 (1970)」, 港湾技研資料, No.116 (1970)
- 2-71) <https://www.k-net.bosai.go.jp/KYOUKAN/No64/start.html> (2025 年 7 月 9 日閲覧)
- 2-72) International Association for Earthquake Engineering: "Proceedings of the INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRONG-MOTION EARTHQUAKE INSTRUMENT ARRAYS" (1978)
- 2-73) 美藤泰久, 中村豊, 富田健司:「新幹線の新しい地震警報システム UrEDAS (ユレダス) について」, 第 18 回地震工学研究発表会講演概要, 509-512 (1985)
- 2-74) 中村豊, 齊藤明夫:「東北新幹線の耐震列車防護システム」, 地震学会講演予稿集 昭和 57 年度秋季大会, No.2, 244 (1982)
- 2-75) 中村豊, 上半文昭, 井上英司:「1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析 (II)」, JR 地震情報 No.23d, 財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部 (1996)
- 2-76) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会:「阪神・淡路大震災調査報告 共通編-2」, 第 7 章 地震動特性, 丸善, 294 (1998)
- 2-77) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題 1-SWG1:「1995 年兵庫県南部地震強震記録資料集」, 日本建築学会, 265 (1995)
- 2-78) 神山真, 松川忠司:「1995 年兵庫県南部地震における最大地動 (最大加速度、最大速度、最大変位) のアテニュエーション特性」, 第 23 回地震工学研究発表会講演概要, 193-196 (1995)
- 2-79) 大橋好光, 木村正彦, 坂本功:「JR 鷹取波加振による木造軸組構法住宅の動的倒壊過程」, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, 99-104 (1998)
- 2-80) 大野晋, 武村雅之, 小林義尚:「観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性」, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, 133-138 (1998)
- 2-81) 地震情報利用研究協議会 web ページ, <https://www.sdr.co.jp/cue/cuemainjn.html> (2025 年 9 月 26 日閲覧)
- 2-82) 萩原尊禮:「第 1 章 日本地震学会」, 地震, 第 2 輯, 第 34 巻特別号, 135-139 (1981)
- 2-83) 石垣祐三:「全国の震度観測網」, 日本の強震観測 50 年 — 歴史と展望 — 講演集, 防災科学技術研究所, 99-106 (2005)
- 2-84) 濱田信生:「地震計の写真に見る気象庁の地震観測の歴史」, 験震時報, 第 63 巻, 93-112 (2000)
- 2-85) 気象研究所地震火山研究部:「第 4 章 あとがき」, 83 型強震計の開発, 気象研究所技術報告, 第 7 号, 123-128 (1983)
- 2-86) Milne, J.: "Seismic Science in Japan", Transactions of the Seismological Society of Japan, 1, 3-34 (1880)
- 2-87) ジョン・ミルン:「地震学総論」, 日本地震学会報告, 第一冊, 丸屋善七, 1-30 (1884)
- 2-88) バルミエリ地震計 (復元器) ©Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: https://sismoslab.ingv.it/images/iconografia/strumenti/i-004000_00n.jpg (2025 年 10 月 12 日閲覧)
- 2-89) 測地学審議会:「地震予知の推進に関する第 4 次計画の実施について (建議)」(1978)
- 2-90) 気象庁 WEB サイト「強震観測データ」, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2025 年 10 月 12 日閲覧)
- 2-91) 原田智史:「多機能型地震観測装置の概要」, 験震時報, 第 70 巻, 73-81 (2007)
- 2-92) 気象庁 WEB サイト「多機能型震度計」, https://www.data.jma.go.jp/yokohama/since1923/100th_event/pic/takinou.html (2025 年 10 月 10 日閲覧)
- 2-93) <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/intens-st/> (2025 年 9 月 15 日閲覧を基に作成)
- 2-94) 野津厚, 林公美, 菅野高弘:「港湾地域強震観測の概要」, 防災科学技術研究所研究資料, 第 264 号, 29-32 (2005)
- 2-95) 土田肇, 川田通一郎, 倉田栄一, 須藤克子:「港湾地域強震観測年報 (1963・1964)」, 港湾技研資料, No.55 (1968)
- 2-96) 長坂陽介, 野津厚, 福永勇介:「港湾地域強震観測年報 (2022)」, 港湾空港技術研究所資料, No.1430 (2025)
- 2-97) 土田肇:「港湾地域強震観測物語 (I)」, <https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/doc/story/story1.pdf> (2025 年 9 月 5 日閲覧)
- 2-98) 日本建築センター高層建築物構造評定委員会:「高層建築物の動的解析用地震動について」, ビルディングレター, '86.6, 49-50 (1986)
- 2-99) 佐藤幸博, 一井康二, 井合進, 星野裕子, 佐藤陽子, 宮田正史, 森田年一:「港湾地域強震観測年報 (1995 & 1996)」, 港湾空港技術研究所資料, No.0909 (1998)
- 2-100) 関西地震観測研究協議会: <https://www.ceorka.org/> (2025 年 8 月 21 日閲覧)
- 2-101) 入倉孝次郎, 香川敬生:「関西地震観測研究協議会 (関西震協: CEORKA)」, 日本地震学会ニュースレター, Vol.11, No.4, 28-30 (1999)
- 2-102) 赤澤隆士, 岩田知孝:「関西地震観測研究協議会の強震

- 観測」, 日本地震学会ニュースレター, 第 73 巻, 第 NL4 号, 9-11 (2020)
- 2-103) 日本ガス協会:「地震防災対策ガイドライン」(1981)
- 2-104) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田茂, 吉川洋一, 大谷泰昭:「大規模都市ガス導管網の地震時警報システムの開発」, 土木学会論文集, No.525 / I-33, 331-340 (1995)
- 2-105) 清水善久:「早期地震時被害推定システム—SIGNAL」, 計測と制御 Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, 36 (1), 41-44 (1997)
- 2-106) 佐藤暢彦, 片山恒雄, 大保直人, 川崎勝幸:「新しい制御用地震センサーの開発と試作」, 第 18 回地震工学研究発表会, 105-108 (1985)
- 2-107) Shimizu, Y., S. Yasuda, Y. Yoshihara and Y. Yamamoto: “Adaptability Experiments of Liquefaction Sensor”, Proc., 4th Japan-U. S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, 621-638 (1992)
- 2-108) 内閣府 WEB サイト「東京ガスにおけるリアルタイム地震防災—SIGNAL を中心として—」, <https://www.bousai.go.jp/jishin/epcf/epcf1/img/takahashi04.gif> (2025 年 10 月 8 日閲覧)
- 2-109) 小金丸健一, 清水善久, 築田貴, 古川洋之, 田久保光:「新 SI センサーの開発」, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, I-B426, 852-853 (1998)
- 2-110) 清水善久, 小金丸健一, 中山渉, 山崎文雄:「超高密度地震防災システム (SUPREME) の開発」, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 1285-1288 (2001)
- 2-111) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉:「都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用」, 土木学会論文集, No.738 / I-64, doi.org/10.2208/jscej.2003.738_283, 283-296 (2003)
- 2-112) 清水善久:「都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システムの開発に関する研究」, 東京大学工学系研究科博士論文 (2001)
- 2-113) 猪股渉, 乗藤雄基, 石田栄介, 塚本博之, 山崎文雄:「東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度地震観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証」, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 2 号 (特集号), 37-44 (2013)
- 2-114) 青井真, 功刀卓, 安藤繁樹, 藤原広行:「防災科研による強震観測網—K-NET・KiK-net—」, 防災科学技術研究所研究資料, 第 264 号, 91-97 (2005)
- 2-115) Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara and A. Yamamoto: “Recent progress of seismic observation networks in Japan —Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net—”, Earth Planet. Sp 56, doi.org/10.1186/BF03353076, xv-xxviii (2004)
- 2-116) 防災科研 WEB サイト「地震関連情報」, https://www.bosai.go.jp/activity_special/data/earthquake.html (2025 年 10 月 12 日閲覧)
- 2-117) 川崎市:「川崎市地域防災計画 震災対策編 (令和 6 年度修正版)」, <https://www.city.kawasaki.jp/601/cmsfiles/contents/0000034/34665/R6sinsai.pdf> (2025 年 9 月 27 日閲覧)
- 2-118) 佐渡忠典:「広島県における強震観測について」, 防災科学技術研究所研究資料, 第 264 号, 109-110 (2005)
- 2-119) 神山眞, 莊司雄一, 松川忠司, 浅田秋江, 中居尚彦:「オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察」, 土木学会論文集, No.668 / I-54, 283-298 (2001)
- 2-120) 神山眞:「2011 年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー強震観測システム Small-Titan による強震記録について (速報 Ver. 1)」, 地盤工学会東北支部 (2011)
- 2-121) 震災遺構仙台市立荒浜小学校, <https://arahama.sendai311-memorial.jp/> (2025 年 10 月 3 日閲覧)
- 2-122) https://dev.iris.edu/hq/files/programs/gsn/documents/GSN_Review.pdf (2025 年 7 月 29 日閲覧)
- 2-123) <https://web.archive.org/web/20130215070941/http://www.iris.edu/hq/retm> (2025 年 8 月 16 日閲覧)

3 | 地震学から地震防災への発展と早期地震警報システムへの道のり

地震という現象そのものを知ることから始まった学問が「地震学」であり、多くの被害地震などを経験して、地震を観測する手段を獲得して知見を深め、地震発生のメカニズムや地球そのものの構造などを対象として理学的な研究を進めてきた。これに対して、地震動を工学的に把握して、建築や土木構造物などの耐震性を高めて安全を確保するための地震防災に関する学問が「地震工学」である。

近年では、地震を観測するセンサーの性能向上や大量のデータを送信する手段の確保、そしてデータ処理の高速化などにより、今起きている現象を即座に処理して様々な結果を出すことが可能になってきており、こういったほぼリアルタイムに取得することのできる地震情報を地震防災に役立てようとする「リアルタイム地震学」や「リアルタイム地震防災」という新しい学問の分野が派生してきた。

なお、地震防災の基本は、建物や構造物を耐震化して、発生が予想される地震動に対して十分な耐力をもたせることである。その上で大きな地震動に対して迅速かつ的確な地震警報を発令するための研究や技術開発がなされてきた。従来の地震警報は、発生した地震動を観測して一定のトリガレベルを超過することによるものであった。このため、ある程度の大きさの地震動を観測してはじめて警報が出されるため、破壊的な地震動までの時間的な余裕がない、近傍で起きた中程度の地震による地震動でも警報を出してしまうなど、多くの問題を抱えていた。こうした問題を解決するためにリアルタイム地震防災の知見を組み合わせた新しい警報の方法として生まれたのが、「早期地震警報システム」の考え方である。

特に、国鉄は多くの旅客や貨物を安全にかつ安定的に輸送することが使命であり、そのため早期地震警報システムの研究開発に早くから取り組み、その結果として世界初のP波検知による早期地震検知警報システム「ユレダス」の開発に成功した。

本章では、この初期の地震学からリアルタイム地震防災への流れを整理し、どのように早期地震警報システムが生まれたのか、その道筋を辿っていく。

3.1 地震学から地震工学、そしてリアルタイム地震学への進展

日本における地震の研究は地震学という名のもとに始まり、地震の観測やそのための地震計の開発から、過去地震の調査、地震被害や地震予知など幅広い分野についての研究など、多くのことを対象としていた。

地震波には震源から放出されるさまざまな種類の波動があり、地球の内部で反射するもの、あるいは地表に近いところを伝わるもの、さらには大地震の際には地球を何周もするようなものもある。地震の観測を精度良く行い、観測された地震動を用いて地震の発生するメカニズムや地球そのものの構造などを明らかにしようとする研究は今日の「地震学」となり、地球物理学に属する理学的な学問として進化していった。このため、地震学の研究に用いられる地震計も、大地震の時に波形記録が振り切れるのは厭わず、幅広い周波数帯域の地震波動を高感度で捉えることができるように進化していった。

これに対して、過去地震の調査や地震被害についての研究は、地震が社会にもたらす影響や安全に関する研究へと進んで行き、地震動を工学的に捉え、構造物や都市インフラストラクチャーなどの耐震性を高め、安全な社会を実現するための「地震工学」となっていた。現在では、構造物の耐震設計や、ライフラインやエネルギー施設の耐震化、さらに制振・免震技術の開発等が含まれている。このためには、大地震による巨大な地震動を確実に捉え、どういった原因で被害が発生したのかを明らかにする必要がある、大きな地震動でも振り切れない強震計の開発につながっていった。なお、「地震工学」という言葉は、2.5で述べた末広恭二が1932年に米国で土木学会や多くの大学においておこなった Engineering Seismology³⁻¹⁾と題する講演のタイトルが日本語に訳されたものである³⁻²⁾。

早期地震警報システムは、この地震工学の系譜に位置付けられるため、ここでは地震工学の進歩を辿っていく。初期の地震工学は、多くの大地震による被害を経験し、構造物の耐震性を高めるための耐震工学として発展していった。まず1891年の濃尾地震(M 8.0)では、地域によって被害の発生した建物の種類が違い、また最新技術と考えられていた煉瓦造の建物にも被害が発生した。このため地震学会や造家学会(現在の日本建築学会)などが地震の調査をしている。その中で、

日本建築史や建築様式を専門とし、築地本願寺の設計などでも知られる東京帝国大学の伊東忠太も煉瓦造建物の被害を調査しており、その原因を、「工事ノ粗漏」、「材料ノ粗悪」、「構造ノ脆弱」、「配合ノ不良」という「人為ノ原因」であるとし、その当時の最新技術である煉瓦造構造物が本質的に地震に対して耐震性が低いわけではないことを報告している³⁻³⁾。なお、東京大学1号館(工学部)の前にある、日本に近代建築をもたらしたジョサイア・コンドル(Josiah Conder)の像の台座の設計には伊東忠太も加わっており、コンドルが踏みつけている邪鬼は地震を象徴しているといわれている³⁻⁴⁾。こんなところにも日本の近代建築学が耐震性を重視し、地震に打ち勝つことを目指していたことが表されていることが興味深い。図3.1にコンドル像と台座でコンドルに踏まれている邪鬼を示す。

この濃尾地震の被害に鑑み、政府は1892年に震災予防調査会を設立して木造建築物などの耐震性の研究を始め、その成果として内務省は1894年に木造建築

物に対する耐震性を客観的に評価した「木造耐震家屋要領」を定めた。

次いで1906年にはサンフランシスコ地震(M 8.2)が発生し、その調査に震災予防協会から東京帝国大学建築学科の佐野利器が、大森房吉と中村達太郎とともに派遣された。佐野は辰野金吾から建築学を学び、辰野の設計した東京駅などの構造設計を行った建築構造の専門家である。佐野は米国での調査後に、鉄筋コンクリート造の耐震性を強く主張しつつ建築物の耐震性に関する研究を続け、1916年に博士論文として「家屋耐震構造論」^{3-5), 3-6)}を発表する。この論文は、家屋の耐震性を構造工学に基づいて科学的に論じたもので、経験や勘に頼ってきた耐震設計を建築構造の耐震理論として構築し、日本の建築構造学の基礎を築いただけでなく、世界初の試みとなった^{3-7), 3-8)}。佐野の論文では地震時に建物に加わる外力として「震度」という考え方を工学的に導入し、震度と構造物の重量を掛け合わせた地震力に耐えうるように構造物を剛な建物になるよう設計するという、「許容応力度設計法」の方向性を示した点が画期的である。この地震による外力としての震度の考え方は、その後も設計水平震度として長く用いられている。

その後、1920年には「市街地建築物法」(現在の建築基準法)が初の建築に関する全国的法律として施行された。ここでは前述の許容応力度法という、建物の構造をモデル化して荷重を計算し、その荷重に耐えうるように建物の設計をする方法が示された。しかし、この段階では鉛直荷重のみが考慮されていた。そして、1923年には関東地震による関東大震災が発生する。ここからの復興のために、佐野は帝都復興院総裁の後藤新平の命を受けて復興院理事及び東京市の建築局長となる。また市街地建築物法は1924年に改正され、法的な耐震規定として震度0.1以上を用いることが定められた。早稲田大学の内藤多仲は佐野の耐震設計法を受け、1924年に発表した「架構建築耐震構造論」³⁻⁹⁾で耐震壁の考え方に言及した。この論文に先立って構造設計に耐震壁を取り入れた日本興業銀行(鉄骨7階建)は、関東大震災でも無被害であり、現在でもこの耐震壁は有効な構造部材として広く設計に用いられている。

次いで、1925年には東京大学地震研究所が設立された。現在の地震研究所は主として理学的な地震学についての研究機関であるが、初代所長の末広恭二は地震工学の分野にも目を向けており、末広が1926年に開発した地震波分解器³⁻¹⁰⁾は様々な周期に対応した振り子を備え、地震動を周波数ごとに分解して記録する



図3.1 ジョサイア・コンドル像(上段)と足元の邪鬼(下段)(筆者撮影)

ことができるという測定器であった。これは、現在は観測波形を周波数分析して得られる応答スペクトルを直接観測して求める地震工学史上画期的なものであった。

第二次世界大戦中の1944年には、資材節約のために建物が崩壊する極限の強度、終局強度を基本とする耐震設計法として「終局強度設計法」が、主として材料削減の観点から臨時制定された。この破壊に至る強度を考慮した終局強度設計は、1950年に施行された「建築基準法」で正式に採用された。この法律は1948年の福井地震の被害を踏まえた市街地建築物法に代わるものである。この法律では、許容応力度設計における地震力として水平震度0.2が採用された。さらに1978年の宮城県沖地震の被害に鑑みて1981年に建築基準法は大幅に改正された。これが俗にいう「新耐震基準」で、これ以前の基準は「旧耐震基準」とも言われている。旧耐震基準では震度5程度の地震に耐えることを設計の目標としていたのを、新耐震基準では震度6～7の大規模地震でも建物が倒壊しないことを目的としている。また、この改定は建物の「変形性能」を重視し、建物が揺れに耐えつつ崩壊しないことを目指している。そして、1995年の阪神・淡路大震災では多くの旧耐震基準に基づいて建てられた建物が倒壊し、耐震補強工事の必要性が広く認識されるようになり、既存の構造物に対する耐震診断方法の研究が進んだ。なお、1970年代からは限界状態設計法という疲労限度も考慮した設計法も開発されISOの規格に取り入れられたことから、ヨーロッパの建築基準から採用されるようになっていった。そして、現在ではシミュレーション技術の進歩などにより性能照射型の設計に移行している。ここまで述べてきた耐震設計法の進化は、多くの被害地震を経験し、多くの地震観測波形の解析により地震被害を理解しようとする、地震工学者の研究成果によるものであるのは言うまでもない。

耐震に関する研究の一方で、1920年代後半には構造物が地震動を受け流すようにする免震構造についての研究が始まり、1934年には世界初の免震構造の建

築物として、不動銀行下関支店ビル（現 中国労働金庫下関支店）が、関根要太郎と岡隆一により実現している³⁻¹¹⁾。この免震構造は、現在では鉄板と薄いゴムを重ね合わせた積層ゴムを用いたものなど多くが実用化されている。また、構造物の受けている地震動を制御して振動を小さくする制振技術についても、おもりやダンパーを構造物中に組み込む方法や、さらには地震動を検知すると積極的に逆位相の振動を励起する同調質量ダンパー（TMD, Tuned Mass Damper）などが、特に高層ビルで多く取り入れられている。ここでも、地震観測を行い構造物の被害を軽減することに役立てる技術が取り入れられている。

現在では地震計の波形の処理を行うCPUなどの性能も上がり、また情報伝達のための通信ネットワークも広範囲に敷設され、高速化も図られてきた。さらに地震計自体も低価格化が進み設置しやすくなってきている。このような状況から地震動を常に遠隔監視し、その情報により大地震の発生とその震源時間、位置、大きさといった情報をいち早く把握し、地震被害防止や軽減のための対応をほぼリアルタイムに行うことができるようにする、リアルタイム地震学³⁻¹²⁾あるいはリアルタイム地震防災³⁻¹³⁾といった考え方が実用化されてきている。このリアルタイムに対応策をとるためには、対象とする地域や構造物に対して主要動到達前の地震情報を伝達して対処する時間が得られることが決定的に重要である。本系統化調査の対象となる早期地震警報システムは、正にこのリアルタイム地震防災を具現化したものである。なお、リアルタイム地震防災は基本的に地震発生後の対応であり、地震予知は事前対応であるため、時間軸上で根本的な違いがある。しかし、いつ・どこで・どの程度の地震が発生するかということを明確にする実用的な地震予知が可能になったとしても、その予知した地震が実際に発生したことを知るための地震観測は必ず必要で、想定された地震が発生した直後にはリアルタイム地震防災の知見が役立つことになるのは言うまでもない。

コラム 4：日本の地震学者

ミルンら明治のお雇い外国人が日本から去った後に、その教えを引き継いで地震学を深化させていった多くの日本人の地震学者が生まれ、そして地震大国ならではの危機感から多くの地震工学者が生まれた。彼らは新しい現象や法則の発見をし、それを基に新しい理論を構築し、また日本国内のみならず海外でも活躍した研究者もあり、さらには、今でも世界中で広く使われる基本的な事柄にも日本人の研究成果によるものも多い。もちろん、これらの研究は今でも多くの研究者によって受け継がれ進歩している。

ここでは、これまで活躍してきた多くの日本人地震学者や地震工学者に敬意を表し、一部ではあるが紹介する。

■ 関谷清景 (1854-1896) (C4-1) ~ (C4-3)

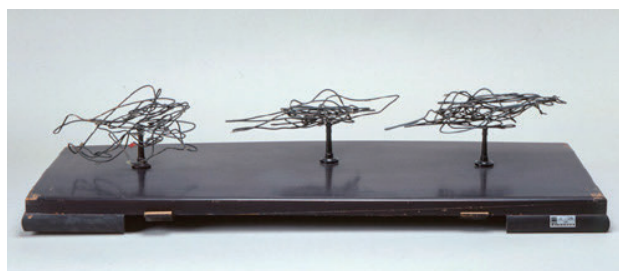


図 C4.1 関谷清景が製作した地震波形の「雛形」
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

関谷清景は 1885 年に東京大学の本郷に新たに地震学実験所が設けられると物理学教授ユーイングの助手となり、1886 年に世界初の地震学講座が開講されると教授となった。関谷は、1887 年 1 月 15 日に東京で観測した地震計の記録をもとに地面の三次元的動きを針金で表わした、地震動を非常に理解しやすい「雛形」を教育用に製作した。これは国立科学博物館に所蔵されており、今でも見ることができる (図 C4.1)。

■ 田中館愛橘 (1856-1952) (C4-4), (C4-5)

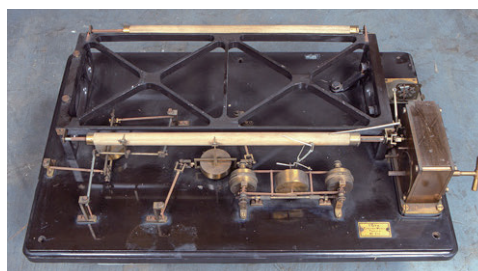
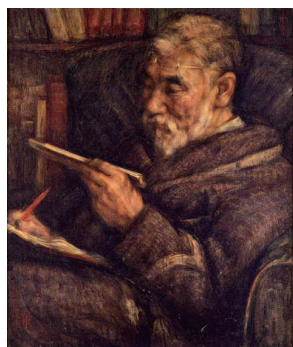


図 C4.2 田中館式地震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

田中館愛橘は、東京帝国大学の地球物理学者で重力の測定や地磁気の測定を専門としていた。1891 年の濃尾地震の際にも現地で地磁気測定を行い、地震前後の地磁気の測定結果により地震が地球の磁場に変化を及ぼしていることを発見した。このことから地震予知には地磁気の測定が必要不可欠と考えられるようになり、現在まで続く地磁気調査のきっかけとなった。また、濃尾地震の測定の際には「一人で観察してくるから」と言って出かけ、根尾谷断層を発見した。この断層崖の観察が後の「断層地震説」につながっている。他にも、上下動の観測にゼンマイとばねを使う特徴的な構造をした田中館式地震計を開発した (図 C4.2)。

なお、ここに掲げた計算尺を手にする肖像画は洋画家中村彝によるもので、教授在籍 25 周年祝賀会で贈られた。現在は東京国立近代美術館が所蔵しているため、常設展などで目にすることができる。

■ 大森房吉 (1868-1923) C4-6)~C4-8)



図 C4.3 大森式地震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

大森房吉は東京帝国大学理科大学（現在の東京大学理学部）で地震学を専攻し、在学中に助手となったのちに講師を経て教授となる。濃尾地震および余震の調査により余震が指数的に減少することを発見し、また初期微動継続時間から震源の距離を推定できることなど、非常に多くの成果を上げている。また関東地震の発生を予知できるかどうか今村明恒と論争になったことでも有名である。

さらに、従来の地震計は地震検知とともに記録を開始していたのを、ドラム状にした記録紙に常時記録することができるようにした大森式地震計（図 C4.3）を開発した。これにより初期微動から地震を記録することができるようになった。

また大森には、1914 年にノーベル物理学委員会から 1916 年度のノーベル物理学賞の候補として研究成果をまとめた論文提出の依頼状が届いたものの提出しておらず、このためか 1916 年度のノーベル物理学賞は該当者なしとなっている。

■ 今村明恒 (1870-1948) C4-9)~C4-13)

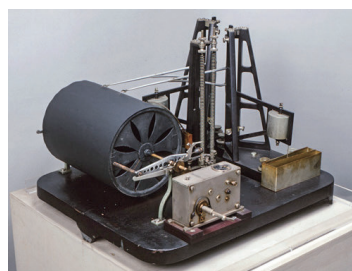


図 C4.4 今村式 2 倍地震計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

今村明恒は、東京帝国大学理科大学の大学院で関谷清景や田中館愛橘に学び、特に震災予防と地震予知に関する研究に熱心に取り組んだ。何よりも有名なのは、大森房吉との関東大震災の予知に関する論争である。今村は地震発生の周期から東京に大震災が訪れるのは近いので、地震が起きたら防火に注力するように民衆に説いた。しかし、この説が社会的な騒動となったことから、大森房吉はこれを浮説であると批判した。これは、防災意識を高めるべきか、あるいは社会的混乱を防ぐべきか、その立場の違いから来るものであった。結局は 1923 年に関東大震災が発生したことで決着したように見えるが、本質的には現代でも解決できていない問題である。

また、今村は大きな地震の記録が振り切れてしまう問題を解決するため、1911 年には低倍率の今村式 2 倍地震計（図 C4.4）を製作していた。この地震計は 1923 年の関東地震の波形を一部の観測点で振り切れずに記録できている。

今村は防災教育にも熱心に取り組んでおり、「稲むらの火」という、安政江戸地震の際に紀州沿岸に津波が押し寄せた際にある人物が刈り入れたばかりの稲束に火をつけて村人に警告を発したという、今でも知られている津波物語を尋常小学校の国語読本に採用するよう働きかけた。

■ 末広恭二 (1877-1932) C4-14)



末広恭二は、東京帝国工科大学造船学科を卒業後に三菱造船所を経て大学院に入り、最終的には工科大学の教授の任についた。また、1918年には三菱研究所を設立についても奔走し所長となった。造船工学者として鉄筋コンクリート船を建造するかたわら、専門とする振動学の立場から地震や地震計に興味を持っており、関東大震災をきっかけとして地震研究所の設立を進言し、1925年に設立されると所長に就任した。

1922年「伝動軸の振れ計の研究」で帝国学士院賞を受賞するなど造船分野での活躍とともに、1931年には乞われて米国土木学会などで強震観測の必要性を説くなど地震工学の分野でも大きな足跡を残したが、米国からの帰国後体調を崩し、地震研究所所長事務取扱として現役のままで亡くなった。

ちなみに、寺田寅彦による追悼文^{C4-15)}は末広の人となりなどがよくわかる、人間味にあふれた随筆となっている。

■ 佐野利器 (1880-1950) C4-16)~C4-18)



佐野利器は、東京帝国大学建築学科で辰野金吾らに学んだ建築家であり、特に建築構造学者として耐震構造の第一人者として辰野金吾や伊東忠太の設計した建物の構造設計を多数手がけている。1906年のサンフランシスコ地震の調査に赴き耐震設計について研究を進めた佐野は、その成果を「家屋耐震構造論」としてまとめたが、これは「震度」の導入など画期的かつその後の日本における耐震設計の基礎となるものであった。佐野の建築に対する姿勢は、1910年の「我国将来の建築様式を如何にすべきや」という討論会で「建築美の本義は重量と支持との明確なる力学的表現に過ぎない事と思われる。」とディティールではなく構造そのものが重要であることを説いたことからわかる。

関東大震災を受けて、佐野は帝都復興院理事・建築局長に就任し、関東大震災後の復興事業・土地区画整理事業を推進した。その中でも震災で焼失小学校を耐震耐火構造(RC造)で建て直した復興小学校は有名であり、中には小公園を一体的に整備して災害時の避難所としても使えるようにしたものもあった。銀座の数寄屋橋交差点の脇に今も建つ泰明小学校など、復興小学校の一部は今でも現役の小学校や地域のセンター等として使われている。

■ 内藤多仲 (1886-1970) C4-19)~C4-21)



(提供：早稲田大学)

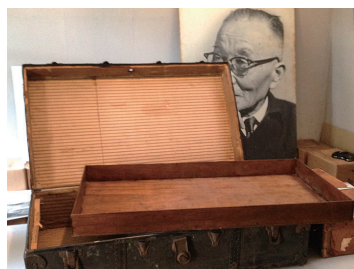


図 C4.5 内藤多仲が耐震壁を生み出すきっかけとなったトランク
(提供：早稲田大学)

内藤多仲は東京帝国大学で佐野利器に耐震工学を学んだ建築構造の専門家であり、特に「耐震壁」の生みの親として知られている。これは、内藤が米国に留学した際に列車で移動しているときに、荷物を入れるためにトランクの中仕切りを外したところ、列車の振動でトランクが壊れてしまったことに端を発し、また帰国時の船が大波に揉まれても壊れないのはデッキと隔壁が密に入っているためであると気づいたこ

とによる。この時のトランクは今でも所属していた早稲田大学で大切に保管されている（図 C4.5）。内藤が耐震壁を取り入れて設計した日本興業銀行本店や歌舞伎座は関東大震災でも被害を受けず、耐震壁を用いた構造設計が有効であることを示している。

また内藤は、東京タワーや名古屋テレビ塔、さっぽろテレビ塔など、多くの鉄骨造の塔を設計したことで有名で、「塔博士」とも呼ばれている。

■ 石本巳四雄 (1893-1940) C4-22)~C4-24)

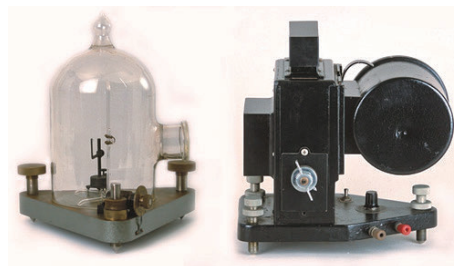


図 C4.6 シリカ傾斜計
(国立科学博物館から許諾を得て掲載)

石本巳四雄は、東京帝国大学実験物理学科を卒業し工科大学造船学科に勤務のち三菱造船研究所勤務、フランス留学を経て、東京帝国大学地震研究所に赴任し、1933年には第2代所長となる。陸地部分で断層により引き起こされる地震は、地震前にわずかでも地表に影響を与えとの考えから、石本は土地の傾斜を測るシリカ傾斜計を製作した。これは、比較的運搬がたやすく、また温度の影響がほとんどない画期的なものであった（図 C4.6）。また地震工学の分野では地震被害の研究には加速度記録が重要であることに鑑み、地震計の観測特性を固有周期の短い振子と適当な減衰とすることで、振り子の動きが加速度に比例する石本式加速度地震計を製作した。この地震計は2011年の東北地方太平洋沖地震も記録している。さらに、ある観測点で記録された地震動の最大振幅と出現頻度は指数的に減少するという式（石本・飯田の式）でも有名である。

■ 和達清夫 (1902-1995) C4-25)~C4-27)



和達清夫は1925年に東京帝国大学理学部物理学科を卒業して、日本気象学の父といわれる藤原咲平に誘われて中央気象台に入った。1947年に藤原の跡を継いで第6代中央気象台台長となり、1956年に気象庁が発足すると初代長官になる。和達は1927年に地球の深いところでも地震が発生することを示したが、これはプレートの沈み込みの発見につながる重要な研究成果である。また1931年には、浅いところの地震について地震波形記録の最大振幅と震央距離との関係を調べ、地震の規模によって、地震ごとに並行する線を描くことを示した。これがリヒターのマグニチュードの定義につながった。このように世界的に見ても重要な研究成果を数多く上げている。

■ 金森博雄 (1936-) C4-28)



図 C4.7 イタリア・ボンベイでの記念写真
(右から、金森博雄、吳逸民、中村豊) (筆者撮影)

金森博雄は東京大学地震研究所からカリフォルニア工科大学に移り、そこでの長い研究生活で多くの成果を上げている。たとえば、観測波形から地震の発生機構を明らかにしてプレートテクトニクス理論に貢献したほか、地震の持つエネルギーに着目したモーメントマグニチュード (M_w) を提唱し、従来のマグニチュードは巨大地震では頭打ちになる欠点を解消した。結果的に M_w は世界中で使われる地震の尺度となっている。また、リアルタイム地震学の分野

でもカリフォルニアにおける早期地震警報システムの先駆けとなる CUBE システムの開発者としても知られている。なお、本稿の筆者の一人の中村豊との共同研究で、カリフォルニアにもユレダスを設置した。

現代の研究者が地震波形そのもののかたちを見ずにコンピューターで計算をしてしまうことを憂いて、人間の眼で波形全体の形を見ることで発見される事象があるという警鐘を鳴らしている。

図 C4.7 は、右から金森博雄、国立臺灣大學教授の呉逸民（台湾における早期地震警報システムの研究者、「5.9.3 台湾の早期地震警報システム」参照）、本系統化調査の筆者の一人の中村豊である。

参考文献

- C4-1) 関谷清景, https://ja.wikipedia.org/wiki/関谷清景#/media/ファイル:Sekiya_Seikei.jpg (2025年9月27日閲覧)
- C4-2) 桑原央治:「世界初の地震学教授 関谷清景 (1855-1896)」, 地震学偉人伝, その2, なみふる, No.96, 06-07 (2014)
- C4-3) 橋本万平:「地震学事始 開拓者・関谷清景の生涯」, 朝日選書, 237, 朝日新聞社 (1983)
- C4-4) 中村彝:「田中館博士の肖像」, [https://ja.wikipedia.org/wiki/田中館愛橘#/media/ファイル:Dr_Tanakadate_by_Nakamura_Tsune_\(National_Museum_of_Modern_Art_Tokyo\).jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/田中館愛橘#/media/ファイル:Dr_Tanakadate_by_Nakamura_Tsune_(National_Museum_of_Modern_Art_Tokyo).jpg) (2025年9月27日閲覧)
- C4-5) 中村清二:「田中館愛橘先生」, 中央公論社 (1944)
- C4-6) 大森房吉, https://ja.wikipedia.org/wiki/大森房吉#/media/ファイル:Omori_Fusakichi.jpg (2025年9月29日閲覧)
- C4-7) 桑原央治:「地震の生神さん 大森房吉 (1868-1923)」, 地震学偉人伝, その3, なみふる, No.98, 04-05 (2014)
- C4-8) 上山明博:「地震学をつくった男・大森房吉」, 青土社 (2018)
- C4-9) 今村明恒, https://ja.wikipedia.org/wiki/今村明恒#/media/ファイル:Akitsune_Imamura2.jpg (2025年9月29日閲覧)
- C4-10) 桑原央治:「信念の人 今村明恒 (1870-1948) ①」, 地震学偉人伝, その4, なみふる, No.101, 04-05 (2015)
- C4-11) 桑原央治:「信念の人 今村明恒 (1870-1948) ②」, 地震学偉人伝, その4, なみふる, No.102, 02-03 (2015)
- C4-12) 桑原央治, 生野領野:「信念の人 今村明恒 (1870-1948) ③」, 地震学偉人伝, その4, なみふる, No.104, 02-03 (2016)
- C4-13) 山下文男:「君子未然に防ぐ—地震予知の先駆者今村明恒の生涯—」, 東北大学出版会叢書, 8, 東北大学出版会 (2002)
- C4-14) 末広恭二, https://ja.wikipedia.org/wiki/末広恭二#/media/ファイル:Kyoji_Suehiro_Chief_of_Naval_Architecture_Department_of_Koshu_Gakko.jpg (2025年9月29日閲覧)
- C4-15) 寺田寅彦:「工学博士末広恭二君」, 寺田寅彦全集, 第六巻, 岩波書店, 110-118 (1961)
- C4-16) 佐野利器, <https://ja.wikipedia.org/wiki/佐野利器#/media/ファイル:佐野利器.jpg> (2025年9月29日閲覧)
- C4-17) 佐野利器:「家屋耐震構造論 上編」, 震災予防調査会報告, 第83号, 1, 1-142 (1916)
- C4-18) 佐野利器:「家屋耐震構造論 下編」, 震災予防調査会報告, 第83号, 2, 1-137 (1917)
- C4-19) 内藤多伸:「架構建築耐震構造論」, 早稲田大学出版部 (1924)
- C4-20) 内藤多伸:「日本の耐震建築とともに」, 雪華社 (1965)
- C4-21) 望月重:「耐震壁ものがたり」, 鹿島出版社 (2009)
- C4-22) 石本巳四雄, https://ja.wikipedia.org/wiki/石本巳四雄#/media/ファイル:Ishimoto_Mishio_in_1929.jpg (2025年9月29日閲覧)
- C4-23) 石本巳四雄:「シリカ傾斜計」, 地震, 第1輯, vol.1, no.1, 17-32 (1929)
- C4-24) 石本巳四雄, 飯田汲事:「微動計による地震観測 (一)」, 震研彙報, 17, 443-478 (1939)
- C4-25) 和達清夫, https://ja.wikipedia.org/wiki/和達清夫#/media/ファイル:Kiyoo_Wadachi.jpg (2025年9月29日閲覧)
- C4-26) 和達清夫:「地震」, 中公文庫, わ-13-1, 中央公論社 (1993)
- C4-27) 鈴木尉元:「和達清夫の地震学と地盤沈下研究への貢献」, 地球科学, 58巻, 61-64 (2004)
- C4-28) 金森博雄:「巨大地震の科学と防災」, 朝日選書, 912, 朝日新聞社 (2013)

3.2 地震予知

3.2.1 日本における地震予知

日本地震学会のミルンの設立記念講演^{3-14), 3-15)}には以下のような文言がある。

凡欧州諸国ニ於テ地震ノ起コリシ以來學者ノ最モ注目シタル要點ハ地震ノ發起ヲ前知セント欲スルノ事項ナリ從來日本ニ於テ斯學ノ興起スルモ亦此意ニ外ナラズ即チ地震ハ或ル他ノ現象ト關係ヲ有スルヤヲ推究スルニ在リ者ナリ若シ地震ノ發起ニシテ之ヲ前知スルノ手段ヲ得ハ地震國ニ棲息スル人民ノ幸福ハ實ニ大ナリト謂フベシ故ニ斯學ヲ研究スルハ人世有益ノ事業ト稱揚スルモ蓋シ過言ニ非ザルベシ

この設立記念講演が掲載されている日本地震学会の英文雑誌の書影とミルンの肖像を図3.2、図3.3に示す。

この講演では、ミルンは、その当時の地震学者は地震の前知(予知)を重点的に研究していて、日本でも地震と他の現象との関係を研究して地震予知の手段を得たら、地震のある国の人民の幸福に大いに貢献するので、地震予知の研究は社会に有益なことであると述べている。

その後、日本における本格的な地震予知研究は、1962年に地震研究者の有志が出した「地震予知—現状とその推進計画」、通称「地震予知のブループリント」から始まった。これを受けて文部省測地学審議会が1964年に「地震予知研究計画の実施について」を建議し、直前予知に向けた様々な研究が進められてき

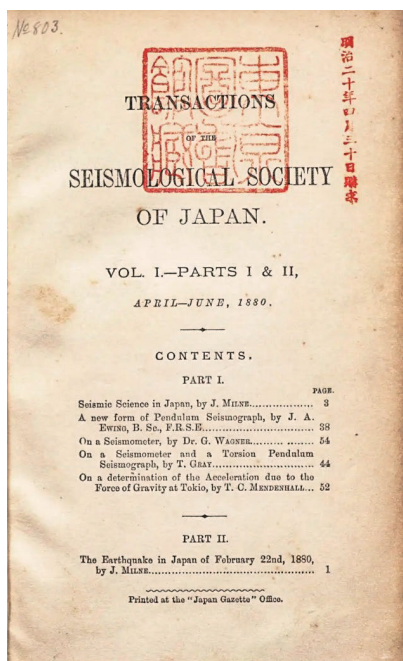


図 3.2 日本地震学会英文論文集
Transactions of the Seismological Society of Japan
Vol.1 表紙³⁻¹⁶⁾



図 3.3 ジョン・ミルン (John Milne)³⁻¹⁷⁾

た。この中で、1978年に東海地震の直前予知を前提とした「大規模地震災害特別措置法」が制定され、また長期的地震予知と短期的地震予知という概念が導入され、地震予知の実用化を目指していた。しかし、研究が始まってから30年余り経った1995年の兵庫県南部地震まで多くの被害地震を予測することができなかった。この結果をうけて、地震予知研究計画が見直されるとともに「地震防災対策特別措置法」が制定された。ここで、地震防災対策の強化を図るために調査研究の推進のための体制の整備等が定められ、地震調査研究推進本部が設立された。さらに、1998年からは、地震発生に至るモデルの構築と、地震を含めた地殻活動のモニタリングと予測シミュレーションの実現を目的として「地震予知のための新たな観測研究計画」に基づいて研究が進められることになり、高精度な地震計やGPSなどによる観測網が整備されていくことと

なった。

このような状況を経ても2011年の東北地方太平洋沖地震を予知することもかなわず、現在では地震学会もウェブサイト³⁻¹⁸⁾で、以下のようにコメントしている。

現時点で、地震予知(警報につながるほど確度の高い地震予測)を行うのは非常に困難であると考えています。科学的に検証され、確立された地震予知手法はまだないという立場です。ただし、将来的に地震予知はできないとの意見を表明しているものではありません。地震学会としては、引き続き、地震予知研究を行う研究者達の議論や意見交換を行える場を提供します。

つまり、いつどこでどの程度の地震が発生するかということを正確に予知するという、防災に役立つような短期的な地震予知は現時点では不可能であるといわざるを得ない。しかし、この地震予知研究のために進められてきた各種観測網の充実は、地震発生から始まる過程を詳細かつリアルタイムに知ることにも役立つため、リアルタイム地震防災にとっても有効に活用することができる。

3.2.2 海外における事例

海外における地震予知に関する代表的な事例を以下にまとめる。

中国³⁻¹⁹⁾では、1966年に邢台(シンタイ)にM 6.8とM 7.2の地震が相次いで発生し、8,000人を超える犠牲者を出すなど大きな被害をもたらした。この状況を受けて毛沢東主席の命を受けた周恩来総理は、地震予知・予報に全力を挙げることを指示した。これに従い、中国の科学者たちは、まず大地震発生の可能性の高い地域を地震発生頻度などで絞り込み、前兆現象の観測を強化することとした。その過程で、遼寧省では地下水の異常や宏観異常現象(動物の異常行動)がみられ、また傾斜計の観測データも通常と違う傾向を示していることがわかった。さらに1974年12月にはこの地域にM 4.8の地震が発生したため観測や情報取得が重点的に行われ、前震の頻度分布など様々な要因から大地震が発生する可能性が高いという判断となった。ついには、遼寧省南部の一部の地域には1975年2月4日の午前10時には屋外に避難するように命令が出て、同日19時36分にM 7.3の海城地震が発生した。建物などには甚大な被害が発生したが、死傷者はほとんど出ず、地震予知の成功例として知られている。その後雲南省で1976年5月29日にM 7.5とM 7.6の地震が発生し大規模な山崩れなどの被害が出たが、これに対する地震予報も発令され、これも成功例となっ

ている。しかし、1976年7月の唐山地震(M 7.8)の際には直前の異常現象は観測されていたものの地震予報が発令されることはなかった。なお、これらの中国の地震予報は、いつ、どこで、どの程度の、といった情報がほとんどなく、一定の地域に避難指示を出すものだったので、日本の短期予報とは様相が異なることにも注意が必要である。

ギリシア^{3-20)~3-22)}では、アテネ大学の物理学者パナヨティス・ヴァロツォス(Panayotis Varotsos)、カエサル・アレクソプロス(Caesar Alexopoulos)、コスタス・ノミコス(Kostas Nomikos)の3人によって提案された、地球電磁気学的な観測に基づいた地震予知が1985年から行われており、この3人の頭文字からVAN法と呼ばれている。この方法は地中の自然電位を長さの異なる複数の短測線(100 m ~ 200 m程度)や長基線(数 km)で連続観測し、そこから地電流に現れた異常シグナル(SES, seismo-electric signal)を探し、それがノイズでないことを確認したのちに震源とマグニチュードを推定して予知情報を発令するものである。この方法により60 %程度は予知に成功しているという報告もあるが、VAN法の予知情報にはいつ発生するかという情報がないため、これも日本の短期予想とは性質が異なる。

このように地震予知が活用されつつある国がある一方で、以下のようなことも起きている。イタリアで2009年4月6日にラクイラ地震(M_w 6.3)が発生したが、安全宣言が出されているにもかかわらず死傷者を含めた大きな被害が生じた。この状況に対して、地震情報の分析と情報の伝達が慎重に行われなかったとして安全宣言を出した委員会メンバー(6名の地震学者および地震工学者と1名の政府関係者)が過失致死罪に問われた。つまり、科学者が適切な地震やその被害の予測をできなかったことが罪に問われるかどうかということが争われたことになり、これも地震予知を取り巻く問題の一つといえることができる。なお、裁判の結果であるが、一審では全員に実刑判決が出され、二審で学者に対する無罪と政府防災局の副長官に執行猶予付きの判決が出て結審している。この全員が有罪とされた一審判決を受けて、日本においても、日本地震学会³⁻²³⁾、日本地震工学会³⁻²⁴⁾、日本地質学会³⁻²⁵⁾、日本地球惑星科学連合会³⁻²⁶⁾などが、自由な発言と議論による研究の発展が妨げられることへの危惧や、今後もより安全な社会を目指して研究を進めていくことへの責務などを述べた声明をそれぞれ表明している。

3.3 地震防災と地盤や構造物の診断方法

地震防災の基本は、建物や構造物を耐震化して、発生が予想される地震動に対して十分な耐力をもたせることである。また、構造物のみならず、それを支える地盤についても必要な対策のためにその特性を知ることとは防災上非常に重要なことである。

国鉄の鉄道技術研究所(現 鉄道総合技術研究所)の中村豊は、鉄道沿線で観測された地震波形を検討している際に、通常言われているように地震の規模が大きいと低い周波数が多く観測されるのはもちろん、同じ地点で観測された地震波形は地震の規模の大小に拠らず類似していることに気が付いた(図3.4)³⁻²⁷⁾。

このことがきっかけとなり、常に地盤が振動している、いわゆる常時微動について検討したところ、水平動の時間変動はそれまで知られていたように時間帯によって大きく異なるが、水平動と上下動の比を取ると安定して卓越振動数と増幅倍率が得られることがわかった。これは地震波形についても同じ傾向がある。この卓越振動数というのは、地盤の振動波形を振動数ごとの大きさとして表したときに、最も大きく振動している振動数のことである。また、地震などの地盤に入力した振動が、その卓越振動数でどれだけ増幅されるかを示すのが増幅倍率である。固い地盤では卓越振動数が高く増幅倍率が小さく、地盤が柔らかくなるにつれて卓越振動数が低く増幅倍率が大きくなる傾向がある。得られた水平動と上下動のスペクトル比は他の方法から推定した地盤の伝達関数とも調和的な傾向を示していた。地表面の一点で常時微動を測定するだけで地盤特性を推定することができるこの方法は、従来は多数のボーリング調査を高密度で実施するような、多くの人手、膨大な時間、そして莫大な経費がかかるプロセスを回避できる、簡便かつ確実な方法である^{3-27), 3-28)}。このため、この水平動と上下動のスペクトル比、H/V スペクトル(HVSR, QTS ともいう)を用いて卓越振動数などを算出する方法は“Nakamura Method”とも呼ばれ、地盤の増幅特性解析手法として世界中で広く活用されている(例えば^{3-29)~3-32)})。また、常時微動の水平動と上下動の比を取るという簡単な操作で卓越振動数を推定することができる意味を理論的、数値的に検証することも活発に行われており、中村もそれについての解説を行っている^{3-33), 3-34)}。さらに、この方法の応用として、地盤や建物がどの程度の地震動に耐えることができるかを知るために、常時微動測定のスぺクトル比から健全度を評価する、壊れやすさ

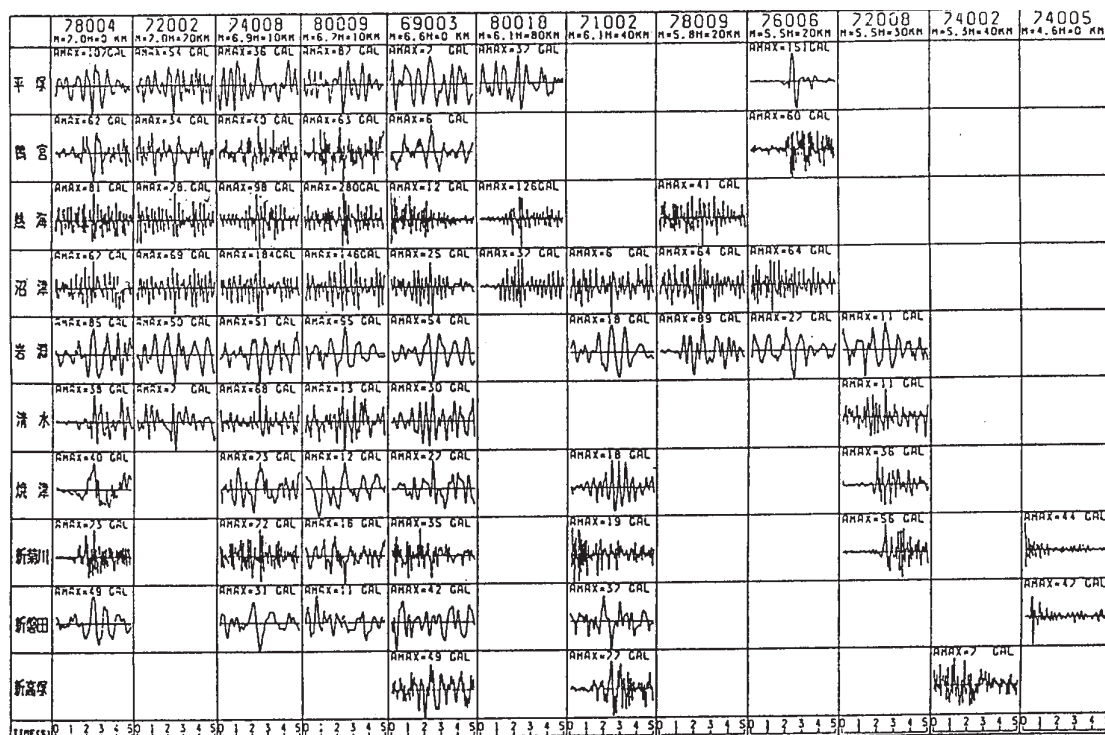


図 3.4 地震や観測点による地震観測波形の違い (3-27) (掲載許諾)

指数 K 値という指標も提案されている (3-35), (3-36)。

ここに示したのはあくまでも一つの例であるが、いづれにしても、地震による外力を受ける地盤や構造物について、現在有する耐力を的確に評価し、もしも耐力が不足していたら補強するなどの対策を施し、来る地震に備えるということは地震防災の基本である。

3.4 早期地震警報の萌芽

米国のカリフォルニア州においては、サンアンドレアス断層やハイワード断層などが存在し、繰り返し地震被害を受けてきた。このような状況のもと、早期地震警報のアイデアは、サンフランシスコを対象として 1868 年に公表されたものまで遡ることができる (3-37)。これは 1868 年 11 月 3 日付けの San Francisco Daily Evening Bulletin 誌に、サンフランシスコの医学博士 クーパー (J. D. Cooper) が、地震の早期検知とこれに基づいた地震警報の構想を発表したもので、意識すると概略以下のように述べている。

地震波動は、水面に石を投げ入れたときのように、震源から周囲に拡がっていく。そこで、次のような地震警報装置を提案する。すなわち、サンフランシスコから 10 ~ 100 mile 離れた震源の近くに感震器を設置し、大きな地震動を検知するとすぐにそのことを電信でサンフランシスコに伝える。そして、大きな地震動

がやってくる前に、市の中央に建てられた高い塔に吊るされた大きな釣り鐘を乱打させれば、多くの人命を救うことができるだろう。もちろん、この警鐘が地震警報であることは知られていなければならないし、地震感知から通報・警鐘までを自動化する必要もある。

この文章は、「日本の磁気式地震計が失敗に終わったため、…」と始まっており、時期的に 1855 年の安政江戸地震の際に地震とともに磁力が無くなることを応用した地震計、地震時斗 (じしんとけい) のことを意識したものと考えられる。これは安政江戸地震のことを仮名垣魯文が記したとされる「安政見聞誌」 (3-38)

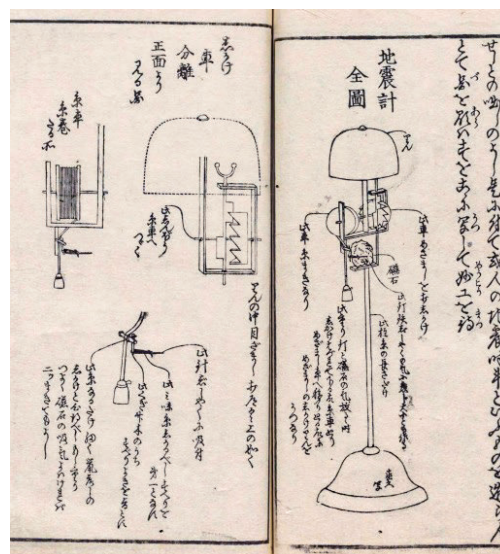


図 3.5 地震時斗 (3-38)

に認められるものである。

また、1880年に世界ではじめて設立された地震学会である日本地震学会において、学会の創立者であり、日本の地震学の始祖ともいべきミルンによる前掲の最初の論文「Seismic Science in Japan」^{3-14), 3-15)}にも、以下のような早期地震警報のアイデアが述べられている。

これまでの地震の例をもとに考えると陸地の震災を避けるのは全く難しくない。なぜならば、地震波動の速度を東京横浜間の15マイルを1分半で伝わるとすると、東京の周囲に20から60マイルのところに電信局を配置し震動発生を伝達すると、その地震動が東京に到達するまでに2から6分の余裕時間がある。警報が達した時点で大砲を鳴らして市民に通報したら地震災害を避ける暇がある。もちろん号砲は通常と区別したものにし、強い地震の時に限る。つまるところ、この考えは実際に行うかどうかは別にして、従来地震は決して事前を知ることができないと断定する人の勘違いを正したいと考えたものである。

これも、地震波の伝播速度と電気通信の速度の差を利用して、地震が発生した地域の情報を都会にいち早く伝えようとするものであった。

さらに時代は進み、1920年代のNature誌にもImperial College of Science and Technology(現 インペリアルカレッジロンドン)のエバンス(Evans)により早期地震警報のアイデアとその検証が1923年³⁻³⁹⁾、1927年³⁻⁴⁰⁾、1928年³⁻⁴¹⁾に発表されている。これらの一連の記事には、地殻の歪や変形が蓄積し、それが突然解放されることによる破壊が地震を引き起こすものとし、これ

を地表の沈下や傾斜を計測することで地震発生を事前に警告することがきけるといことが述べられている。1923年10月に掲載された最初の記事では、日本の地震を引き合いに出しつつ、ミルンがイギリス帰国後に開発した光学式のミルン・ショウ地震計であればこのような傾斜も十分に観測できるはずだと述べている。また、1927年にチェコのプラハで開催された第3回万国測地学・地球物理学総会において、エバンスは東京帝国大学地震学教授の今村明恒に1923年のアイデアを話し、今村から実際に1927年の丹後地震や他の地震の際に先行して傾斜が観測されていることを聞いている。これをもとに1927年には、地方の観測所に傾斜計を設置し、通常と異なる傾斜を観測したら中央観測所で電気ベルが鳴動することで知らせることを提案している。さらにエバンスは、1928年の東京帝国大学地震研究所所長の石本巳四雄の論文³⁻⁴²⁾について、フランス語の概要と図表から1927年の丹後地震の際に観測された地盤の傾斜について理解し、1928年の記事では、地盤の傾斜量と地震の大きさについて言及し、それまでエバンスが述べてきたアイデアが確認できたことを報告している。1923年の関東地震や1927年の丹後地震について、その直後からイギリスにおいて情報が入手でき、早期地震警報のアイデアが100年近く前から練られていたことに驚きを感じる。

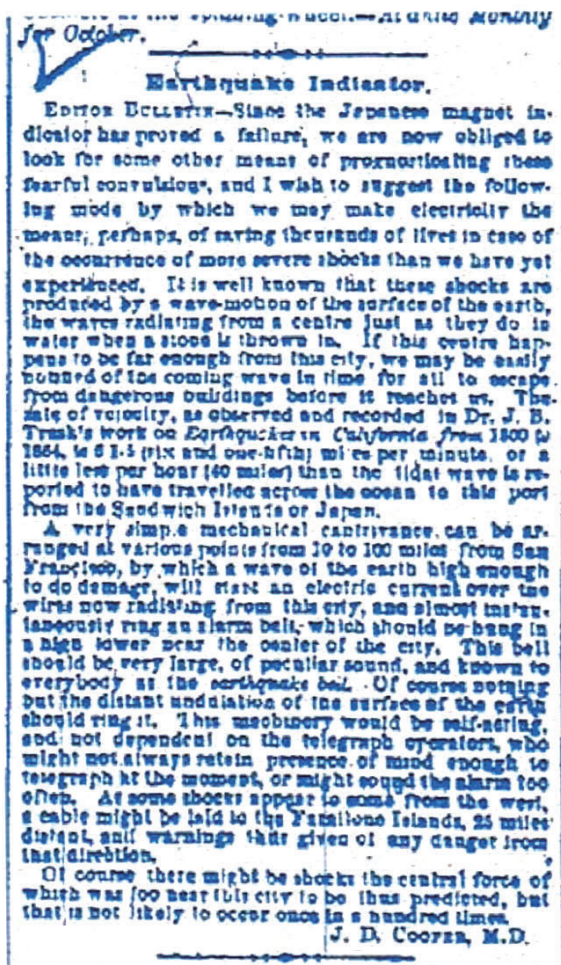
このように、最初期の早期地震警報のアイデアがいくつ芽生えていたが、そのどれもが日本との深いつながりのあることも、時代を経て日本で早期地震警報が実用化されたことを考え合わせるととても興味深い。

コラム5：クーパー博士とミルン博士の早期地震警報のアイデア

早期地震警報についての論文など1868年の医学博士クーパーの新聞記事^{C5-1)}について言及されているものは見かけるが、その全文を目にすることは少ないためここに示しておく。

Earthquake Indicator

EDITOR BULLETIN-----Since the Japanese magnet indicator has proved a failure, we are now obliged to look for some other means of prognosticating these fearful convulsion, and I wish to suggest the following mode by which we may make electricity the means, perhaps, of saving thousands of lives in case of the occurrence of more severe shocks than we have yet experienced. It is well known that these shocks are produced by a wave-motion of the surface of the earth, the waves radiating from a center just as they do in water when a stone is thrown in. If this center happens to be far enough from this city, we may be easily notified of the coming wave in time for all to escape from dangerous buildings before it reaches us. The rate of velocity, as observed and recorded in Dr. J. B. Trask's work on Earthquakes in California from 1800 to 1864, is 61.5 (six and one fifth) miles per minute, or a little less per hour (40 miles) than the tidal wave is reported to have traveled across the ocean to this port from the Sandwich Islands or Japan.



A very simple mechanical contrivance can be arranged at various points from 10 to 100 miles from San Francisco, by which a wave of the earth high enough to do damage, will start an electric current over the wires now radiating from this city, and almost instantaneously ring an alarm bell, which should be hung in a high tower near the center of the city. This bell should be very large, of peculiar sound, and known to everybody as the earthquake bell. Of course nothing but the distant undulation of the surface of the earth should ring it. This machinery would be self-acting, and not dependent on the telegraph operators, who might not always retain presence of mind enough to telegraph at the moment, or might sound the alarm too often. As some shocks appear to come from the west, a cable might be laid to the Farallone Islands, 25 miles distant, and warnings thus given of any danger from that direction.

Of course there might be shocks the central force of which was too near this city to be thus protected, but that is not likely to occur once in a hundred times.

J. D. COOPER, M.D.

また、ミルンの日本地震学会における創立記念論文についても、早期地震警報について述べている部分の英文^{C5-2)}と日本語版^{C5-3)}の双方を示す。

On a smaller scale if it should be thought desirable we might, in a familiar manner warn ourselves against many land shocks. For a shock to travel from Yokohama to Tokio, passing directly through the two places, it would have to traverse about fifteen miles of soft earthy and rocky strata, to do which it would probably take a minute and a half. Round Tokio and Yokohama. We have at the present a ring of telegraph stations at distance of from 20 to 60 miles. To cause a shock as it passed any of these stations to complete an electric circuit would be a matter very easy to accomplish. Such a current being completed it might almost instantaneously be made to Gro a gun in Tokio or Yokohama, and the inhabitants of those places would thus have from two to six minutes warning of at least a large propagation of all the shocks which visit them. The nature of the shock which was to be exposed would, to a great extent, depend upon the adjustment of our instruments. If the instruments were delicate we might often be alarmed at hearing the report of cannon and afterwards only receive a tremor. To make a contrivance like this practical it would be necessary so to construct it that the circuit could only be completed by a shaking that was tolerably severe, and that the cannon loud a report easy to distinguish. Those last remarks have been made, not with the hope that I shall ever see them realized, but with the hope that they may help to convince those who regard the foretelling of an earthquake as a problem too difficult to be solved, and to show them it is by no means so utterly beyond our reach as might, at first sight, be anticipated.

今前例ニ據テ之ヲ考フレハ陸地ノ震災ヲ避クルモ亦タ難カラズ如何トナレハ地震波動ノ速度ハ東京横濱間ノ如キ距離十五英里ヲ一分時半ヲ以テ経過スル者トセハ東京周圍廿英里乃至六十英里ノ所在電信分局ヨリ震動ノ發起ヲ報センニ其波動ノ東京ニ達スルマテ二分時乃至六分時ノ間隙アルベシ故ニ此警報ノ達スルヤ否ヤ大砲ヲ放ツテ之ヲ人民ニ報告セハ地震災害ヲ避クルニ違アルベシ尤モ其號砲タルヤ通常ノ者ト區別セサルベカラズ且其報知ハ強烈ノ地震ニ限ルヲ要ス畢竟此等ノ考説ハ其實地ノ舉行如何ハ暫ク措キ從來地震ハ決メ之ヲ前知シ得ヘカラズト斷定スル輩ノ迷夢ヲ破ラント欲スル者ナリ

参考文献

- C5-1) J. Cooper: "Earthquake Indicator", San Francisco Daily Evening Bulletin, November 3 (1868)
 C5-2) Milne, J.: "Seismic Science in Japan", Transactions of the Seismological Society of Japan, vol 1, the Seismological Society of Japan, 10.11501/1678210, 3-37 (1880)
 C5-3) ジョン・ミルン:「地震学総論」, 日本地震学会報告, 第一冊, 丸屋善七, 1-30 (1884)

3.5 早期地震警報の実現に向けて

1868年の医学博士クーパーによる早期地震警報のアイデアは、1988年にカリフォルニアの地質学会誌で新幹線の早期地震検知警報システム「UrEDAS」が紹介³⁻⁴³⁾されるまで忘れられていた。しかし、これとは別に1972年に東京大学の伯野元彦らが「10秒前大地震警報システム」という構想を発表している³⁻⁴⁴⁾。この構想は、地震予知が実用になっていないことに鑑み、東京地方に被害を及ぼす相模湾岸から房総半島南岸で発生する地震を対象として、相模湾内に海底地震計を設置して地震波形を常時監視し、この地震計からの情報で、東京地方に強震が襲うほぼ10秒前に地震の発生を知り、人命、施設に関する被害を軽減するというものであった。

この構想に端を発して、国鉄では新幹線をターゲットとして、迅速かつ的確な地震警報と地震後対策の合理的な策定を目指した検討を1975年に始めた³⁻⁴⁶⁾。この検討では、伯野らのように、線路から離れた地震の発生が想定される地域に地震計を配置し大きな地震動を知らせることと、観測波形を用いて地震の大きさなどを推定してよりの確な警報を出そうとすることの、二通りの研究が行われ、とくに後者は不必要な警報を少なくするために地震の加害性のある程度判断できるようなシステムにするという目標が掲げられた。このため、まず地震警報を地震検知する場所とその方法によって分類した。つまり、地震検知する場所については、地震を警報対象の近傍で検知する「オンサイト警報」と地震発生が想定される場所で検知する「前線警報」とに分けた。また、地震の検知方法については、一定のレベルを超過することによる「トリガ警報

(S波警報)」と、地震の破壊的なS波(主要動)に先立って到来するP波(初期微動)により警報判断をする「P波警報」に分けた。表3.1に、この分類を整理して、余裕時間、すなわち破壊的な地震動が到来するまでの時間的余裕を示す。

繰り返しになるが、地震防災の基本は、構造物を想定される地震動に対して十分に耐震的にしておくことである。しかし、構造物そのものが十分な耐震性を保持していても、付帯施設の被害などにより想定外の地震被害が生じることも考えられる。特に新幹線のように高速度で走る列車を考えると、危険な地震に対しては迅速な警報を発令し、破壊的な地震動が到来する前に少しでも列車の速度を落とすことで危険性を低くすることも重要となる。また、地震中に列車を運転している運転士への調査によると、震源域を走行中の列車のうち、およそ1/3~2/3の運転士は地震動を感知することができなかったという報告がある³⁻⁴⁷⁾。つまり列車停止の信号を認知するまで、地震動の中で運転を続けてしまう列車が一定の割合で存在してしまうことから、いち早く警報を発令することの重要性がわかる。さらに、地震発生に伴って列車を停止させた後に、どのように列車を再開させるかという、警報の解除についても適切な手段を検討することが必要となる。また、地震観測を行いその値が一定のレベルを超えると警報を出す従来の地震警報は、単にその地点の地震動

表 3.1 地震警報の種類と余裕時間(筆者作成)

検知方法 検知場所	P波検知 (P波警報)	トリガ方式 (S波警報)
震源の近く 前線警報	○ 最も早い警報発令	△
警報対象の近傍 オンサイト警報	△	— (従来の地震警報)

の大きさがわかるのみで、その観測した場所の施設し
か運転停止などの制御ができず、地震終了後の合理的
な運転再開などの制御も難しかった。迅速かつ的確な
地震警報と地震後の対応のためには、地震の規模や震
央位置などが極めて重要な情報である。

国鉄ではこのような種々の課題を解決するための検
討の中で、まずは1982年の東北新幹線開業時には、
この新幹線に影響を及ぼすと考えられる太平洋側の地
震に対応して、線路から離れた太平洋側の海岸線に
地震計を配置し、そこで一定レベル以上の地震動を感
知すると通信によりいち早く列車を停止させる「海岸
線地震警報システム」を実用化させた。これは伯野ら
のアイデアを実現させたという意味では意義深いが、
一定のレベルを超えると警報を出す従来の地震警報の
一種であるといわざるを得ない。そのため、引き続き
地震の発生をP波初動で検知するとともに諸元を推定
する早期地震検知警報システムの開発が引き続き進め
られた。目標とするのは、迅速な警報はもちろん、従
来の警報は結果的に不必要なものが多いことの改善も
含まれていた。また、鉄道構造物に対する地震被害の
分析から、地震の規模(マグニチュード)と震央距離の
組み合わせで地震の加害性をある程度判断できると考
えられたため、早期地震検知警報システムの基本機能
として、地震のP波初動での地震検知と地震諸元(規
模や震源の位置)を推定することが考えられた。

研究が始まった当初の観測システムは、理学系の研
究で地震予知に関連して行われた微小地震の自動観
測システムに類似したもので、数多くの地震観測点を
配置してその波形を処理センターにリアルタイム伝送
し、そこで解析処理を行うというものであった。観測

点は、3地点で構成されていたものが6地点まで増や
された。しかし、この研究用観測システムは、データ
回線や観測システムそのものの維持管理に多額の経
費を要し、さらにすべての観測波形が揃わないと処理
が始められず、その結果警報が遅くなり早期警報に
ならない、といった欠点が明らかになった。またこの
程度の観測点数では自動処理できない場合や、ター
ゲットとしている太平洋沖合の地震に対して諸元がう
まく定まらない場合があることも分かった。これでは
経費や警報の迅速性の点で実用にならないと判断し、
1982年頃に全く新しいシステムの研究がはじめられ
た。そのシステムは原則的に単一の地震観測点の地震
波形データをその場で自動的にリアルタイム処理する
ことで、地震をP波初動で検知して直ちにその諸元を
推定し、鉄道構造物への危険性を判断し警報発令する
ものとし、処理センターへは地震波形ではなく推定結
果のみを伝送する自律したP波一点検知システムを目
標とした。このようなシステムであれば、わずかなデー
タ量しか送信しないため簡単な伝送装置と低速な回線
で十分となり、システム全体の維持経費も少なくなる。

この研究開発の成果が実用化システムとして結
実したのが、世界初の早期地震検知警報システム
UrEDAS(ユレダス、Urgent Earthquake Detection
and Alarm System)である^{3-12)、3-13)、3-48)~3-51)}。なお、ユ
レダスという名称は早期地震検知警報システムの英語
の頭文字であるだけでなく、これから地震が「揺れだ
す」という意味もあり、世界で初めてP波初動で諸
元を決めることができただけでなく、早期地震警報を
具現しているネーミング自体の秀逸さでも知られてい
る³⁻¹²⁾。

参考文献

- 3-1) Suyehiro, K. : “Engineering Seismology, Note on American Lectures”, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 38 (4) , 9-110 (1932)
- 3-2) Trifunac, M. : “75th anniversary of strong motion observation—A historical review”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 591-606 (2009)
- 3-3) 伊東忠太 : 「地震ト煉瓦造家屋」, 建築雑誌, 第 59 号, 291-295 (1891)
- 3-4) 村上こずえ : 「本郷キャンパス探訪一大講堂車寄せ内レリーフについて」, 東京大学史料室ニュース, 第 47 号, 4-5 (2011)
- 3-5) 佐野利器 : 「家屋耐震構造論 上編」, 震災予防調査会報告, 第 83 号, 1, 1-142 (1916)
- 3-6) 佐野利器 : 「家屋耐震構造論 下編」, 震災予防調査会報告, 第 83 号, 2, 1-137 (1917)
- 3-7) 井上豊 : 「耐震設計法の改訂によせて」, 生産と技術, Vol.32, No.1, 18-23 (1980)
- 3-8) 大崎順彦 : 「地震と建築」, 岩波新書, 240, 岩波書店, 168-171 (1983)
- 3-9) 内藤多伸 : 「架構建築耐震構造論」, 早稲田大学出版部

- (1924)
- 3-10) 末広恭二 : 「地震波分解器及其記録」, 東京帝國大學地震研究所彙報, 1, 57-64 (1926)
- 3-11) 竹内徹, 浜田英明 : 「日本の近代建築を支えた構造物たち」, 国立近代建築資料館紀要, Vol.1, 17-22 (2021)
- 3-12) 菊池正幸 : 「リアルタイム地震学」, 東京大学出版会 (2003)
- 3-13) 山崎文雄 : 「リアルタイム地震防災システムの現状と展望」, 土木学会論文集, No.577, I-41, 1-16 (1997)
- 3-14) Milne, J. : “Seismic Science in Japan”, Transactions of the Seismological Society of Japan, Vol.1, the Seismological Society of Japan, 10.11501/1678210, 3-37 (1880)
- 3-15) ジョン・ミルン : 「地震学総論」, 日本地震学会報告, 第一冊, 丸屋善七, 1-30 (1884)
- 3-16) 国会図書館デジタルコンテンツ「日本地震学会英文論文集 Transactions of the Seismological Society of Japan Vol.1 表紙」, <https://dl.ndl.go.jp/pid/1678210/1/4> (2025 年 10 月 12 日閲覧)
- 3-17) ジョン・ミルン https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョン・ミルン#/media/ファイル:John_Milne.jpg (2025 年 10 月 1 日閲覧)

- 3-18) 日本地震学会 WEB ページ, https://www.zisin.jp/faq/faq02_14.html (2025 年 8 月 16 日閲覧)
- 3-19) 尾池和夫:「中国の地震予知」, NHK ブックス, 333(1978)
- 3-20) Varotsos, P. and K. Alexopoulos: "Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I", *Tectonophysics*, 110, 73-98 (1984)
- 3-21) Varotsos, P. and A. Alexopoulos: "Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude", *Tectonophysics*, 110, 99-125 (1984)
- 3-22) 上田誠也:「地震予知に成功した国一ギリシャ」, *地震*, 第2輯, 第44巻, 391-405 (1991)
- 3-23) 日本地震学会:「ラクイラ地震に関する地震研究者に対する有罪判決について (声明)」, <https://www.zisin.jp/publications/pdf/SSJ20LAquilafinal20wa.20121029.pdf> (2025 年 8 月 28 日閲覧)
- 3-24) 日本地震工学会:「2009 年イタリア・ラクイラ地震に関連した科学技術者に対する有罪判決について (声明)」, https://www.jaee.gr.jp/jp/wp-content/uploads/2012/11/121031Statement-LAQUILA_JPFinal2.pdf (2025 年 8 月 28 日閲覧)
- 3-25) 日本地質学会:「ラクイラ地震裁判における科学者への実刑判決を憂慮する」, https://geosociety.jp/uploads/fckeditor/pubcome/20121102L'Aquila_Concern_jp.pdf (2025 年 8 月 28 日閲覧)
- 3-26) 日本地球惑星科学連合会:「2009 年 4 月 6 日のラクイラ地震に関する有罪判決について (声明)」, <https://www.jpgu.org/news/2012/1311/> (2025 年 8 月 28 日閲覧)
- 3-27) 中村豊:「常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定」, *鉄道総研報告*, Vol.2, No.4, 18-27 (1988)
- 3-28) Nakamura, Y.: "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface", *Quarterly Report of RTRI*, Vol.30, No.1, 25-33 (1989)
- 3-29) Lermo, J. and F. J. Chávez-García: "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.83, No.5, doi.org/10.1785/BSSA0830051574, 1574-1594 (1993)
- 3-30) Lachet, C. and P-Y. Bard: "Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique", *Journal of Physics of the Earth*, Vol.42, No.5, DOI: 10.4294/jpe1952.42.377, 377-397 (1994)
- 3-31) Field, E. H. and K. H. Jacob: "A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.85, No.4, doi.org/10.1785/BSSA0850041127, 1127-1143 (1995)
- 3-32) 若松邦夫, 安井譲:「短周期微動の水平動上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究」, *日本建築学会構造系論文集*, 第 471 号, 61-70 (1995)
- 3-33) Nakamura, Y.: "What is the Nakamura method?", *Seismological Research Letters*, Vol.90, No.4, 1437-1443 (2019)
- 3-34) Nakamura, Y.: "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications", *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.2656 (2000)
- 3-35) 中村豊, 滝沢太郎, 富田健司, 齋田淳, 西永雅行:「常時微動による地盤変状予測の試み」, *鉄道総研報告*, Vol.7, No.10, 63-72 (1993)
- 3-36) 中村豊, 日高和利, 佐藤新二, 西永雅行:「ラーメン高架橋および盛土の地震被害判定指標の提案」, *鉄道総研報告*, Vol.8, No.5, 25-28 (1994)
- 3-37) Cooper, J.: "Earthquake indicator", *The San Francisco Daily Evening Bulletin*, November 3 (1868)
- 3-38) 国立公文書館デジタルアーカイブ「安政見聞誌 3」(請求番号: 166-0534) より抜粋
- 3-39) Evans, J. W.: "Earthquake Warnings", *Nature*, No.2815, Vol.112, 538 (1923)
- 3-40) Evans, J. W.: "Earthquake Warnings", *Nature*, No.3026, Vol.120, 619 (1927)
- 3-41) Evans, J. W.: "Earthquake Warnings", *Nature*, No.3062, Vol.112, 10-11 (1928)
- 3-42) 石本巳四雄:「丹後大地震後の宮津町及び河邊村に於ける地表傾斜変化観測 (一)」, *東京帝国大学地震研究所彙報*, 4, 203-222 (1928)
- 3-43) Nakamura, Y. and B. Tucker: "Japan's Earthquake Warning System -Should it be imported to California?", *California Geology*, 41 (2), 33-40 (1988)
- 3-44) 伯野元彦, 高橋博:「10 秒前大地震警報システム」, *自然*, 27 巻, 9 号, 通巻 318 号, 中央公論社, 74-79 (1972)
- 3-45) Earthquake Alarm Group: "A Plan for Strong Earthquake Alarm System: 10 Seconds before It Attacks the City of Tokyo", *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, 1081-1084 (1973)
- 3-46) Fujiwara, T.: "New Automatic Train Stopping System during Earthquake", *Proceedings of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, 2943-2948 (1977)
- 3-47) 中村豊:「1993 年釧路沖地震を概観する」, *RRR*, 第 50 巻, 第 7 号, 6-16 (1993)
- 3-48) 中村豊, 上野真:「地震早期検知警報システム UrEDAS の開発」, *日本地震工学シンポジウム講演集*, 2095-2100 (1986)
- 3-49) 日本鉄道施設協会:「2.2 早期地震検知警報システムに関する研究」, *昭和 61 年度鉄道地震対策の研究報告書*, 17-27 (1987)
- 3-50) Satriano, C., Y-M. Wu, A. Zollo and H. Kanamori: "Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 106-118 (2011)
- 3-51) Gasparini, P., G. Manfredi and J. Zschau (Eds.): "Preface", *Earthquake Early Warning Systems*, Springer, V-XI (2007)

4 | 早期地震警報システムの開発とその進化

1972年の東京大学の伯野らの構想に強い関心を示した国鉄は、1970年代に、東北新幹線へ設備することを念頭に、地震時の不測の事態に対応するための新しい設備として「早期地震警報システム」の研究・開発を始めた³⁻⁴⁶⁾。

まず、地震動をできるだけ早期に検知し警報を行う方法として、次の2つの方法が考えられた。

- ①地震を震源域で検知し警報する(前線警報)
- ②地震をP波初動で検知し警報する(P波警報)

4.1 前線警報

前線警報は、伯野らの構想のように、地震動を震源の近くで検知し、震源から離れた地域にその揺れが到達する前に電気信号で警報を発令する方法である。

1970年代にその方法に強い関心を示した国鉄は、P波警報がまだ実用段階になっておらず、また前線警報は容易に構築ができたことから、東北新幹線用の地震に対する列車防護システムとして研究・開発を始めた⁴⁻¹⁾。

4.1.1 東北新幹線の海岸線検知システム

1982年に開業した東北新幹線は、太平洋沿岸から平均して70 km程度内陸を走っている。この地域では、1978年の宮城県沖地震や2011年の東北地方太平洋沖地震のように、被害が発生する地震は主に太平洋側で発生し、古くから揺れによる被害以外にも津波による災害も著しかった。そのような環境を踏まえ、開業前の1970年代より、地震時の不測の事態に対応するための新しい地震警報システムの開発が開始された。

東北新幹線は、東北地方の内陸を南北に縦断しており、海岸線からは比較的離れた場所を走行している。従って、太平洋沖で発生する地震については、太平洋沿岸に警報地震計を設置し地震動を検知すれば、地震波が新幹線沿線に到達する前に、いち早く警報を伝達することができると考えられた。警報は、被害が起こりそうな地域を走行している列車のみへ伝達されるのが理想的ではあったが、その地域を推定する技術はまだなく、どの地域へ警報を出力するのが適切なのかということが課題であった。そのため、現実的な対応策として、ある検知点が動作した場合、動作した検知点の近くで発生した既往地震の内でもっとも影響の大き

いものが再び発生したとみなして、この地震の想定被害範囲を警報範囲とすることとした。

この考えに基づいて決められた警報地震計(検知点)の配置と規制範囲が図4.1に示したものであり、1982年から東北新幹線の地震警報システムとして運用が開始された⁴⁻¹⁾。どの程度の地震動で警報を発令するかについては、P波警報がまだ実用段階になかったことから、とりあえず従来のS波警報が採用され、その警報レベルとして水平合成加速度40 Galが設定された。

この海岸線検知システムは、8箇所の地震検知点が八戸から三浦海岸までの沿岸付近に50 km～80 km間隔で設置され、各検知点の警報地震計が動作した際の運行規制範囲は、上述の通りこれまでの地震の影響を踏まえた範囲で決定された。

東北新幹線の地震警報システムには、海岸線以外にも内陸で発生する地震に対する警報地震計も設置されている。海岸線および沿線検知点とも同種の警報地震計が用いられ、地震動が40 Galを超過すると警報を発令し、地震終了後には最大加速度の値を通報した。当時の沿線検知点は約20 km間隔で配置され、警報対象区間は隣接する沿線検知点までであった。

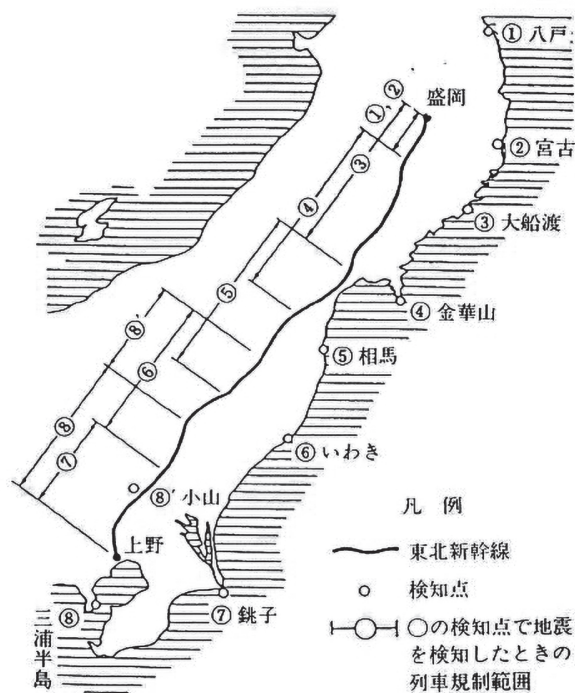


図 4.1 東北新幹線の地震警報システム（開業時）⁴⁻¹⁾
(掲載許諾)

4.1.2 前線警報導入後の運転再開時間短縮効果

東北新幹線に整備された海岸線と沿線検知点からなる地震警報システムの動作回数は、月平均1回以上になると予想され、ほぼその通りの動作実績であった。しかも、その多くは海岸線付近の小規模な地震で、新幹線やその施設には何も影響を与えないと推測される不要な警報であった。そこで、沿線での地震動の大きさが震度5以上に対応する80 Gal以上でなければ新幹線にとっては不要な警報であったと判断し、直ちに運転を再開させるなど、混乱をできるだけ少なくするよう配慮がされていた。その具体的な効果を示したのが図4.2である。同図は、東北・上越新幹線の地震警報システムで観測された最大加速度と、その時の列車遅延時間の関係を表したものである。沿線で最大加速度80 Gal以下である場合は、5～20分程度で遅延が回復するなど、運転本数がそれほど多くなければ、前述の運転再開の判断を行うことで、多少の不要な警報であっても列車運行にはあまり影響がないことが分かる。

一方、東北新幹線のような前線警報が導入されていない東海道新幹線でも、同様な運転再開の考え方が用いられた。2章の表2.6に示した通り、東海道新幹線の運転再開手順は、1964年(昭和39年)の開業時から昭和60年まで4度変更され⁴⁻³⁾、地震後の列車運行を安全性を確保しながら迅速に正常化することで、旅客への影響を最小限にしようとする努力が行われた。1985年(昭和60年)に改定された運転再開手順が、それ以前のものと比較してどの程度効果があったかを表したものが図4.3である。図4.2と同様に、最大加速度とその時の列車遅延時間の関係を示している。この時の改定は、最大加速度が120 Gal未満の場合を対象

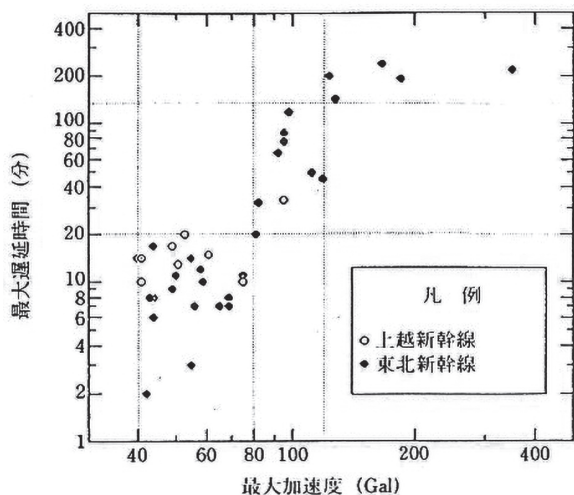


図 4.2 最大加速度と列車遅延時間(東北・上越新幹線)⁴⁻²⁾
(掲載許諾)

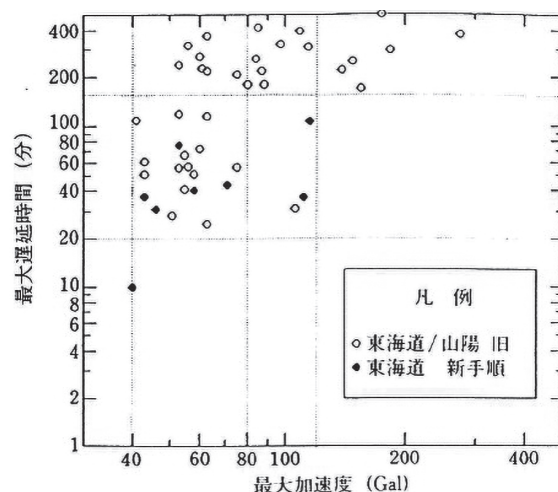


図 4.3 最大加速度と列車遅延時間(東海道・山陽新幹線)⁴⁻²⁾
(掲載許諾)



図 4.4 東海道新幹線の総合指令所⁴⁻⁴⁾ (掲載許諾)

にしたものであった。改定後は、旧基準では120 Gal以下でも回復時間が3時間以上を要したこともあったが、改定後は120分以下に減少し、東北新幹線の場合と同程度の回復時間に早まった。

なお、この前線警報を含めた東北・上越新幹線や東海道・山陽新幹線の地震警報システムは、構築当初から計測された最大加速度の値を直ちに総合指令所(図4.4)へ表示する機能を有し、地震発生後すぐにその揺れを把握、それに応じた運転再開に活用できる情報として、リアルタイム地震防災情報システムの先駆的な存在であった。

4.2 P波警報

地震動と警報発令時の様子を模式的に示したものが図4.5である。従来の警報地震計は、地震動の主要動で検知し警報出力(S波警報)していたが、これをP波初動で検知し警報出力(P波警報)を行えるようにすれば、S波警報での問題点である警報発令時間が遅く、大きな地震動到来までの余裕時間が少ないことが

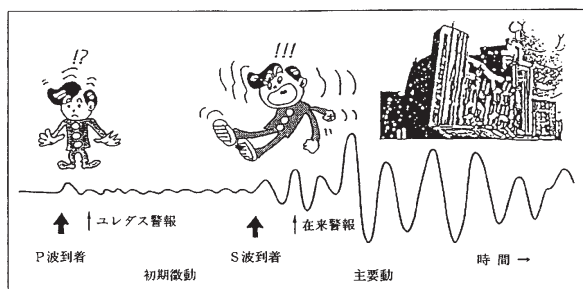


図 4.5 地震動と警報発令の時系列⁴⁻⁵⁾ (掲載許諾)

改善され、乗客や鉄道施設の安全性の確保が期待される。しかし、P波警報は、地震動の実際の揺れがあるレベルを超過した場合に発する従来の方法では実現できない。主要動よりも揺れが小さいP波の揺れにレベルを下げたとしても、検知は早くなるものの誤検知の数も飛躍的に増え、被害が無いにもかかわらず過剰に警報出力することが危惧されるからである。

そのため、従来の方法に代わる新しい警報方法のために、これまでの鉄道被害についてマグニチュードと震央距離の関係が調査された。その結果をまとめたものが図 4.6 である。これによると、被害はM 5.5 以上で発生し、被害域は震央近くのみに限られていた。具体的には、M 6 では震央から 12 km 程度以内で被害が発生し、M 7 では 60 km 程度以内、M 8 では 300 km 程度以内となっていた。

また、図 4.6 には、20 Gal、40 Gal、80 Gal、120Gal の等加速度線も示している。当時の国鉄では、40 Gal 以上が運行停止等にかかわる基準値であった。その値と図中の無被害の領域の分布をみると、震央までの距離が近い小規模の無被害地震に対しても警報を出してしまう(空振り警報)問題があることが分かる。さら

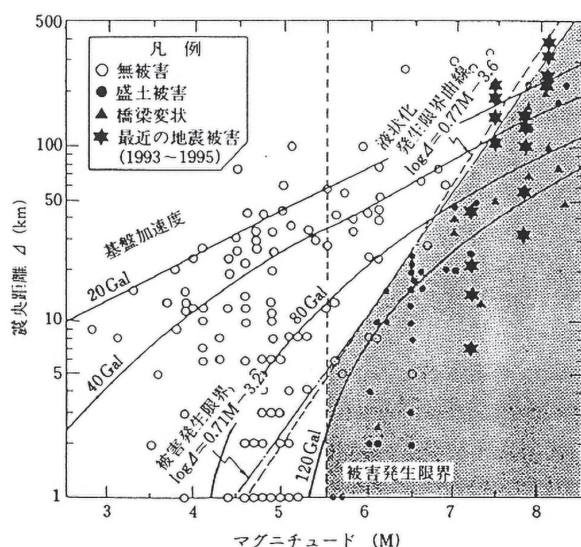


図 4.6 地震被害とマグニチュード(M)、震央距離(Δ)の関係(M-Δ図)⁴⁻²⁾ (掲載許諾)

に、遠くの規模が大きな地震では、警報を出さない可能性(見逃し警報)もあった。

当時の警報方法に対して、P波の初動部で地震のマグニチュードや位置(震央や深さ)を即座に推定できれば、図 4.6 に基づいて地震被害が発生することが示唆される地域に、空振りも見逃しもなく、また迅速に警報発令できるものと期待された。

4.3 早期地震検知警報システムの開発と実用化

1978 年当時の国鉄は、東北新幹線での地震警報システムの整備とともに、P波初動で地震動を検知し警報を行う、P波警報の研究も継続した。その研究は、まず、研究用の地震観測網の構築から進められ、複数の観測点の計測波形をリアルタイムに中央処理装置に送信し、一括で自動処理を行う手法がとられていた。しかし、その方法では必要な波形データを入手し処理を始めるまでには時間を要し、大きな揺れの前に地震警報を発令することができない恐れがあった。

そこで当時の国鉄の研究者であった中村豊は、震源推定精度の低下を防ぐため観測点の配置や地震波動の到達時間差を的確に観測する方法を考慮した上で、狭い範囲に観測点を展開し、処理開始までの時間を1秒以下にすることを提案した。しかしながらその提案は、採用されることは無かった。

その後、中村は従来の方針に沿った研究を続けるのと並行して、独自の考え方に基づく単一観測点のデータだけを使った方法も模索した。

そして3年後、従来の方針に沿った研究成果と独自の研究成果の双方を示し、今後は後者で研究開発を進めることに成功した。そのような経緯で開発されたものがユレダス(UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System、早期地震検知警報システム)である。

ユレダスは、リアルタイムに地震動を観測し、その情報から直ちに安全性の確保を目指すリアルタイム地震防災を実現したシステムであり、世界で最初のP波警報を実用化した早期地震警報システムである^{4-6)~4-9)}。その基本機能は、従来のS波警報のような単に検知した地震動の大きさで警報を発するのではなく、P波初動の情報に基づいて地震の規模や発生位置を推定し、被災の可能性のある地域に対して迅速な警報を発信するものである。

4.4 ユレダスの動作原理

ユレダスは、1台(単一観測点)でP波の初動の情報から、地震の規模、震央の方向、震央距離、震源の深さを同時に推定できるシステムである。推定処理は、いくつかの要素技術から成り立っているが、完全に自律したリアルタイム分散システムとなっており、地震発生の有無に関わらず絶えず時々刻々と処理を続ける。地震が発生したからといってその処理プロセスが増大し、または錯綜し、システムダウンするようなことがないという特長を有している。

またユレダスは、地震の加害性を判断することを目的に、地震の各諸元を推定する。そのため、その推定はP波検知後、出来るだけ迅速になされなければならない。時間を要しすぎて地震終了後に推定したのでは意味がなく、大きな揺れの到達前に推定し警報出力することが望まれる。多数の観測点を持ち、その情報を中央処理システムに伝送して処理させるようなシステムでは、情報の伝達に時間がかかったり、一度に大量の情報を受信しその処理に負荷がかかり過ぎたり、通信回線自体に異常が生じ情報そのものが伝達されなかったりと、地震後の情報としては役立つことはあるものの、発生時やその直後の警報情報としては無力になることがある。警報はまず迅速であること、その次に的確であることが望ましい。そのためユレダスは、複数の観測点の情報を用いた複雑な処理や、大きな地震発生時に度々発生するネットワークの脆弱性などを考慮し、警報には単一観測点の情報しか用いないこととした。

ユレダスは、単一観測点の地震データを絶えず1/100秒間隔でリアルタイム処理し、地震の検知から

諸元推定までの一次推定をP波検知後3秒以内に行った。なお、この3秒は、当初、M 6.0以上の地震を対象とし、その断層破壊に対応する時間が概ね3秒であったことから設定された。これに基づいて、警報対象地点に対してP波警検知後4秒(推定3秒、伝送1秒)以内に警報が届くように構築したのが、1992年3月に稼働を始めた東海道新幹線のユレダスである。

ユレダスの基本的な処理の流れを表4.1に示す。また、地震諸元を推定するにあたり、開発当初の目標精度を表4.2のように設定した。

4.4.1 地震規模の推定⁴⁻¹⁰⁾

一般的には、地震の規模(M:マグニチュード)は、各観測点での震央距離と振幅値からそれぞれ算定し、それらを平均することで推定されている。しかし、その手法では、迅速性が求められる地震警報には適さない。

そもそもMは断層の大きさに比例する。規模が大きいほど断層の破壊時間が長くなり、そこから発生する地震波の周期も長くなる。よって、その周期を把握することで、地震の規模を推定することができる。図4.7に、P波初動の周期と気象庁マグニチュードの関係を示す。横軸が初動周期、縦軸がマグニチュードであり、それら初動周期とマグニチュードの関係は以下の式で表される。

$$M = \alpha \log T + \beta$$

ここで、 α 、 β ：統計処理から求めた変数

T ：深さに関係したパラメータ V/H (後述)

図4.7より、多少のばらつきはあるものの、多くのデータがマグニチュード ± 0.5 以内に収まっていることが分かる。

表 4.1 ユレダスの処理の流れ

順	処理の内容
①	地震動のP波(初動)を検知する
②	マグニチュード、震央位置、深さ等をP波検知後3秒で推定する。
③	地震被害とマグニチュード(M)、震央距離(Δ)の関係に基づき、警報が必要な地域に「大きく揺れ出す」前に警報を出す。

①～③を各ユレダスで独立して行う(分散処理)

表 4.2 ユレダスの開発当初の目標精度

地震諸元	目標値
マグニチュード	± 1 以内
震央方位	± 30 度以内
震源距離	50 ～ 200 %

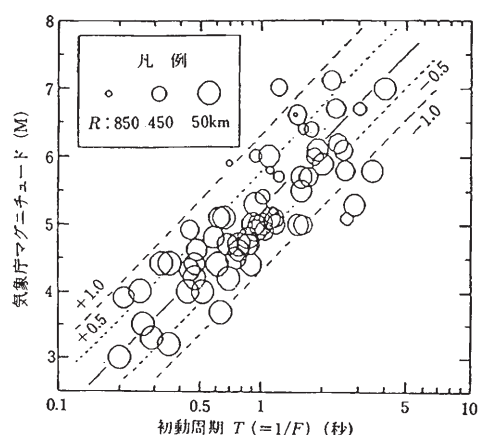


図 4.7 P波の初動周期とマグニチュードの関係⁴⁻¹⁰⁾
(掲載許諾)

なお、初動周期を利用したマグニチュードの推定は、気象庁の地震津波早期警報でも利用された⁴⁻¹⁾。

4.4.2 震央方位の推定⁴⁻¹¹⁾

震源から伝播されるP波は粗密波であり、波動の伝播方向と振動方向は一致する。従って、図4.8に示すようにP波初動の水平2方向と上下方向を組み合わせ、震央方位は以下の流れで推定できる。

- ① NS成分とEW成分をベクトル合成
- ② UD成分
 - 下向きの場合：合成方向の方位
 - 上向きの場合：合成方向と反対の方向

図4.9は、地震波形の3方向成分の加速度波形と、震央方位および上下動/水平動(以下、 V/H と表記)の時間的変動である。上から地震動の上下方向、南北方向、東西方向のそれぞれの観測値を示し、その下が推定した方位となっている。これを見ると、P波到達と同時に方位が急に変化し、その後のS波到来でまた変化する。その中で、P波到達後の方位が安定した

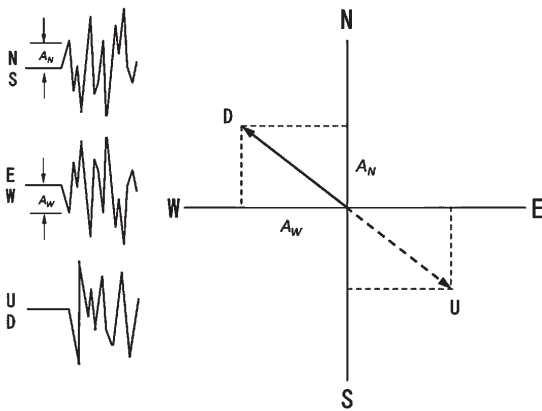


図4.8 震央方位の求め方(筆者作成)

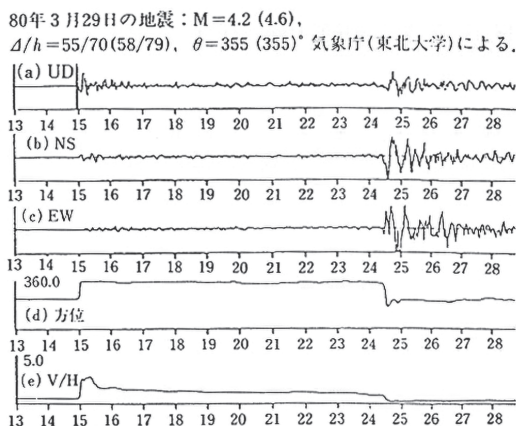


図4.9 地震波形の3方向成分と震央方位、 V/H の時間的変動⁴⁻¹¹⁾(掲載許諾)

場所が震央方位となる。図4.10は、試験観測地(岩手県宮古市)での推定震央方位と東北大学及び気象庁の諸元による震央方位を比較したものである。横軸がユレダスで推定された震央方位、縦軸が東北大学および気象庁の諸元による震央方位である。ユレダスの推定方位は、二つの機関の諸元に基づく方位と非常に良い一致が認められる。

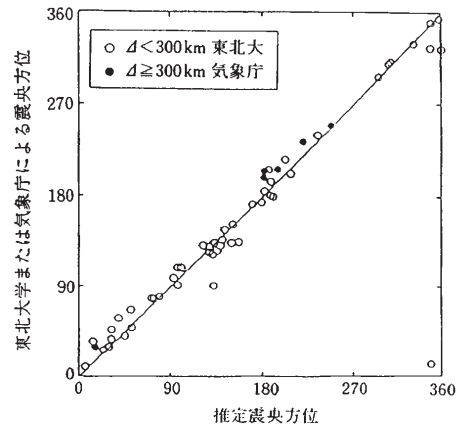


図4.10 ユレダスの推定震央方位と東北大学/気象庁の諸元に基づく方位の関係⁴⁻¹¹⁾(掲載許諾)

4.4.3 地震波の識別

地震動を雑振動と区別して検知するためにも、地震波の識別は重要である。一般に地震動の伝播速度は、地表面が遅く、深度が増すにつれ早くなる。また、震源から伝わる地震波は、スネルの法則(図4.11)により屈折を繰り返し、ほぼ鉛直方向から地表面に入射する。従って、地表面上ではP波であれば上下動が卓越し、S波であれば水平動が大きくなる。図4.9の最下部に示した V/H は、P波が到来すると直ちに増加し、S波到達とともに減少する。この性質を利用してP波とS波を識別した。

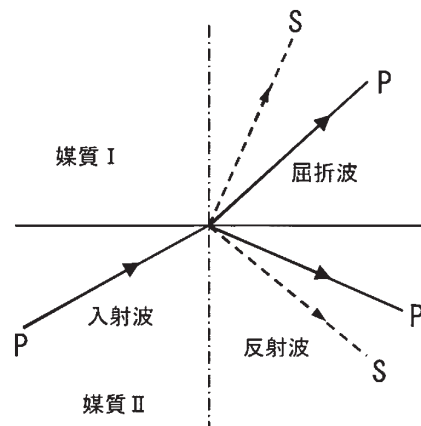


図4.11 実体波の反射と屈折(境界面にP波が入射する場合)(筆者作成)

4.4.4 震源距離の推定 ^{4-1), 4-12)}

ユレダスの震源距離の推定は、精度は劣るが迅速性を求めた一次推定(P波検知後3秒で推定)と、正確な震源距離を把握するための二次推定(S波到達後)が行われた。

まずP波検知直後の一次推定として、推定されたマグニチュードと初動振幅の大きさから概算する。その分布が図4.12である。横軸がP波初動から推定された震源距離、縦軸が実際の震源距離となる。精度自体はそれほど良いものではなかったが、概ね目標精度を満たしている。さらにS波到達を検知すると、初期微動継続時間を用いて震源距離の二次推定も行った。

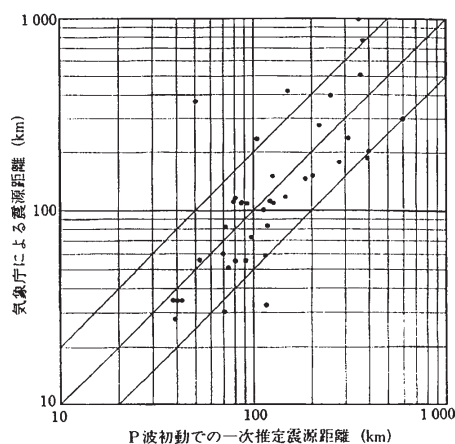


図 4.12 一次推定震源距離と気象庁データの比較 ⁴⁻²⁾
(掲載許諾)

4.4.5 震央距離と深さの推定 ^{4-10), 4-11)}

地震被害予測の観点からは、震源距離よりも震央距離や震源深さの方が重要である。上下動と水平動の比(V/H)を用いることで、P波S波を識別できることは前述の通りであるが、その比は地震波の表面への入射角にも関係している。遠方で発生した地震による波動は、その途中で屈折を繰り返し、地表面到達時にはほぼ真下からの入射になる。一方、震源が近く浅い場合は、その入射角は小さくなる。地震波の入射角度は、震源の深さ h と震央距離 Δ の比(h/Δ)と関係しているため、 V/H と震源距離 R から Δ と h を推定することができる。

図4.13および図4.14は、上下動と水平動の比(V/H)と震央距離 Δ と震源距離 R の比(Δ/R)の関係、上下動と水平動の比(V/H)と震源の深さ h と震源距離 R の比(h/R)の関係を示したものである。これらより、 V/H から震源距離 R と震源の深さ h が大まかに推定できることが分かる。

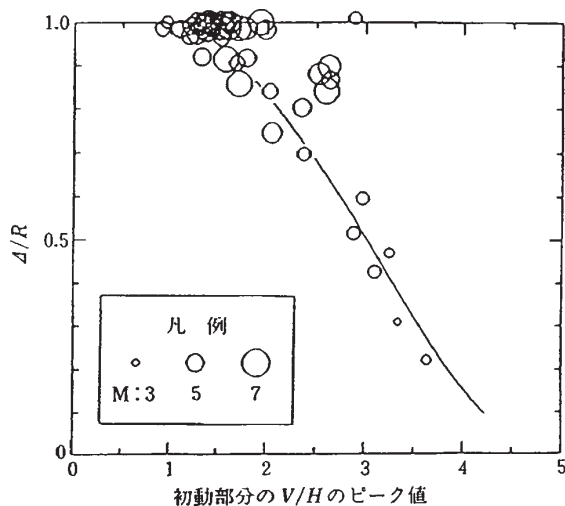


図 4.13 Δ/R と V/H の関係 ⁴⁻¹⁰⁾ (掲載許諾)

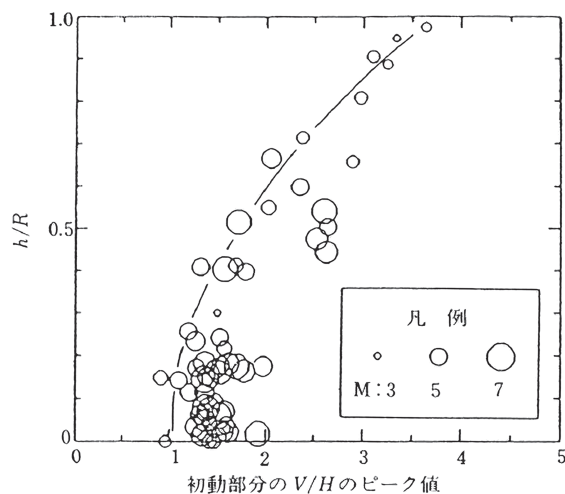


図 4.14 h/R と V/H の関係 ⁴⁻¹⁰⁾ (掲載許諾)

4.4.6 ユレダスの動作検証例 ^{4-2), 4-13)}

前述した各推定諸元について、ユレダスの推定結果と気象庁および東北大学の観測結果を比較したものが図4.15である。岩手県宮古市で観測された3方向成分の地震波形をユレダスに入力し、リアルタイム推定処理を行った諸元と、気象庁や東北大学が数十点の観測データを地震後に時間をかけて処理して求めた諸元とを比較したものである。なお、この比較で用いたユレダスの推定震源距離は、S波到来後に行われた二次推定結果を使用している。

これによると、ユレダスの推定精度は、気象庁や東北大学の結果と比較しても遜色ない程度となっている。P波初動部分による震源距離の一次推定は、二次推定よりも精度が劣るが、緊急性を要する警報に対しては誤差を見込んだ情報発信になったとしても、すぐに精度が高い推定結果(二次推定による結果)が得られるため、公的な地震情報の発表を待たずに警報の要否が判断できる利点がある。

また、表 4.3 は、遠地で発生した大地震の波形を、ユレダスでリアルタイム処理を実施した結果である。ユレダス単一観測点で処理したにもかかわらず、遠地巨大地震もそれなりに検知し、各種諸元を推定することができた。遠地で津波が発生するような巨大地震は、通常であれば複数の観測データを用いて、ある程度の時間を要して把握されることがほとんどであるが、ユレダスを使うことでより迅速に遠地巨大地震を把握し、それに応じた警報を発令できることを示唆している。

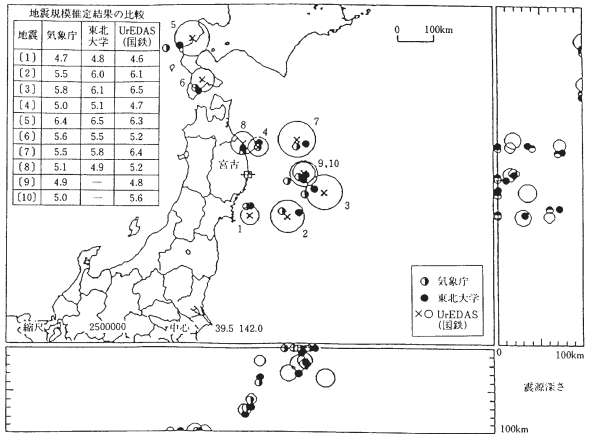


図 4.15 ユレダスの推定結果と気象庁及び東北大学の観測結果の比較 4-14) (掲載許諾)

表 4.3 遠地巨大地震のユレダス推定結果と他機関の推定結果の比較 4-13) (掲載許諾)

Origine Time : GMT	Lat. Long.	M (T ₁ : s)	θ degree	Δ : km (t _{ps} : s)	estimated by
7 May '86 22 : 53 Aleutian Is	51.42° N 174.82° W	7.6	50	4 004	USGS
		7.6 (5.4)	51	4 100 (359)	UrEDAS
11 May '86 01 : 25 East China Sea	26.40° N 125.55° E	6.6	236	1 717	USGS
		6.4 (2.2)	248	2 000 (174)	UrEDAS
26 May '86 18 : 50 Fiji Is.-1	19.60° N 178.80° E	6.8	139	7 416	USGS
		6.2 (2.0)	154	7 100 (501)	UrEDAS
26 May '86 19 : 16 Fiji Is.-2	19.60° N 178.80° E	7.2	139	7 418	USGS
		6.7 (2.7)	143	7 100 (496)	UrEDAS
14 Aug '86 19 : 46 Molucca Sea	2.10° N 126.50° E	7.3	203	3 953	USGS
		6.8 (3.0)	220	— (718)	UrEDAS

M : Magnitude, T₁ : Period of initial motion (velocity).
 θ : Epicentral azimuth, Δ : Epicentral distance.
 t_{ps} : PS time

4.5 ユレダスの展開

鉄道技術研究所 (現 鉄道総合技術研究所) は、1983 年にパソコンを用いて基本機能を実現したユレダスのプロトタイプシステム (図 4.16) を完成させ、1984 年から岩手県宮古市およびその他の場所で試験観測を開始した。

また、当時の運輸省の助成を受け、首都圏を対象にしたユレダスネットワーク (5 台のユレダスで構成) が 1988 年～1989 年にかけて構築され、首都圏ユレダス情報として約 50 のテストユーザーにリアルタイムで FAX 配信する実験も行われた 4-2)。

1988 年 3 月からは、青函トンネルの地震防災システムの一部として 4 台のユレダスが設置され、1993 年釧路沖地震の検知はもちろん、トンネルそのものの挙動もとらえている 4-15), 4-16)。

1990 年 9 月には、東海道新幹線のために静岡県御前崎に設置されたユレダスの限定使用が開始され、1992 年 3 月、東海道新幹線「のぞみ」の開業と同時期に、東海道新幹線をカバーする 14 地点に設置されたユレダスを用いて、世界で初めての P 波検知による早期地震警報が実用化された 4-2)。その後、1996 年 11 月に山陽新幹線においてユレダス 5 台が稼働し (図 4.17)、東海道・山陽新幹線全線で、ユレダスによる早期地震警報体制が整えられた。

1996 年時点のユレダスの設置状況を図 4.18 に示す。

4.5.1 首都圏ユレダス

運輸省 (現 国土交通省) の助成研究「地震防災及び復旧支援システム技術開発」 (昭和 62 年度～平成 3 年度) の一環として、首都圏を対象に 5 台のユレダスから構成される早期地震情報システムが 1989 年の春に完成した。図 4.19 に示すように、首都圏を囲むようにユレダスを設置し、各ユレダスを統合し、その情報を表示させる装置としてユレダスセンターを鉄道総合技術研究所 (東京都国分寺市) 内に設置した。

このシステムは、各ユレダスから送信される地震情報 (M や震央位置、深さ) を、ユレダスセンター (図 4.20) にて統合し、M が 3.5 以上、東京駅を中心に半径 200 km 程度以内の首都圏近傍で地震が発生したと推定された際に、試験的にテストユーザーへ配信が行われた。配信方法は、約 50 のテストユーザーに対し一斉配信可能な FAX 同報システムを利用し、P 波検知後 4～5 分程度でその情報を試験配信した。図 4.21 に FAX の配信例を示す。

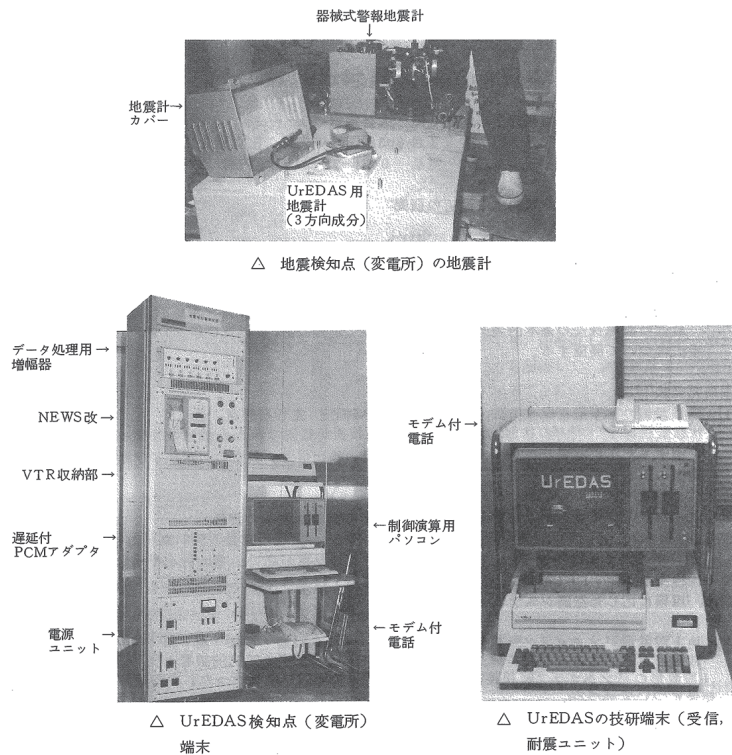


図 4.16 プロトタイプのエレダス⁴⁻¹⁷⁾
(1985 年(昭和 60 年)頃に試験運用されていたシステム)(掲載許諾)



図 4.17 山陽新幹線のエレダス⁴⁻¹⁸⁾(掲載許諾)



図 4.18 1996年時点のエレダスの設置状況⁴⁻²⁾(掲載許諾)

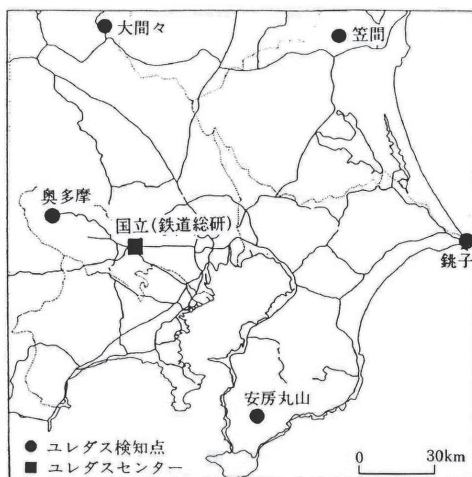


図 4.19 首都圏エレダス⁴⁻²⁾(掲載許諾)

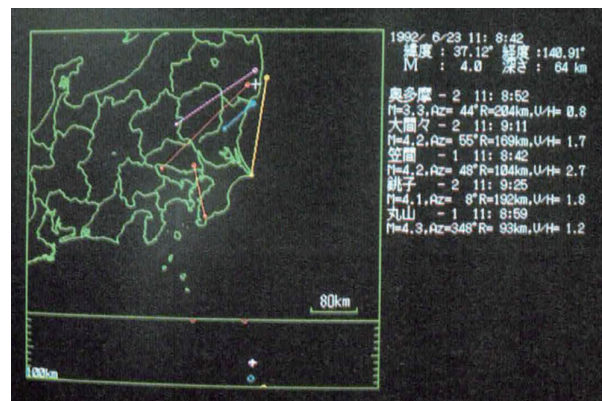


図 4.20 首都圏エレダス エレダスセンターの表示画面⁴⁻¹⁹⁾
(掲載許諾)



図 4.21 ユレダス FAX 配信 (例) ⁴⁻²⁾ (掲載許諾)

4.5.2 青函トンネルユレダス ^{4-15), 4-16)}

1988 年 3 月から、迅速な地震情報の把握を目的に、青函トンネルで 4 台のユレダスが使われ始めた(図 4.22)。地震後すぐに、推定された地震の規模や震央の位置が総合指令所のモニタ上にほぼリアルタイムで表示され、実際の揺れをモニタする地震計の情報を合わせて、地震後の合理的な対応を行うための判断情報として活用された。例えば、1993 年釧路沖地震時は、図 4.23 のような記録が得られている。



図 4.22 青函トンネルユレダス ⁴⁻¹⁸⁾ (掲載許諾)

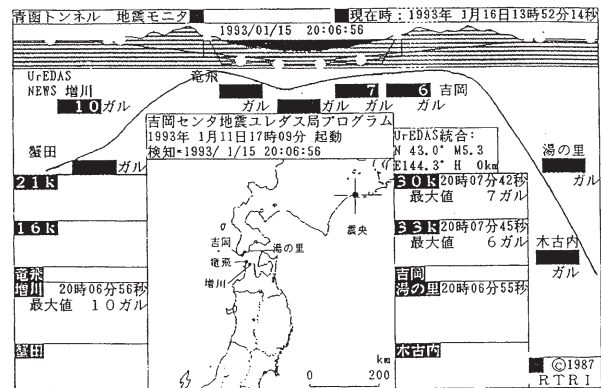


図 4.23 青函トンネルユレダスの動作例 ⁴⁻²⁾ (掲載許諾)

4.5.3 東海道新幹線ユレダス

1992 年 3 月から開始された世界初の早期地震警報システムは、東海道新幹線(図 4.24)の地震警報システムとして、沿線に設置された従来型の警報地震計とともに構成された。そのシステムのブロックが図 4.25 である。

当時のシステムは、14 箇所の「ユレダス」(西茨城～舞鶴までの検知点)、25 箇所の警報受信端末「ストップ」(STOP: Stop Trigger Operation Processor)、7 箇所の中継システム「サイレン」(SIReN: Seismic Information Relay Network)から構成された。「ストップ」は変電所(SS)に従来型の警報地震計とともに設けられ、ユレダスや警報地震計からの警報情報により変電設備へ「き電」(架線への給電)停止信号を送出し、「サイレン」はユレダスやストップの動作状況などを総合指令所(CTC)に中継するシステムであった。

このシステムでは、東海道新幹線から離れた場所で発生した M 6.5 程度以上の地震を対象とした。ユレダスのいずれかで P 波検知し、マグニチュード 6.5 以上と推定されると、その後 4 秒以内にストップへ警報が伝えられ、「き電」が停止された。また、沿線近傍で発生する直下地震の場合は、変電所(約 20 km 間隔)内に設置された従来型の警報地震計が警報を発令し、「き電」停止を行った。これにより、走行中の新幹線は非常制動がかけられ、地震で大きく揺れる中を高速で走行する危険や、被災した場所への突入が回避された。前述の東北新幹線と同様に、東海道新幹線の地震対策はより広範囲ではあるが、近地・遠地の地震それぞれに主体的に対応する二種類の警報システムを用いて、いつどこで発生するか予測できない地震に対して安全性を確保するように構成されていた。

また一方で、ユレダスは、S 波(主要動)到来後にも地震諸元の二次推定を行った。東海道新幹線の場合、P 波検知後 1 分間で各地のユレダスから送信された情

報を収集し、より高精度の統合情報を算出した。そして、いずれかのユレダスが地震を検知してから1分半後には、統合された地震情報に基づいた点検等に関する指示書(巡回指示書)が出力された。

このユレダスの警報発令や運転再開の判断には、従来の最大加速度の大きさに応じたものではなく、マグニチュード(M)と震央距離(Δ)に対する地震被害の関係(図4.6)から判断するM- Δ 法が用いられ、よりの確な警報となった。



図 4.24 東海道新幹線(筆者撮影)



図 4.25 東海道新幹線の地震警報システムのブロック図
(文献⁴⁻²⁾を基に筆者作成)

4.5.4 その他のユレダス

(1) パサディナ・ユレダス

鉄道への実用化後、鉄道総合技術研究所では、ユレダスの地震諸元推定精度に断層の存在がどの程度影響するのか、また、地震時の断層の動きをユレダスがどう捉えるのか等を調査するため、カリフォルニア工科大学(California Institute of Technology : Caltech、アメリカ合衆国カリフォルニア州)の地震研究所と協力し、カリフォルニア州パサディナにあるクレスゲ(Kresge)地震観測所にユレダスを設置した(図4.26および図4.27)。



図 4.26 クレスゲ地震観測所(筆者撮影)



図 4.27 クレスゲ地震観測所に設置されたユレダス
(筆者撮影)

1993年9月から観測が始められたユレダスは、1994年1月のノースリッジ地震(M_w 6.7)やその余震群を捉えている⁴⁻²⁰⁾。図4.28にその時の動作例を示す。本震発生後、最初の24時間で約700件の地震を検知し、そのうち約450件については、規模と震源を自動的に推定した。また、本震の動作状況を精査したところ、図4.29のように地震時の断層破壊の動きと整合する震央方位の変動が観測されていた。

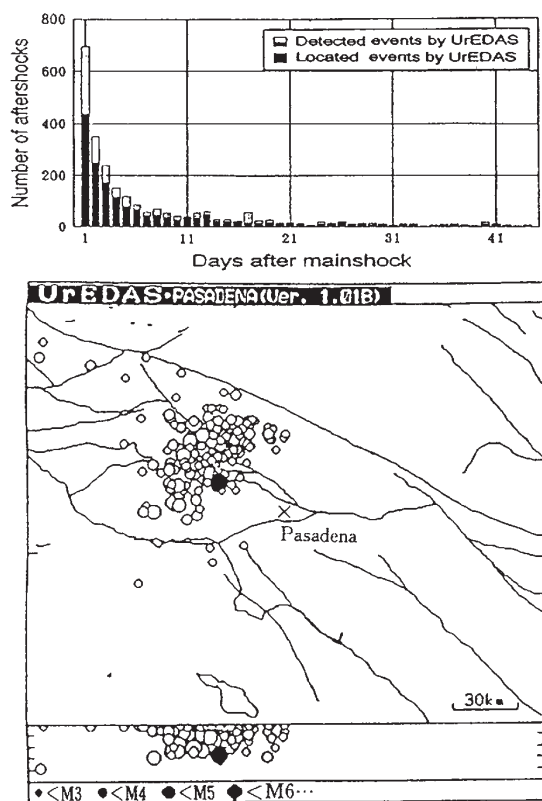


図 4.28 パサディナ・ユレダスの動作例⁴⁻²⁾ (掲載許諾)

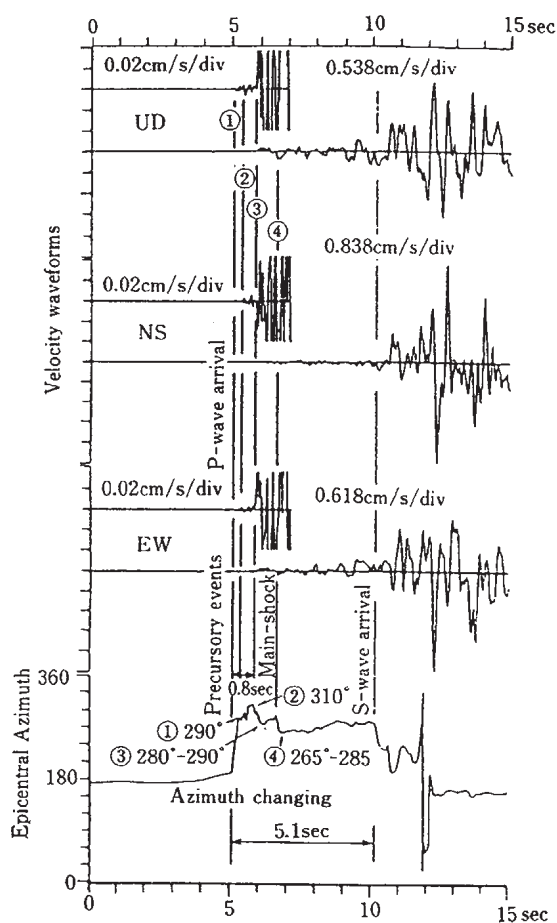


図 4.29 パサディナ・ユレダスによる
ノースリッジ地震の断層破壊⁴⁻²⁰⁾ (掲載許諾)

同ユレダスで検知された地震情報は、Caltech の地震研究所の表示装置上に地震発生直後にリアルタイムで表示され、ノースリッジ地震の余震では、地震検知時の一次推定情報からその後の二次情報まで 10 秒前後で表示された。

このユレダスの地震情報は、Caltech の CUBE (5.9.1 参照) にも送信され、迅速な地震情報として関係者にも参考にされていた。

なお、このユレダスは、第一期として 1994 年 1 月から数年間観測が行われ、その後、株式会社システムアンドデータリサーチ (以後、SDR と略記) により、2000 年 7 月～2007 年頃まで二期目の観測が継続された。

(2) メキシコ・ユレダス

1999 年 10 月に、メキシコ合衆国のメキシコ地震観測登録センター (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. : CIRES) 協力の下、SDR によりメキシコシティにユレダスが設置された (図 4.30)。その情報は、CIRES 本部におかれたユレダスセンターに中継され、直ちに関係者に E メールによる配信が行われた。

観測は 1999 年 10 月 30 日に開始された。2003 年 1 月 22 日 02 時 06 分頃にメキシコ・コリマ市付近で発生した地震 (M_w 7.8) では、震源距離が約 350 km 離れているにもかかわらず、大きく揺れ出す 1 分以上前に P 波検知を行い、一次推定 (震源距離約 230 km で M 7 の地震の発生) を行っている。その後 1 分後に、二次推定 (震源距離約 440 km) が行われ、メキシコシティに大きな地震動が到来した時点で、震源がコリマ市近傍であることが推定された (図 4.31)⁴⁻²¹⁾。

(3) バークレー・ユレダス

2001 年 2 月～2007 年頃まで、SDR とカリフォルニア大学バークレー校 (University of California, Berkeley) との共同研究としてユレダスを設置した (図 4.32 および図 4.33)。前述のパサディナ・ユレダス同様に、早期に地震情報を把握するシステムとして、地震検知後すぐに関係者へその情報が E メール配信された。



(a) 点検時の様子



(b) ユレダスの設置状態

図 4.30 メキシコ・ユレダス (左の写真: 左側が筆者の中村豊、右側が齋田淳、撮影は佐藤勉)

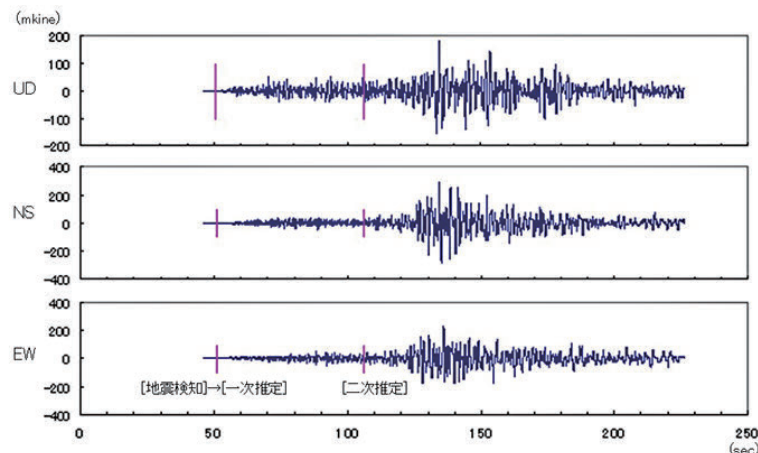


図 4.31 2003 年メキシコ・コリマ地震 (M_w 7.8) 時の動作例⁴⁻²¹⁾ (SDR 社提供)



図 4.32 バークレー地震観測施設 (筆者撮影)



図 4.33 バークレー・ユレダス (筆者撮影)

4.6 新たな早期地震警報システムの開発

4.6.1 開発の経緯

1995 年 1 月 17 日の早朝に発生した兵庫県南部地震 (M 7.3) は、その甚大な被害から「阪神・淡路大震災」と命名された。兵庫県南部を中心とした未曾有の被害 (図 4.34) は、発生当時、戦後最悪の地震災害となった。また、日本国内において初めての大都市直下を震源とする大地震でもあり、気象庁の震度階級に震度 7 が導入されてから初めて震度 7 が記録された地震でもあった。

この地震は、新幹線にとっても直下地震であった。新幹線の営業時間開始前であったが、ある地点のユレダスは大阪地域が被災する危険があるとして警報を発している⁴⁻²⁾。その警報は、震源から離れていたユレダスで出力されたため、新幹線沿線に設置している地震計の警報とほぼ同時刻に発信された。しかし、地震直後の停電で通信システムに障害が生じ、必要なところには届かなかった。大規模な通信ネットワークを介



図 4.34 阪神・淡路大震災の被害 (写真提供：神戸市)
(神戸市、阪神・淡路大震災「1.17 の記録」<https://kobe117shinsai.jp/>)

して情報を送信するシステムの弱点を突かれたものとなった。

地震発生時の神戸市内のコンビニエンスストアの防犯ビデオ映像は、ユレダス開発者の中村豊に現状の早期地震警報システムの限界をまざまざと見せつけた。当時のユレダスは、処理時間に3秒要していた。しかし、コンビニエンスストアのカメラ映像を見ると、P波到来後すぐに大きな震動(S波、主要動)に襲われていた。これでは、3秒で警報を出力したとしても、大きく揺れ出してから警報になってしまう。現行のシステムよりも、より迅速な警報システムの必要性を感じさせる映像であった。その一方で、もしP波検知後1秒で警報が出せれば、直下の地震であっても、大きく揺れ出す前にS波到来までの1～2秒のリードタイムを稼ぎ出せる可能性も見て取れた(P波到来からS波到達までの時間については「コラム1：初期微動継続時間(S-P時間)と震源距離の関係」を参照)。

そこで中村は、直下地震に対してもある程度有効な、P波検知後1秒で警報出力できる新たな早期地震警報システムの開発に着手した。

兵庫県南部地震から2年後の1997年に中村はJRを退職し、株式会社システムアンドデータリサーチへ移籍後、1998年から新たな指標を用いてP波検知後1秒で地震動の危険性を判断し警報を行う、コンパクトユレダス(早期警報地震計 Compact UrEDAS)を開発した(図 4.35)⁴⁻²²⁾。

コンパクトユレダスは、地震動の危険性をリアルタ

イムに判断する指標⁴⁻²³⁾を用いてP波検知後1秒で警報を発信する。ユレダスは、P波を検知すると地震の諸元を推定し、被害発生の恐れのある地域に対して警報を出力していたが、コンパクトユレダスは、地震諸元の推定は行わず、揺れそのものに着目してより迅速な警報を行った。

このコンパクトユレダスは、1997年に東北・上越・長野行き新幹線に対して計56地点に設置され、1998年にP波警報の運用が開始された。また、帝都高度交通営団(営団地下鉄、現在の東京メトロ)では、計6台のコンパクトユレダスが1997年に設置され、2000年にP波警報機能の運用が開始された。

図 4.36 に、2000年頃のユレダスおよびコンパクトユレダスの設置状況を示す。



図 4.35 コンパクトユレダスの外観 (SDR 社提供)

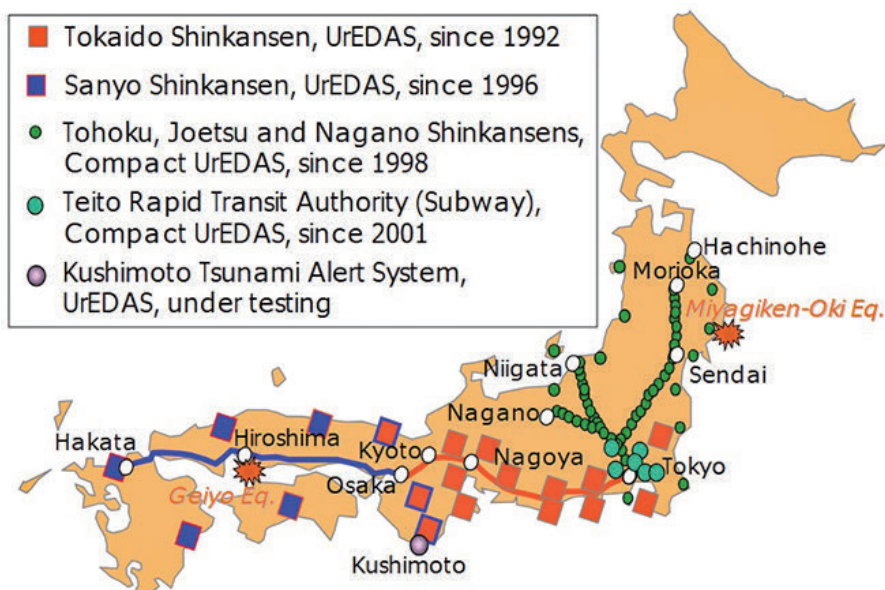


図 4.36 2000 年頃のユレダス、コンパクトユレダスの分布⁴⁻²⁴⁾ (掲載許諾)

4.6.2 コンパクトユレダスの動作原理

1998 年から運用されたコンパクトユレダスは、直下地震のような震源が近い場所で、可能な限り迅速な警報を発することを目的としたオンサイト警報地震計である。P 波検知後 1 秒でその地震動の危険性（その揺れが今後大きな揺れになるかどうか）を判断し、突然大きな地震動に襲われた場合でも瞬時に警報を発令し得るシステムである。

コンパクトユレダスには、震源が近い地震に対して、大きく揺れ出すまでの僅かでも余裕時間を稼ぐために、新たな指標が用いられた。その指標が地震被害指標 DI 値⁴⁻²³⁾である。DI 値は、地震動の加害性を示す指標で、次の式から定義される。

$$DI = \log | \alpha \cdot v |$$

ここで、 α ：加速度 (Gal=cm/sec²)

v ：速度 (m/kine=10⁻³ cm/sec)

DI 値は、地震動の加速度と速度の内積を求め、その常用対数をとった値となる。使用する加速度と速度の値は 100 Hz サンプリングで常時計測、処理することができるため、DI 値はリアルタイムに得ることができる。迅速性が要求される直下地震のような場合には、非常に有用な指標となる。図 4.37 に、地震時の DI 値の変動の模式図を示す。

図 4.37 の上部は地震動の加速度波形、下部はその時の DI 値の変化である。DI 値は、P 波到達と同時に値が急変し、S 波到達後の主要動で最大となる。

コンパクトユレダスでは、この P 波検知かつ DI 値の変動開始点を地震検知時間 (P 波検知時間) とし、P 波検知後 1 秒以内に観測された最大の DI 値を PI 値 (P-wave Index) とした。

図 4.38 は、防災科学技術研究所強震観測網 K-NET (TCG009 今市、SZO002 伊東、KGS004 阿久根) 観測点で 1996 年～1997 年に観測された最大加速度と、PI 値および DI 値を示したものである⁴⁻²³⁾。横軸が最大

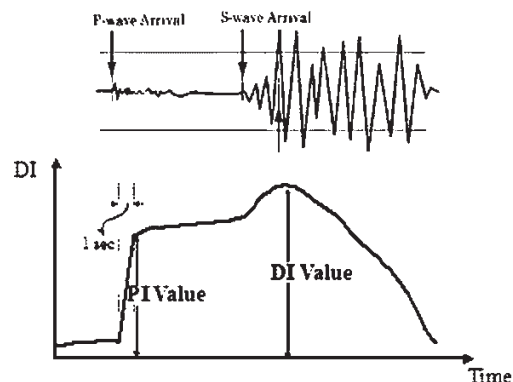


図 4.37 DI 値の変動⁴⁻²⁵⁾

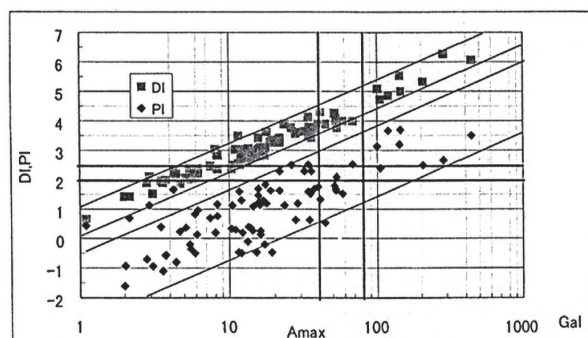


図 4.38 最大加速度と PI 値、DI 値の関係⁴⁻²³⁾ (掲載許諾)

加速度、縦軸は最大 DI 値および PI 値を示す。PI 値に多少のばらつきがあるものの、DI 値、PI 値は、最大加速度に比例していることが分かる。コンパクトユレダスでは、この P 波検知後 1 秒で得られる PI 値とその地震動の最大加速度の関係性から、PI 値がある程度の大きさであれば、その後の最大加速度も大きくなることが予測されると判断し、PI 値を用いた早期警報を行った。

4.6.3 早期地震警報システムの小型化

従来の地震計（強震計や早期地震警報システムなど）は、図 4.39 のように、主に、揺れを計測するセンサー部、センサー部で計測されたアナログデータをデジタルデータへ変換する A/D 変換器、A/D 変換器から入力された情報をもとに震度や加速度の算出、地震警報を行う処理装置などから構成される。

2000 年代当時は、一般的な地震計はセンサー部と A/D 変換器間はケーブルで接続され、設置環境によっては数 m ～数 10 m 離れることもあった。そのため、たとえその区間の有線ケーブルが外来電気ノイズ等から保護されるものを使用したとしても、雷や静電気、強い電磁波等の影響を受け、センサー部で計測されていないノイズが異常な振動波形として A/D 変換器へ入力されるなど、正確な振動計測に影響を及ぼすことがあった。

一方この頃には、これまで処理装置として使用していた産業用コンピュータと同等の機能を持った高性能のマイコン（電子機器を制御するための小型のコンピュータ）も登場し、デスクトップパソコンはもちろん、ノート PC よりも小さい処理装置を構築することが可能となった。

鉄道や重要施設で利用されている早期地震警報システムのような装置は、警報出力の影響は大きい。例えば、地震警報が出力されると、全列車が運転見合わせとなったり、工場の生産が停止したり、従業員や施設利用者が一斉避難となったりすることもある。そのた

め、精度の高い警報情報は必要であるが、誤警報、特に地震ではない場合での警報は可能な限り抑止することが望ましい。

そこで、外来の電気ノイズの影響を少なくするためにも、できるだけアナログ情報を扱う部材を小さくし、また、その場所を筐体内部で完結させ、外部への情報出力は電気ノイズの影響を受けないデジタル情報とする早期地震警報システムの開発が行われた。

2005 年に SDR が開発をした早期地震警報システムフレックル(FREQL, Fast Response Equipment against Quake Load)⁴⁻²⁶⁾は、センサー部や A/D 変換器、処理部を、一辺約 12 cm の立方体の筐体に納めた早期地震警報システムである（図 4.40）。開発当初は、コンパクトユレダスで利用されていた PI 値を用いた早期警報を、P 波検知後、最短 0.2 秒で発令していた。その後、処理装置の高速化や P 波の検知方法の改良が行われ、2010 年には P 波検知後、最短 0.1 秒で S 波到達後の震度や最大加速度の推定をし、それに基づいた地震警報が可能となった。また、ユレダスと同じく地震諸元推定機能も有し、ユレダスが P 波検知後 3 秒で推定していたものを、1 秒で推定できるようにも改良された。

このフレックルは、2007 年に東京メトロ、2011 年に楽天野球団、2015 年に大阪市交通局（現在の Osaka Metro）、2016 年に東京臨海高速鉄道（りんかい線）に早期地震警報を発令する地震計として設置され、2025 年現在も稼働中である。また、2012 年以降、国内の半導体工場でも利用されている。

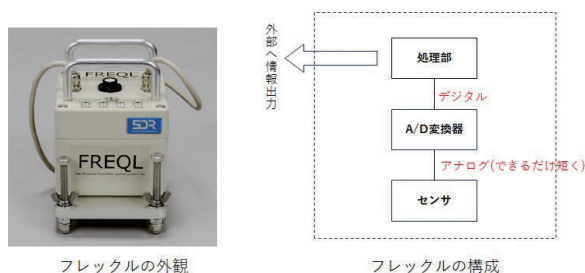


図 4.40 早期地震警報システム フレックル (FREQL)
(筆者作成)

4.6.4 早期地震警報システムの新たな用途

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震 (M 6.8) は、走行中の新幹線が地震により脱線した初めての地震であった。その衝撃的な光景は国内外で大きく報道されとともに、その後の高速鉄道における安全対策に大きな影響を与えた。同時に、その地震ではもう一つ日本国内で連日注目される事故が発生した。親子 3 人が地震により発生した土砂崩落に巻き込まれるという、痛ましい事故である。以下に当時の現場の

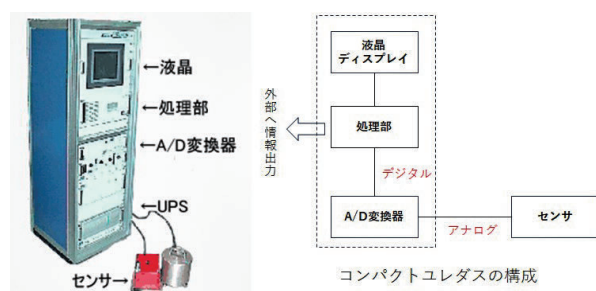


図 4.39 地震計（早期地震警報システム）の機器構成例
(筆者作成)



図 4.41 親子が巻き込まれた土砂崩落現場（東京消防庁提供）



図 4.42 土砂崩落現場での救助の様子（東京消防庁提供）

状況を示す。

新潟県長岡市の県道で起きた大規模な土砂崩落（図 4.41）は、母親とその子供 2 人が乗った自動車を巻き込んだ。生き埋めとなった彼らを救助するための東京消防庁消防救助機動部隊（通称：ハイパーレスキュー）らによる活動は連日連夜続けられ、発災から約 92 時間後に奇跡的に男の子 1 人が救助された（図 4.42）。

当時、頻繁に余震が発生したこの救助現場では、隊員の二次被害を防ぐために現場上部に高所警戒班を配置し（図 4.43 参照）、余震による土砂崩落を警戒しながら救助が続けられた。その中で高所警戒班が余震の揺れを感じると避難を促す警告を発し、救助を中断、状況によっては川へ退避というものであった。ただこの警戒体制はあくまでも人の感覚に頼ったものであったため、余震が多発している状況では地震発生判断も大変難しかったとのことであった。

このような救助活動を経験した当時の東京消防庁消防総監の白谷祐二は、よりの確かつ迅速に地震を検知、

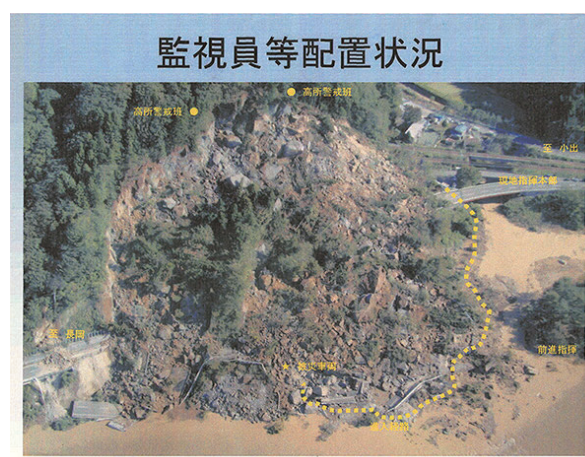


図 4.43 救助活動中の監視員等の配置状況（東京消防庁提供）

警報を行い、隊員の二次被害を防止することを目的とした、持ち運びできる地震警報器を切願した。このアイデアは活動終了後すぐに検討が始まり、約 1 ヶ月後には機器が選定され、救助現場に適した新たな早期地震警報システムの開発が進められた。

当時の地震計はセンサー部や処理部が独立し、その間をケーブルで接続した構成が主流で、そのサイズや重量は、大きくまた重く、持ち運びができるような形状ではなかった。その中で注目されたのがフレックルであった。フレックルは前述の通り小型化され、容易に持ち運びできる大きさであり、また防滴性能も有していたことから、これを用いた可搬型の早期地震警報システムの構築が行われた。

開発をするにあたり、東京消防庁から以下の要望があった。

- P波を検知し、その地震動が危険と判断された場合は直ちに警報(P波警報)を発する機能を有すること。
- P波検知後も振動の監視を続け、実際の加速度や震度の大きさでも警報を発する機能を有すること。P波警報と合わせて多重警報機能を有すること。
- 感震器および警報装置は防滴機能を有すること。
- 感震器および警報装置は、内蔵バッテリーでも稼働できること。
- PCを接続して、波形の監視やリアルタイムに震度が確認できること。
- 感震器および警報装置、PC、ケーブル類が一体で収納できるケースであること。

上記要望のうち、P波警報や多重警報については既にフレックルで実現はしていたが、それ以外は新たな構築が必要であった。特に、災害現場での使用となることから、屋外で容易に運搬、設置できるだけでなく、悪天候の中でも利用できることが求められた。その当時の検討図が図4.44である。

図4.44に従って、フレックル、ビーコン(警告灯)とサウンダーを有した警報装置、地震計の情報を表示するPCから機器を構成し、警報装置には少しでも高

い位置から警報を通知できるように底面に三脚用の穴も設けた。また、PC以外は全て防滴以上の機能を持たせ、天候に左右されずに使用できるようにした。構成機器全てを納めることができる運搬用ケースも準備し、完成したものが可搬型早期地震警報システム FREQL である(図4.45) ⁴⁻²⁷⁾。

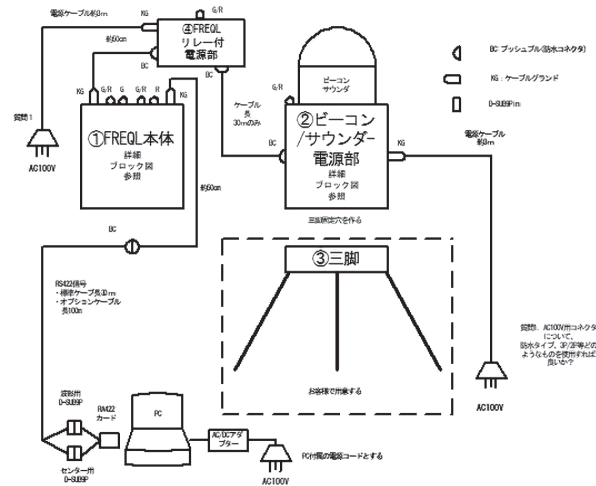


図 4.44 持ち運びができる早期地震警報システムの検討図 (SDR 社提供)



図 4.45 可搬型早期地震警報システムFREQL (フレックル) (SDR 社提供)



図 4.46 新潟県中越地震を踏まえて新たに整備する救助資機材等の報道発表時の様子 (SDR 社提供)



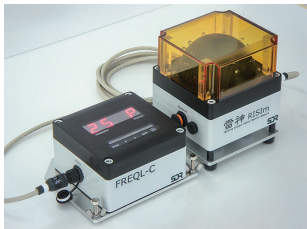
2005 年 3 月に完成した可搬型のフレックルは、早速、同年 3 月 1 日に東京消防庁で開かれた「新潟県中越地震を踏まえて新たに整備する救助資機材等の報道発表」にて公開された(図 4.46)。

なお、この可搬型フレックルは、P 波警報等の地震警報機能は従来機種と同様に有しつつ、これまで固定設置でしか利用できなかった早期地震警報システムが、いつでもどこでも持ち運びでき、また容易に地面に設置して利用できるという特長から、総務省消防庁の省令「救助隊の編成、装備及び配置の基準を定める

省令(昭和 61 年自治省令第 22 号、平成 18 年改正)」の高度救助用資機材として規定され、消防や警察等で導入が進められた。

その後も、センサーの機能の向上やユーザーの意見を踏まえた改良が進められ、2007 年には可搬型フレックルの後継機や、株式会社高見沢サイバネティクスからも緊急地震速報の技術を使用した可搬型早期警報地震計 STR-120 が発売された。これまでリリースされた主要な製品を表 4.4 にまとめる。

表 4.4 可搬型の早期地震警報システム

年	品名(メーカー)	年	品名(メーカー)
2005 年	可搬型早期地震警報システム FREQL⁴⁻²⁷⁾  (株式会社システムアンドデータリサーチ)	2012 年	早期地震検知警報装置 FREQL-C  (株式会社システムアンドデータリサーチ) (写真は SDR 社提供)
2007 年	早期地震検知警報装置 FREQL Light⁴⁻²⁸⁾  (株式会社システムアンドデータリサーチ)	2016 年	可搬型早期警報地震計 STR-121⁴⁻³⁰⁾  (株式会社高見沢サイバネティクス)
	可搬型早期警報地震計 STR-120⁴⁻²⁹⁾  (株式会社高見沢サイバネティクス)	2019 年	早期地震検知警報装置 FREQL-LU⁴⁻³¹⁾  (株式会社システムアンドデータリサーチ)

4.7 緊急地震速報

緊急地震速報は、気象庁と鉄道総合技術研究所による、2000年から3年計画で行われた「ナウキャスト地震情報^{4-32)~4-34)}」という共同研究から始まった。この研究では、地震発生直後に震源近くの観測点でP波(初期微動)を検知し、被害を発生させるS波(主要動)到達前に、予測される震度とS波到達予測時刻を推定することにより、発災前に地震による被害を防止・軽減すること、また、迅速に津波等に係る情報を発表することを目指した。

その後、ナウキャスト地震情報は、名称を現在の「緊急地震速報」に変え、2004年からの試験提供を踏まえ、2007年(平成19年)12月1日に一般提供が開始されている。この時、緊急地震速報は、気象業務法の一部を改正する法律(平成19年法律第115号)の施行に伴い、地震動の予報および警報と位置付けられ、下記のこと法律で規定された。

- 気象庁による地震動の予報及び警報の実施
- 気象庁以外の者に対する地震動の予報の業務の許可
- 気象庁以外の者による地震動の警報の制限
- 地震動の警報の伝達

また、2013年(平成25年)8月30日には、気象業務法及び国土交通省設置法の一部を改正する法律(平成25年法律第23号)の施行に伴い、新たに「特別警報」が規定された。

4.7.1 緊急地震速報のしくみ

2022年4月1日時点の緊急地震速報で利用している地震観測点は、図4.47の通りである。地震の発生をいち早くとらえるため、全国約690地点の気象庁観測点の他に、国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震観測網(全国約1,000箇所)も合わせて利用している。

緊急地震速報の処理の流れは図4.48のようになっている。まず図4.47の観測点のいずれかで地震を検知(図4.48中の①)すると、気象庁本庁で震源の位置やマグニチュードを推定し、各地点の揺れの強さ(震度と長周期地震動階級⁴⁻³⁶⁾)と到達時刻を予想(図4.48中の②)する。その予想値が発信条件を満たすと、緊急地震速報が発表(図4.48中の③)される。

なお、2.1.6のリアルタイム震度(防災科研方式)は、緊急地震速報の震源やマグニチュードの推定を行わずに震度を予測する方法(PLUM法⁴⁻³⁷⁾)で利用されている。

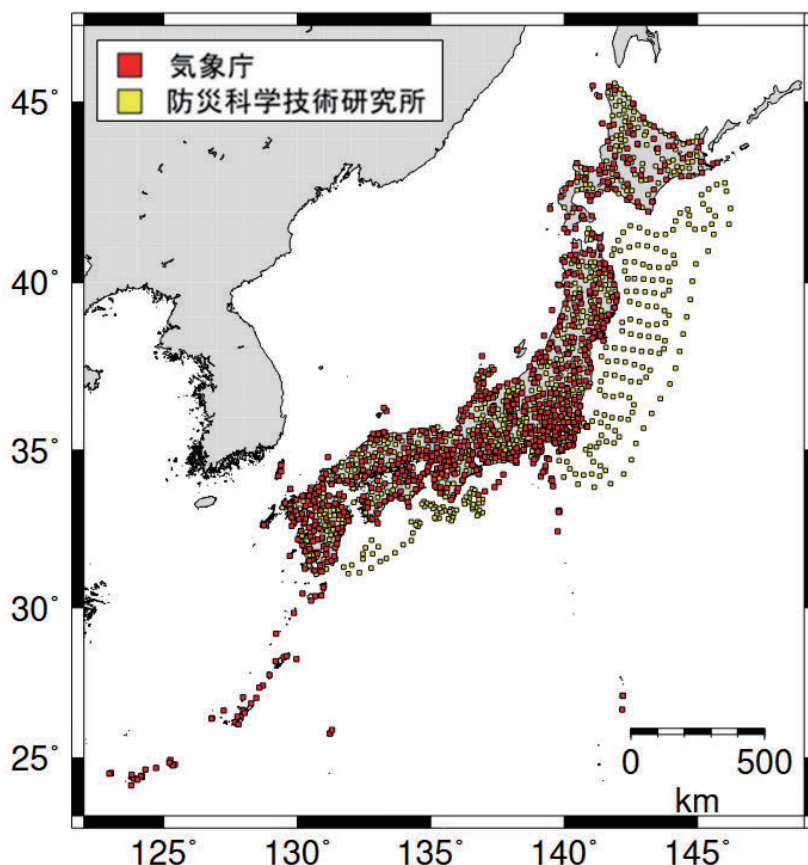


図 4.47 緊急地震速報に活用されている観測点(2022年4月1日時点)⁴⁻³⁵⁾

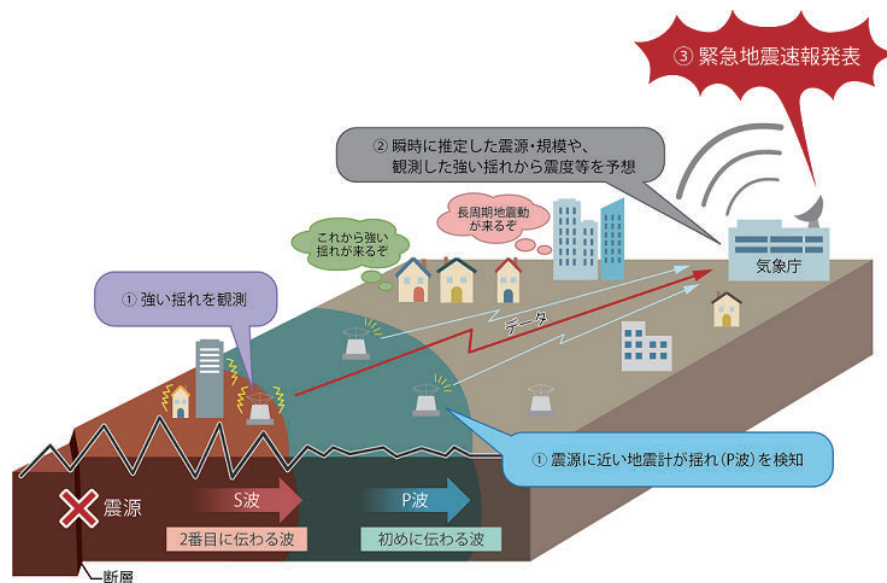


図 4.48 緊急地震速報の仕組み ⁴⁻³⁵⁾

緊急地震速報は、地震を検知した観測点で地震波形を逐次処理し、震央距離や最大振幅値等を算出する「単独観測点処理」、単独観測点処理の結果を集約し、震源決定や震度および長周期地震動階級の予測、地震波の到達時間を計算する「中枢処理」、中枢処理の結果、緊急地震速報の発表条件または更新条件を満たした場合に行われる「発表処理」から構成されている。これらの処理については、気象庁のウェブサイトにて公開されており、それぞれの技術的な解説がされている ⁴⁻³⁷⁾。

4.7.2 緊急地震速報の内容・発表条件

発表される緊急地震速報には、「緊急地震速報（予報）」と「緊急地震速報（警報）」がある。

（1）緊急地震速報（予報）

緊急地震速報（予報）は、専用の受信端末等を用い

て、受信地点での予測震度や長周期地震動階級、主要動到達予想時刻などを表示したり、その情報を用いて機器の制御を行ったりすること等で活用をされている。その発信条件や内容を表 4.5 に示す。

（2）緊急地震速報（警報）

緊急地震速報（警報）は、テレビやラジオ、携帯電話・スマートフォン（緊急地震速報専用アプリは除く）、防災行政無線等で通知される。一般的に認識されている緊急地震速報は、この緊急地震速報（警報）を指す。その発信条件や内容を表 4.6 に示す。

なお、緊急地震速報（警報）のうち、震度 6 弱以上が予想される場合、または、長周期地震動階級 4 が予想される場合は、特別警報（地震動特別警報）に位置づけられる。

表 4.5 緊急地震速報（予報）の発信条件・内容 ⁴⁻³⁷⁾

発信条件	- いずれかの地震観測点において、P 波または S 波の振幅が 100 Gal 以上となった場合。 - 地震計で観測された地震波を解析した結果、震源・マグニチュード・各地の予測震度、予測長周期地震動階級が求まり、そのマグニチュードが 3.5 以上、または最大予測震度が 3 以上、長周期地震動階級が 1 以上である場合。
内容	- 地震の発生時刻、地震の発生場所（震源）の推定値 - 地震のマグニチュードの推定値 - 予測される最大震度が震度 3 以下のときは、予測される揺れの大きさの最大（最大予測震度） - 予測される最大震度が震度 4 以上または長周期地震動階級 1 以上のときは、地域名 ⁴⁻³⁸⁾に加えて、震度 4 以上または長周期地震動階級 1 以上と予測される地域の揺れの大きさの予測値（予測震度、予測長周期地震動階級）、その地域への大きな揺れ（主要動）の到達時刻の予測値（主要動到達予測時刻）

表 4.6 緊急地震速報（警報）の発信条件・内容 ⁴⁻³⁷⁾

発信条件	地震波が 2 点以上の地震観測点で観測され、最大震度が 5 弱以上または最大長周期地震動階級が 3 以上と予想された場合。
内容	- 地震の発生時刻、発生場所（震源）の推定値、地震発生場所の震央地名 - 強い揺れ（震度 5 弱以上または長周期地震動階級 3 以上）が予想される地域及び震度 4 が予想される地域名 ⁴⁻³⁸⁾

参考文献

- 4-1) 高山昭, 江本祐橘, 阿部英彦, 中村豊:「地震動早期検知システムの研究—新幹線の安全のために—」, 土木学会誌, Vol.66, No.5, 51-56 (1981)
- 4-2) 中村豊:「総合地震防災システムの研究」, 土木学会論文集, No.531/I-34, 1-33 (1996)
- 4-3) 中村豊:「国鉄における地震警報システム」, 鉄道技術, vol.42, 371-376 (1985)
- 4-4) 東海旅客鉄道株式会社, 安全報告書 2025, https://company.jr-central.co.jp/others/report/_pdf/report2025.pdf (2025年10月21日閲覧)
- 4-5) 中村豊:「地震監視ロボット ユレダス」, RRR, Vol.45, No.12, 7-12 (1988)
- 4-6) 山崎文雄:「リアルタイム地震防災システムの現状と展望」, 土木学会論文集, No.577, I-41, 1-16 (1997)
- 4-7) 菊池正幸:「リアルタイム地震学」, 東京大学出版会 (2003)
- 4-8) Paolo Gasparini, Gaetano Manfredi, Jochen Zschau (Eds.): "Preface", Earthquake Early Warning Systems, Springer, V-XI (2007)
- 4-9) Satriano, C., Yih-Min Wu, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori: "Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, 106-118 (2011)
- 4-10) 中村豊:「地震(津波)警報のための地震早期検知を行う1点検知システムの考え方とパソコンによる実施例」, 第18回地震工学研究発表会講演概要, 505-508 (1985)
- 4-11) 中村豊, 斉藤明夫:「地震波動種別の識別と単一観測点のデータに基づく震央方位の推定」, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 95-98 (1983)
- 4-12) Nakamura, Y.: "Development of Earthquake Early Warning System for the Shinkansen", SOME RECENT EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH AND PRACTICE IN JAPAN, The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering, 224-238 (1984)
- 4-13) 中村豊, 上野真:「地震早期検知警報システム UrEDASの開発」, 日本地震工学シンポジウム講演集, 2095-2100 (1986)
- 4-14) 中村豊:「鉄道用地震防災システムについて」, 鉄道と電気, Vol.39, No.10, 4-8 (1988)
- 4-15) 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講演概要, 505-508 (1987)
- 4-16) 山口文敏, 中村豊, 富田健司, 遠峯啓一:「青函トンネル地震防災システムに提えられた1993年釧路沖地震—トンネル覆工歪の変動—」, 地震工学研究発表会講演概要, 651-654 (1993)
- 4-17) 中村豊:「新しい地震警報システム UrEDAS」, 鉄道技術, Vol.42 (1985)
- 4-18) 鉄道総合技術研究所, RRR (Railway Research Review), vol.70, p.32 (2013)
- 4-19) 鉄道総合技術研究所, RRR (Railway Research Review), vol.49, p.29 (1992)
- 4-20) 中村豊, 新谷恒章:「ユレダスによるノースリッジ地震群のリアルタイムモニター」, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, 1492-1493 (1994)
- 4-21) 株式会社システムアンドデータリサーチ, 2003年1月22日02時06分頃に発生したコリマ市付近の地震に対するメキシコシティー・ユレダスの動作状況, https://www.sdr.co.jp/mexico/20030122_eq/pre_report.html (2025年10月5日閲覧)
- 4-22) 中村豊:「世界最初の実用P波警報システム「ユレダス」の現状と将来」, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 107-112 (2000)
- 4-23) Nakamura, Y.: "A NEW CONCEPT FOR THE EARTHQUAKE VULNERABILITY ESTIMATION AND ITS APPLICATION TO THE EARLY WARNING SYSTEM", Early Warning Conference '98, 693-699, (1998)
- 4-24) Nakamura, Y.: "UrEDAS, URGENT EARTHQUAKE DETECTION AND ALARM SYSTEM, NOW AND FUTURE", 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.908, (2004)
- 4-25) 佐藤勉, 中村豊:「地震被害指標DI値の変動を利用した2004年新潟県中越地震の震源推定」, 日本地震工学会2005年年次大会, (2005)
- 4-26) 株式会社システムアンドデータリサーチ, 「早期地震警報システム FREQL」, <https://www.sdr.co.jp/freql/freql.html> (2025年10月6日閲覧)
- 4-27) 株式会社システムアンドデータリサーチ, 「早期地震警報システム 可搬型 FREQL」, <https://www.sdr.co.jp/freql/pfreql.html> (2025年10月6日閲覧) (掲載許諾)
- 4-28) 株式会社システムアンドデータリサーチ, 「早期地震検知警報装置 FREQL Light」, <https://www.sdr.co.jp/freql/pfreql-light.html> (2025年10月6日閲覧) (掲載許諾)
- 4-29) 株式会社高見沢サイバネティクス, 「可搬型早期警報地震計 STR-120」, <https://www.tacy.co.jp/products/tokki/str/str120/> (2025年10月6日閲覧) (掲載許諾)
- 4-30) 株式会社高見沢サイバネティクス, 「可搬型早期警報地震計 STR-121」, <https://www.tacy.co.jp/products/tokki/str/str121/> (2025年10月6日閲覧) (掲載許諾)
- 4-31) 株式会社システムアンドデータリサーチ, 「早期地震検知警報装置 FREQL-LU」, <https://www.sdr.co.jp/freql/freql-lu.html> (2025年10月6日閲覧) (掲載許諾)
- 4-32) 芦谷公稔, 小高俊一, 東田進也, 佐藤新二, 横田崇, 川津拓幸, 大竹和生, 野坂大輔:「ナウキャスト地震情報の活用を想定した早期地震警報システムの開発(その1) —全体計画および早期地震諸元推定法—」, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 1289-1292 (2001)
- 4-33) 室野剛隆, 芦谷公稔, 横田崇:「ナウキャスト地震情報の活用を想定した早期地震警報システムの開発(その2) —地震動による構造物の被害ランク推定手法—」, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 1293-1296 (2001)
- 4-34) 佐藤新二, 東田進也, 室野剛隆, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔:「ナウキャスト地震情報の活用を想定した早期地震警報システムの開発(その3) —リアルタイム地震警報システムの概要—」, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 1297-1300 (2001)
- 4-35) 気象庁, 「緊急地震速報のしくみ」, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/eew/shikumi/shikumi.html> (2025年9月25日閲覧)
- 4-36) 気象庁, 「長周期地震動階級および長周期地震動階級関連解説表について」, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm_explain/about_level.html (2025年11月24日閲覧)
- 4-37) 気象庁, 「緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料」, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/eew/katsuyou/reference.pdf> (2025年9月25日閲覧)
- 4-38) 気象庁, 「緊急地震速報や震度情報で用いる区域の名称(令和6年1月11日現在)」, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/joho/shindo-name.html> (2025年9月27日閲覧)

5 | 現在稼働中の主な早期地震警報システム

新幹線の地震防災を目的として開発された早期地震検知警報システム UrEDAS(ユレダス)を契機に、その後日本国内はもちろんであるが、世界中でも早期地震警報システムが開発され、また実用化されている。

2002年に、鉄道総合技術研究所の芦谷公稔と室野剛隆は、これまでの鉄道の地震警報システムの開発経緯と共に新システムの計画を述べている⁵⁻¹⁾。この新システムは、後に緊急地震速報や東海道、東北・上越等の新幹線のシステムにつながっている。また2006年には、ユレダスを開発した中村豊も、実用から15年近くの実績を積んだ当時唯一の早期地震警報システムの動作事例を紹介しながら、早期地震警報の有効性や今後の展望について考察している⁵⁻²⁾。近年では他の学術分野からも注目され、各種学会誌等でも取り上げられるようになった⁵⁻³⁾。

また、インターネット上のフリー百科事典ウィキペディアにおいても早期地震警報システムの項目がつけられている⁵⁻⁴⁾。記載内容に「鉄道用」との記載があるが、実際は多種多様な分野で活用されている。参考までに、鉄道向けのシステムについて、その変遷を図5.1に示す。後述する鉄道各社の整備の流れと合わせて参照頂きたい。

2025年時点の日本国内における早期地震警報システムは、緊急地震速報が広く利用され身近なものとなっている。その一方で、緊急地震速報の性質上、直下地震に対しては警報が不向きであること、また予測震度のみしか伝達されないことから、独自に早期地震警報システムや地震計を設置し、対象施設に対する早期地震警報や地震情報の収集を行っている企業も存在する。例えば新幹線では、全路線に自社の早期地震警報システムが導入されている。

本章では、それら企業の地震警報システムの事例の他、日本以外での実用例を紹介する。

5.1 緊急地震速報

2007年から一般向け提供が開始された緊急地震速報により、それまで鉄道や工場など限られた中で利用されてきた早期地震情報が、多くの人々にも活用できる防災情報として多種多様な方法で入手できるようになった。

緊急地震速報は、全国に設置された地震計の情報を気象庁が集約し、予報業務許可事業者を介してテレビ

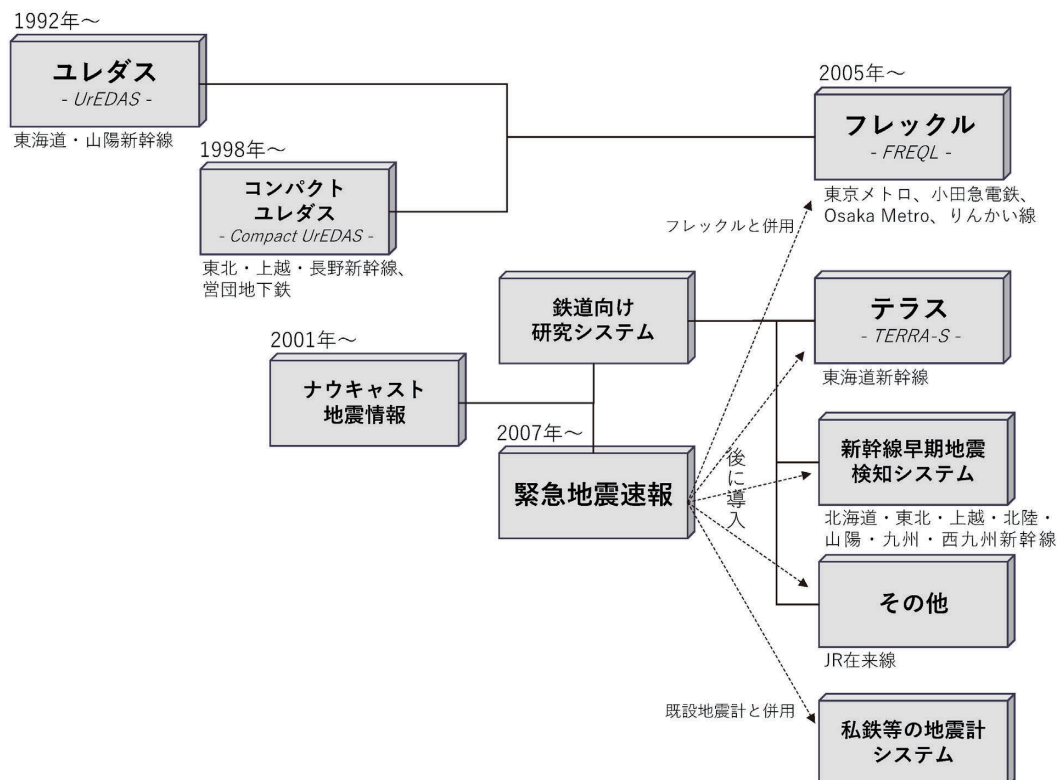


図 5.1 鉄道向け早期地震警報システムの変遷(筆者作成)

や携帯電話、専用の受信端末へ配信される。例えば、株式会社 ANET（予報業務許可：第 101 号）では、図 5.2 のような流れで多くの鉄道事業者へ緊急地震速報を配信し、早期の地震情報を提供している。

緊急地震速報（警報）の一般的な入手方法は、テレビやラジオ、防災行政無線、携帯電話・スマートフォ

ン（緊急地震速報専用アプリは除く）であるが、緊急地震速報（予報）を入手する場合は、気象庁長官の許可を受けた事業者（地震動予報業務許可事業者）が提供するソフトウェアや専用端末等が必要となる。

参考までに、表 5.1 に予報業務許可事象者を示す。

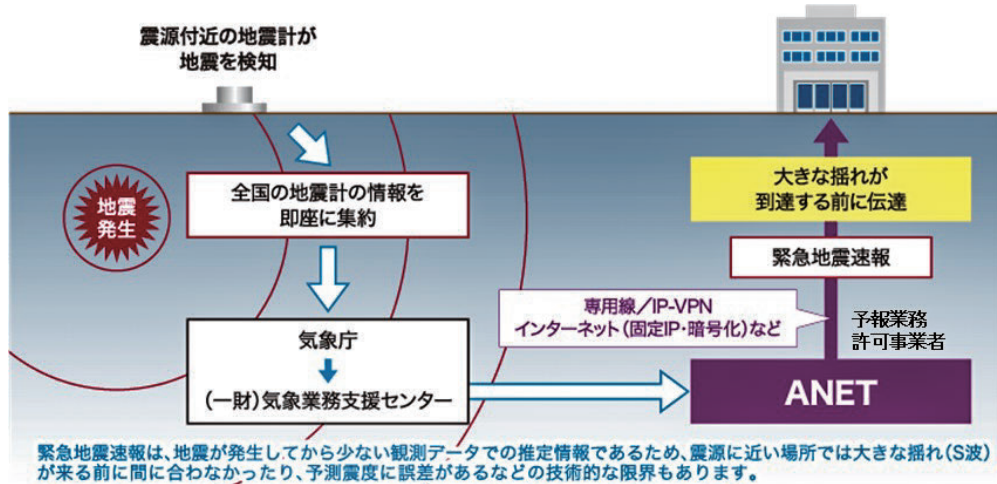


図 5.2 緊急地震速報の配信例（株式会社 ANET ウェブサイト⁵⁻⁵⁾に一部追記、掲載許可）

表 5.1 予報業務許可事業者一覧

許可番号	予報業務許可事業者	許可番号	予報業務許可事業者
許可第 25 号	(株) ウェザーニュース	許可第 139 号	(株) J-POWER ビジネスサービス https://www.jpbs.co.jp/
許可第 33 号	(株) フランクリン ジャパン https://www.franklinjapan.jp/	許可第 147 号	Takusu (株) https://www.takusu.co.jp/
許可第 97 号	(株) トータル ライフサービスコミュニティー http://www.totalife.co.jp/	許可第 148 号	(株) ドリームウェア https://www.dreamware.jp/
許可第 98 号	(株) エイツ https://www.a-2.co.jp/	許可第 152 号	三菱電機ビルソリューションズ (株)
許可第 100 号	情報事務資材 (株) https://www.web-jjs.jp/	許可第 156 号	(株) チャレンジ
許可第 101 号	(株) ANET (アネット) https://anetrt.jp/	許可第 164 号	(株) センチュリー https://www.century.co.jp/
許可第 103 号	三菱電機ソフトウェア (株)	許可第 170 号	(株) 日立アイイーシステム https://www.hitachi-ie.jp/
許可第 104 号	清水建設 (株) https://www.shimz.co.jp/	許可第 173 号	パナソニック (株)
許可第 106 号	(株) テックス	許可第 176 号	(株) コミュニケーションネット https://www.cnt-inet.co.jp/
許可第 107 号	明星電気 (株) https://www.meisei.co.jp/	許可第 180 号	東洋テック (株) https://www.toyo-tec.co.jp/
許可第 108 号	(株) ハレックス https://www.halex.co.jp/	許可第 189 号	(株) アイザック https://www.isaac.co.jp/works/product/signal/
許可第 111 号	白山工業 (株) https://www.hakusan.co.jp/products/bosai/kinkyujishin.html	許可第 190 号	(株) かなめ技術開発 https://kaname-tec.co.jp/
許可第 113 号	(株) レッツ・コーポレーション	許可第 196 号	DX アンテナ (株) https://www.dxantenna.co.jp/
許可第 116 号	アイホン (株) https://www.aihone.co.jp/	許可第 197 号	東海警備保障 (株) https://www.t-keibi.co.jp/
許可第 120 号	大成建設 (株) https://www.taisei.co.jp/	許可第 198 号	ストラテジー (株) http://www.estrat.co.jp/
許可第 121 号	アールシーソリューション (株) https://www.rcsc.co.jp/	許可第 200 号	(株) ミエルカ防災 https://mieruka.co.jp/
許可第 122 号	NPO法人リアルタイム地震・防災情報利用協議会 https://www.real-time.jp/	許可第 212 号	レキオソフト (株) https://www.lequiossoft.co.jp/
許可第 124 号	国立大学法人東京大学	許可第 214 号	ゲヒルン (株) https://www.gehirn.co.jp/
許可第 126 号	(株) NTT ファシリティーズ	許可第 218 号	国立研究開発法人防災科学技術研究所 https://www.bosai.go.jp/
許可第 131 号	JCOM (株) https://www.jcom.co.jp/	許可第 224 号	(株) ソフトテックス https://www.softtex.co.jp/
許可第 136 号	(学) 名古屋電気学園	許可第 235 号	ジェイバリュー信託 (株) https://www.jvtrust.co.jp/page1
許可第 138 号	安全・安心サポート (株) http://www.boucyz.net/index.html	許可第 237 号	會田 壮志 https://eew.dmdata.jp/

許可番号順 2025 年 4 月 11 日現在

気象庁ウェブサイト⁵⁻⁶⁾に事業者の URL リンクがある場合は、それも併記した。

緊急地震速報(予報)を入手できる端末は、例えば、図 5.3 のような専用のソフトウェアがインストールされたデスクトップコンピュータ型や、図 5.4 のような専用端末型がある。また、図 5.5 のような、地震計を内蔵し計測された震度も確認できる製品も発売されている。2008 年にはグッドデザイン賞も受賞した受信機もあった(図 5.6)。



図 5.3 緊急地震速報受信機(デスクトップコンピュータ型)
(明星電気株式会社 QCAST® 受信装置 S704-FCPL⁵⁻⁷⁾)

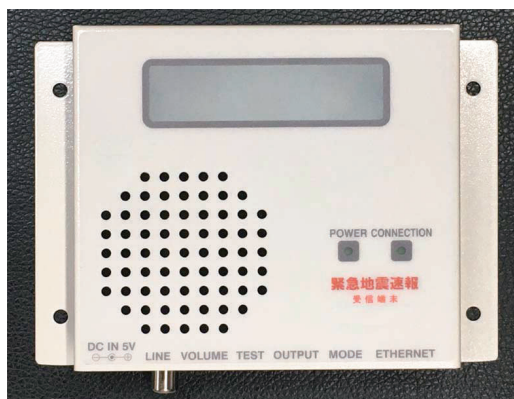


図 5.4 緊急地震速報受信機(専用端末型)
(安心・安全サポート株式会社 専用端末「AASK-100」型緊急地震速報システム⁵⁻⁸⁾、株式会社 RiaNet 緊急地震速報(予報)受信専用端末クルグラット New⁵⁻⁹⁾)



図 5.5 緊急地震速報受信機(地震計内蔵型)
(株式会社エイソー 緊急地震速報受信機 SeismoGuard⁵⁻¹⁰⁾)



図 5.6 グッドデザイン賞を受賞した緊急地震速報受信機⁵⁻¹¹⁾
(株式会社小堀鐸二研究所、鹿島建設株式会社、応用地震計測株式会社 早期地震警報システム 震度番、著作権利権者：(C) JDP、サイト名：GOOD DESIGN AWARD、リンク URL：<https://www.g-mark.org>)

5.2 東海道新幹線の早期地震警報システム

東海道新幹線の早期地震警報システムは、1992 年の「のぞみ」の開業とともに世界で初めて P 波検知による早期地震警報が実用化され、現在に至るまで種々の改良が行われている。

1992 年に整備された早期地震検知警報システム「ユレダス」は、沿線から離れた前線警報として、図 4.18 に示すように計 14 地点に設置された。

2005 年、東海旅客鉄道株式会社(JR 東海)は、新たな早期地震警報システムとして「TERRA-S(テラス)」を稼働させた(図 5.7)⁵⁻¹²⁾。地震諸元の推定⁵⁻¹³⁾～⁵⁻¹⁶⁾も地震検知から 2 秒となり、ユレダスよりも 1 秒短縮された。また、新幹線から離れた位置に設置された早期地震警報システム(遠方地震計)には広域警報機能が新設され、160 Gal 以上が計測された場合、地震計直下でマグニチュード 7 クラスの地震が発生したとみなし、従来よりも広い地域(120 km 範囲)に警報を出力する機能が追加された⁵⁻¹⁷⁾。

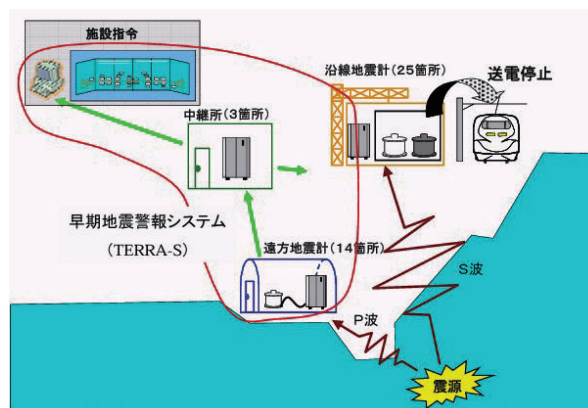


図 5.7 東海道新幹線の地震防災システム⁵⁻¹⁷⁾(掲載許諾)

さらに2006年には運転規制判断を一新して計測震度を採用し、地震後は図5.8のように計測震度で運転規制を判断することとなった^{5-19)、5-20)}。

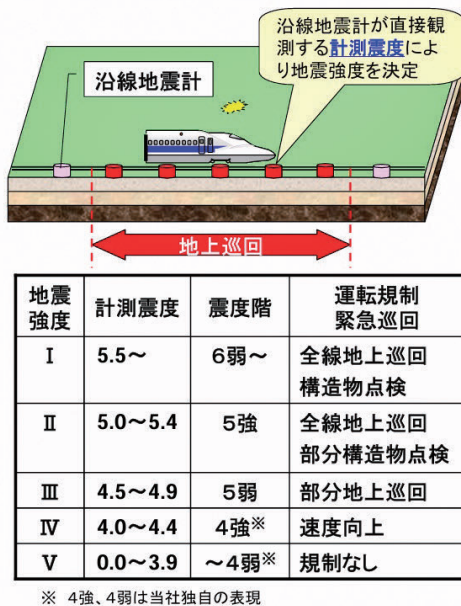


図 5.8 計測震度による運転規制⁵⁻¹⁹⁾ (掲載許諾)

2007年には、図5.9に示すように沿線地震計を25箇所(約20km間隔)から50箇所(約10km間隔)へ増設し、新たに遠方地震計7箇所の整備を始めた⁵⁻¹⁷⁾。



図 5.9 2007年時点の東海道新幹線の地震計の配置⁵⁻¹⁷⁾ (掲載許諾)

2008年からは、気象庁の緊急地震速報を東海道新幹線早期地震警報システムと併用し、地震警報の多重化が開始される⁵⁻²¹⁾。

2012年には、複数の改良が行われている^{5-21)、5-22)}。まず、沿線地震計がP波から震度を推定するよう機能強化され、運転規制基準値(震度4相当)を超過すると判断された場合、列車に停止信号を出力することとなった(図5.10)。また、2011年の東北地方太平洋沖地震の知見より、連動型地震に対応する機能が強化

された。連動型地震の想定震源域として「日本海溝沿い」と「南海トラフ沿い」を想定し、「日本海溝沿い」に震央位置が推定され推定Mが7.5以上となった場合は東京～静岡間で、「南海トラフ沿い」に震央位置が推定され推定Mが7.0以上となった場合は東京～新大阪間で、それぞれ列車を停止させ、連動型地震発生時にもいち早く列車に停止指令が出されるようにした(図5.11)。その他にも、遠方地震計においても機能の追加が行われた。遠方地震計でP波の揺れが非常に小さく、東海道新幹線沿線に影響がないと判定された地震であっても、その後の主要動の揺れで120Gal以上が計測された場合には列車へ停止指令を出力する機能が加わった(図5.12)。これにより、精度よく地震諸元が推定できない場合でも、実際の揺れの大きさをを用いてできるだけ震源近くでより早く確実に地

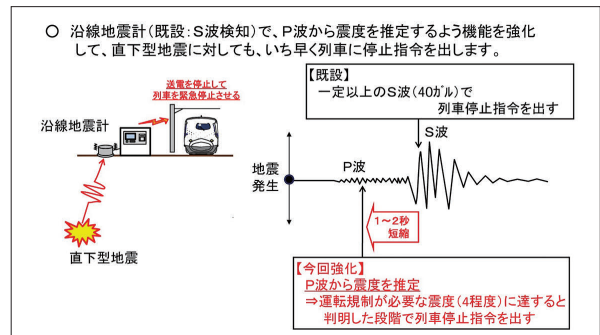


図 5.10 沿線地震計へ早期警報機能の強化⁵⁻²¹⁾ (掲載許諾)

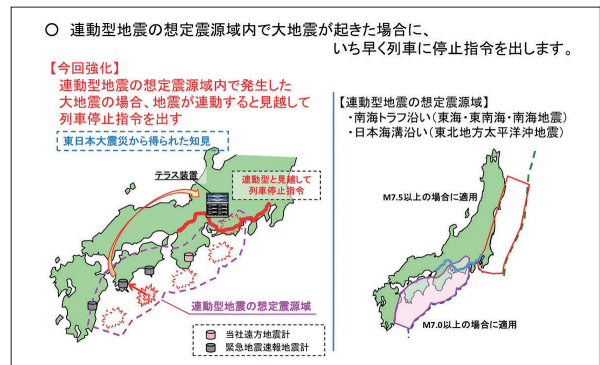


図 5.11 連動型地震に対する機能強化⁵⁻²¹⁾ (掲載許諾)

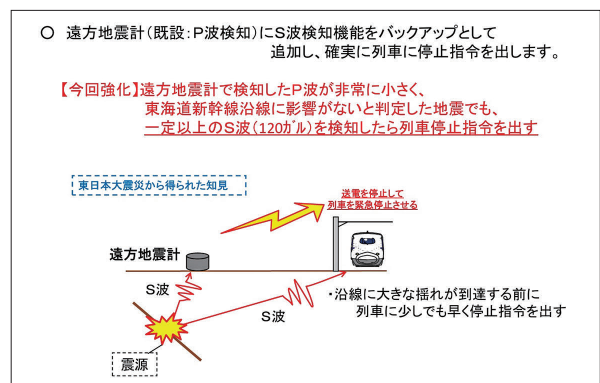


図 5.12 遠方地震計への機能強化⁵⁻²¹⁾ (掲載許諾)

震をとらえ、沿線への揺れの到達前に列車へ停止指令が出力するようにした。

2019年、遠方地震計での地震諸元推定に必要なデータ長を2秒間から1秒間に短縮し(図5.13)、早期警報機能を向上させた⁵⁻²³⁾、⁵⁻²⁴⁾。また、防災科学技術研究所の海底地震観測網(S-net, DONET)の情報を活用することにより、「日本海溝」と「南海トラフ」での海溝地震への対策も開始された(図5.14)⁵⁻²³⁾、⁵⁻²⁵⁾。

2022年には、気象庁、JR東海、鉄道総合技術研究所の3者の産学官による地震防災及び地震情報などの

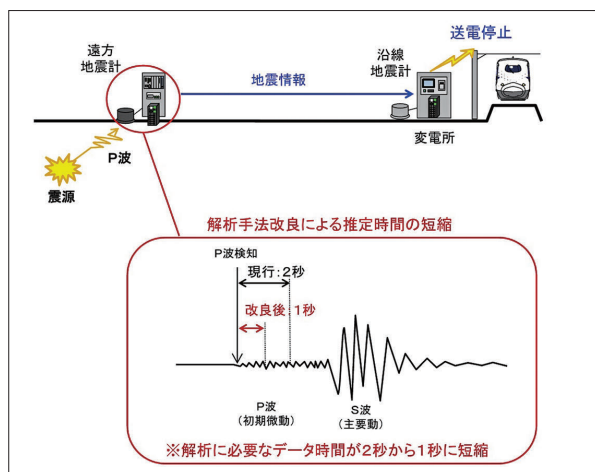


図 5.13 遠方地震計の地震諸元推定時間の短縮⁵⁻²³⁾
(掲載許諾)

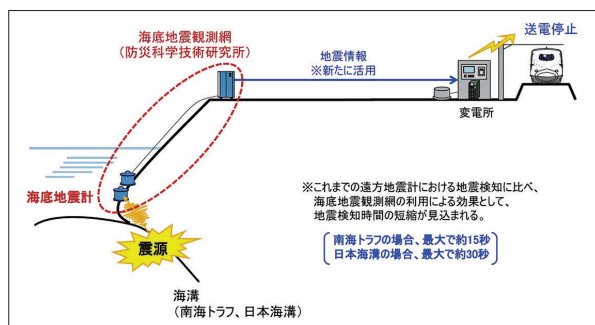


図 5.14 海底地震観測網の情報を活用した
地震検知機能の早期化⁵⁻²³⁾ (掲載許諾)

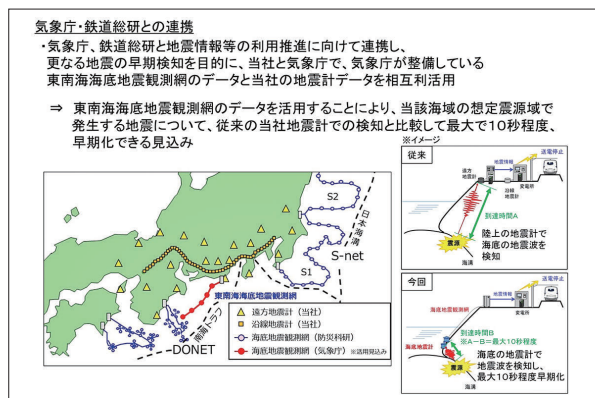


図 5.15 東南海海底地震観測網の情報を活用した
地震検知機能の早期化⁵⁻²⁷⁾ (掲載許諾)

高度利用に関する研究協力が進められ⁵⁻²⁶⁾、気象庁が整備している東南海海底地震観測網のデータも使用され始めた(図5.15)。これにより、その海域を対象とした地震において、これまでの早期地震警報システムと比較して、最大10秒程度、早期化できる見込みとなった⁵⁻²⁷⁾。

5.3 東北・上越・北陸新幹線の早期地震警報システム

5.3.1 早期地震検知システムの整備の流れ

早期地震警報システムの先駆けとして実用化された東北・上越新幹線の新幹線早期地震検知システムは、前線警報型の早期地震警報システムであった(4.1参照)。その後、数々の改良が行われ、現在に至っている。ここではその流れを紹介する。

1982年の東北新幹線の開業時は、図5.16に示すように、海岸線に設置された計8箇所の地震計から構成される前線警報型地震警報システムであった⁵⁻²⁸⁾。

その後、1998年11月に、1995年の兵庫県南部地震(M7.3)の経験を元に開発が行われたコンパクトユレダスへ改良される。このコンパクトユレダスは、東海道・山陽新幹線で利用されていたユレダス同様に、P波を検知しS波到達前に警報発令をして大きな地震動が到来する前に、早期に列車を緊急停止させる目的で導入され、海岸線および沿線56箇所に設置され、また新たに日本海側にも増設された⁵⁻²⁹⁾。

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8)では、営業運転中の新幹線が初めて脱線したもののコンパクトユレダスは有効に機能した。この事象について



図 5.16 東北新幹線の地震警報システム(1982年時)⁵⁻²⁸⁾
(掲載許諾)

変更前

運転再開	80 Gal未満
速度規制	80 Gal以上、120 Gal未満
運転中止	120 Gal以上



変更後

運転再開	9 kine未満
速度規制	9 kine以上、18 kine未満
運転中止	18 kine以上

図 5.17 2005 年の運転規制の判断指標の変更
(文献⁵⁻³¹⁾を基に筆者作成)

ては、次の節で取り上げる。

2005 年 9 月には、運転規制判断の指標を加速度 (Gal) から、構造物の被害と相関性が高い指標とされる SI 値 (kine=cm/s, 2.1.4 参照) へ変更が行われた (図 5.17)⁵⁻³⁰⁾、⁵⁻³¹⁾。これにより、運転規制や運転中止の回数が約 3 割程度、削減される見込みとなった⁵⁻³¹⁾。

2006 年 10 月には、P 波による緊急停止手法が改良され⁵⁻²⁹⁾、これまでの P 波の大きさからその後の揺れの大きさを推定する手法から、震源の位置や規模を推定する手法 (B-Δ 法⁵⁻³¹⁾) へ変更した。また、海岸線地震計においては、P 波検知後からの推定時間を 3 秒から 2 秒へ短縮した (図 5.18)⁵⁻³¹⁾。

2007 年 3 月、従来の沿線地震計⁵⁻²⁹⁾47 箇所に 28 箇所を追加し、計 75 箇所となる (図 5.19)。沿線地震計の間隔が 20 km 以下 (平均 13 km) となった⁵⁻³²⁾。

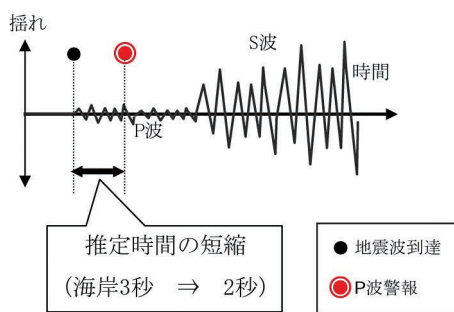


図 5.18 地震規模等の推定方式の変更⁵⁻³¹⁾ (掲載許諾)

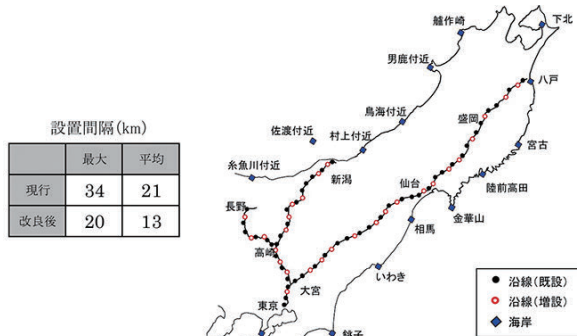


図 5.19 2007 年 3 月時の沿線地震計の増設⁵⁻³¹⁾ (掲載許諾)

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震 (M 9.0) が発生した。金華山に設置された地震計がいち早く地震を検知し、営業中の新幹線を制御した (詳細は次節を参照)。これを受けて、2012 年 8 月には大規模地震に対する取り組みとして、図 5.20 のように内陸地震計として新たに 30 箇所設置する⁵⁻³³⁾。また、10 月には、初めて外部情報の活用として緊急地震速報が導入された⁵⁻³³⁾。

2017 年 11 月、防災科学技術研究所が整備した「日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)」の地震観測デー

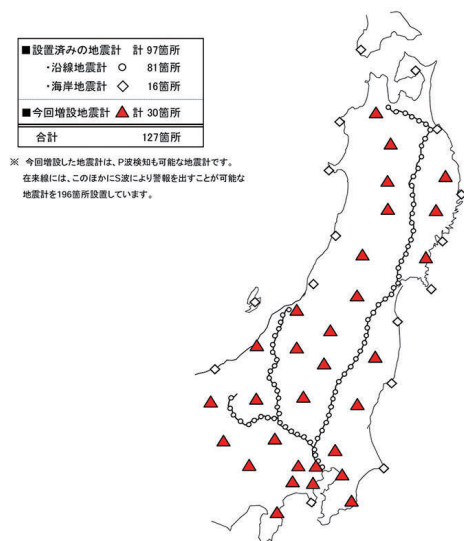


図 5.20 内陸地震計の新設⁵⁻³³⁾ (掲載許諾)

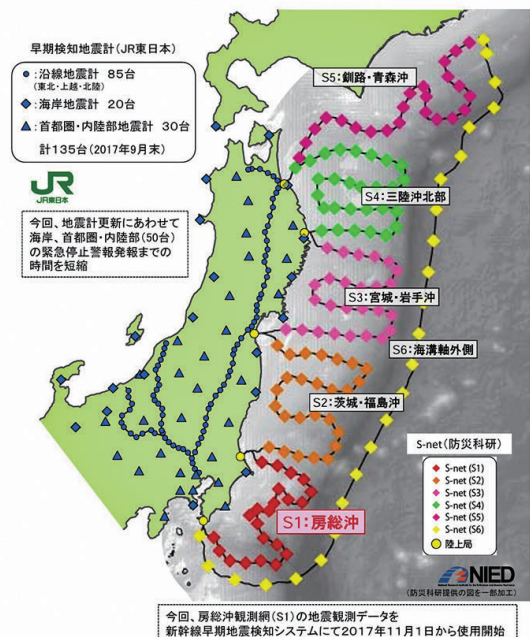


図 5.21 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) と早期検知地震計の配置⁵⁻³⁴⁾
(2017 年 11 月時点の新幹線早期地震検知システム)
(掲載許諾)

タを新幹線早期地震検知システムへ導入する⁵⁻²⁹⁾。太平洋沖で発生する地震をより早く検知できる仕組みが構築される。但し、この時点では図 5.21 で示す房総沖観測網 (S1) のみの観測データが取り込まれた⁵⁻³⁴⁾。

2018 年からは、東北・上越・北陸新幹線の各沿線、海岸、首都圏・内陸部に配備された新幹線早期地震検知システムの早期検知地震計 (135 台) の更新に合わせて、地震情報の推定方法が改良される⁵⁻³⁴⁾。これにより、全ての早期検知地震計の警報発報までに要する時間が最短 2 秒から 1 秒になった。この改良では、従来の地震計や緊急地震速報で使用されている方法 (B- Δ 法) を発展させた手法 (C- Δ 法)⁵⁻³⁵⁾ を用い、P 波の加速度振幅の立ち上がりの特性をより効果的に処理し、推定処理の高速化を図った。

2019 年 1 月より、東日本太平洋沖に整備されている S-net の地震観測情報が追加導入され⁵⁻²⁹⁾、⁵⁻³⁶⁾、これまでは房総沖観測網 (S1) のみであったが、それ以北の S2～S5 が追加された (図 5.22)。

2024 年には早期検知地震計 (計 135 台) のシステム改良が行われる⁵⁻²⁹⁾。P 波検知後の推定式を改善し、より早く実際のマグニチュードに近い値が推定できるようになった (図 5.23)⁵⁻²⁹⁾。

この東日本旅客鉄道株式会社 (JR 東日本) が構築した新幹線早期地震検知システム (図 5.24) は、2011 年の東北地方太平洋沖地震時に走行中の新幹線を安全に停止させるなど、高速で走行する新幹線の安全性向上に寄与し、社会的貢献度が高い技術であることから、2012 年 (平成 23 年度) に公益社団法人土木学会の土木学会賞技術開発賞を受賞している⁵⁻³⁷⁾。

なお、JR 東日本の 2025 年 9 月のプレスリリー



図 5.22 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) と早期検知地震計の配置⁵⁻³⁶⁾
(2019 年 1 月時点の新幹線早期地震検知システム)
(掲載許諾)

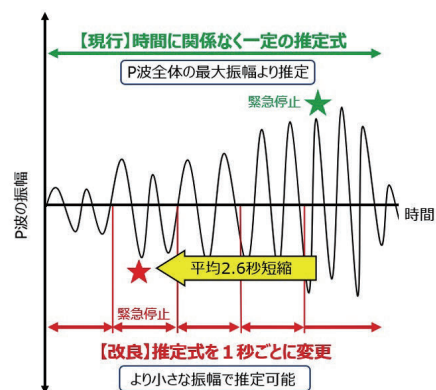


図 5.23 P 波による M 推定方法の見直し⁵⁻²⁹⁾ (掲載許諾)



図 5.24 新幹線早期地震警報システム⁵⁻³⁷⁾
(公益社団法人土木学会のウェブサイトで紹介されているシステムイメージ写真) (掲載許諾)

ス⁵⁻³⁸⁾では、新幹線早期地震検知システムで導入されている S-net の海底地震計情報を在来線早期地震警報システムにも導入すること、また東京ガスネットワーク株式会社が整備した超高密度リアルタイム地震防災システム (SUPREME, 2.6.3 (3) 参照) を活用することで、より細かく地震の揺れを把握し列車運行の判断を行う検討を進めることが発表された。

5.3.2 早期地震警報システムの動作例

(1) 2004 年新潟県中越地震 (M 6.8)

2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分に発生した新潟県中越地震は、内陸直下地震が引き起こした甚大な被害のほか、新幹線が開業以来初めて脱線する (図 5.25) という大きな衝撃を世間にもたらした地震でもあった。なお、この地震は、新幹線に早期地震警報システムが整備されてから、2001 年芸予地震 (山陽新幹線)、2003 年宮城県沖の地震 (東北新幹線) に続いて 3 例目の新幹線構造物に被害を及ぼした地震であった⁵⁻³⁹⁾。但し、芸予地震および宮城県沖の地震とも、高架橋等での損傷はあったが、幸いにも脱線に至ることはなかった。

新潟県中越地震では、新幹線への種々の地震対策により、負傷者を出す事無く列車が停止している。その主な対策が早期地震警報システムである。この時、上越新幹線に設置されたコンパクトユレダスは、震央地域で P 波検知後 1 秒で警報を出力し、震央域の全列車を緊急停止させた⁵⁻³⁹⁾。脱線した列車 (とき 325 号) に対しては、警報出力から大きな地震動が到達するまで 3 秒弱しかなかったが、地震により被災しているかも知れない区間を走行せずにすみ、対向列車が突入する危険性も大きく低減させた。

この時の新幹線やコンパクトユレダスが設置されていた施設、震央の位置関係は図 5.26 に示す通りである。



図 5.25 地震により脱線した新幹線 (とき 325 号)⁵⁻⁴⁰⁾
「鉄道事故調査報告書 I 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故」(航空・鉄道事故調査委員会) (<https://jtsb.mlit.go.jp/railway/rep-acc/RA2007-8-1.pdf> の P.38 を一部トリミング)

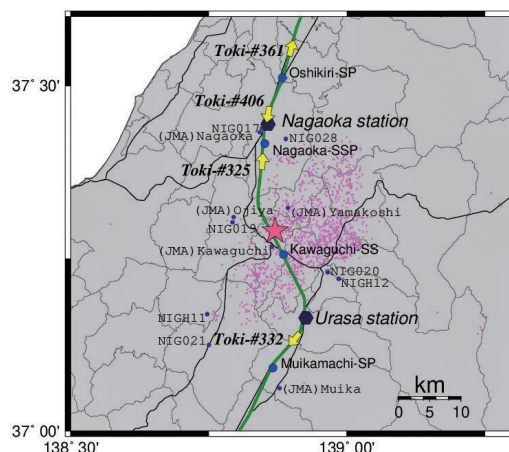


図 5.26 地震発生当時の新幹線や鉄道施設、震央の位置 (筆者作成)

早期地震警報が出力された区間 (新川口変電所 (地図内の表記: Kawaguchi-SS) と新長岡補助き電区分所 (地図内の表記: Nagaoka-SSP) が担当するエリア) を走行していた列車は 4 本であった。そのうち脱線した新幹線「とき 325 号 (地図内の表記: Toki-#325)」は、震央北の滝谷トンネル出口付近を約 200 km/h⁵⁻⁴⁰⁾ で走行していた。

この地震の震源域での強震観測によると、最大の地震動は、防災科学研究所強震観測網 K-NET 小千谷 (地図内の表記: NIG019) で 1,167 Gal (JR の警報地震計相当値)、新幹線沿線の被害区間においては、震源に最も近い新川口変電所で 846 Gal、次に近い新長岡補助き電区分所で 434 Gal が観測されている⁵⁻³⁹⁾。

当時の上越新幹線の沿線地震計 (コンパクトユレダス) は、沿線の変電所等に約 20 km 間隔で配置されていた。その地震計では、早期地震警報となる「P 波警報」は、初期微動を検知し、その揺れがその後 120 Gal 以上と予測された場合に発令され、実際の揺れの大きさが計測された場合に出力されるようになっていた。それぞれの警報が発信されると、0.1 秒後には周辺の約 40 km の区間において「き電」が停止し、運転士の操作がなくても非常ブレーキが作動し、列車を停止させる仕組みとなっていた⁵⁻⁴⁰⁾。

新川口変電所および新長岡補助き電区分所に設置されたコンパクトユレダスは、いずれも P 波検知後 1 秒で警報を出力している。実際の出力時刻は表 5.2 の通り。新川口変電所においては、P 波警報と S 波警報はほぼ同時であった。但し、実際に 40 Gal が観測される前に 120 Gal が推定され警報が出力されたこと、また、被害を発生させるような大きな揺れの前 (例えば、120 Gal が実際に発生する前) に、数秒でも事前に

P波警報が出力されたことは、可能な限り早期に列車を制御する目的で整備された早期警報システムが有効に機能したことを示している。

図 5.27 に、震源域で観測された地震波形を例示する。震源直上の川口町(地図内の表記: (JMA) Kawaguchi) の波形を見ると、大きく揺れ始めるのは P 波検知後、2 秒以上過ぎてからである。また、滝谷トンネル出口とはほぼ同じ震央距離と思われる小千谷観測点では、P 波の到達から大きく揺れ出すまで 3 秒程度あった。脱線した新幹線上でも、小千谷観測点と同様な揺れが発生したと想定すると、P 波検知後 1 秒後に 120 Gal 発生を予測した P 波警報を発令後、主要動の大きな揺れまで 2～3 秒程度の余裕時間を確保している⁵⁻³⁹⁾。

コンパクトユレダスでの地震警報後、大きな揺れに

表 5.2 コンパクトユレダスが警報を出した時刻
(文献⁵⁻⁴⁰⁾を基に筆者作成)

	新川口変電所	新長岡 補助き電区分所
P 波警報 (120 Gal 予測)	17 時 56 分 03 秒 1	17 時 56 分 04 秒 2
S 波警報 (40 Gal 計測)	17 時 56 分 03 秒 3	17 時 56 分 05 秒 9

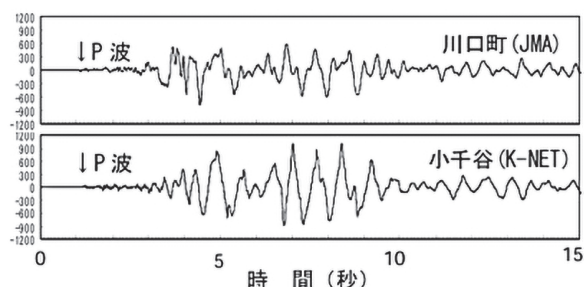


図 5.27 川口町(気象庁)および
小千谷(防災科研)観測点で観測された
東西成分加速度波形⁵⁻³⁹⁾(掲載許諾)

見舞われるまで僅かな時間しかなかったが、鉄道施設が地震により被災していることも考えられる区間に早期に緊急停止の警報を発信できたことは、結果的に脱線したものの負傷者がいなかったことを踏まえるとその効果は大きかったと考えられる。また、脱線した列車以外にも、その周辺の全ての新幹線も停止させたことは、列車同士の衝突等の二次的な被害を防ぐことにもなった。

(2) 2011 年東北地方太平洋沖地震 [東日本大震災] (M 9.0)

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震(表 5.3)は、広域に渡り強い揺れが観測され、特に東北地方から関東地方の太平洋沿岸では大きな津波に襲われた(図 5.28)。加えて、原子力発電所の事故も発生し、未曾有の複合的な大災害となった。これを受けて日本政府は、この地震による震災の名称を「東日本大震災」とした。

三陸沖を震源とした M_w 9.0 の巨大地震は、日本において観測史上最大の規模であり、世界においても 1900 年以降、4 番目の大きさであった。図 5.29 のリアルタイム震度(RI)の分布のように、各地の震度は宮城県北部の栗原市で最大震度 7 が観測されたのをはじめとして、宮城県や福島県、茨城県、栃木県などで震度 6 強、北海道から九州地方にかけて震度 6 弱から震度 1 が観測された。

表 5.3 東北地方太平洋沖地震の地震諸元(気象庁)

発生日	2011 年 3 月 11 日
発生時間	14:46:18.1
場所	北緯 38.1035°, 東経 142.8610°
深さ	24 km
M_w	9.0



図 5.28 東北地方太平洋沖地震時の津波被害(2011 年 4 月 14 日、宮城県名取市)
(筆者撮影)

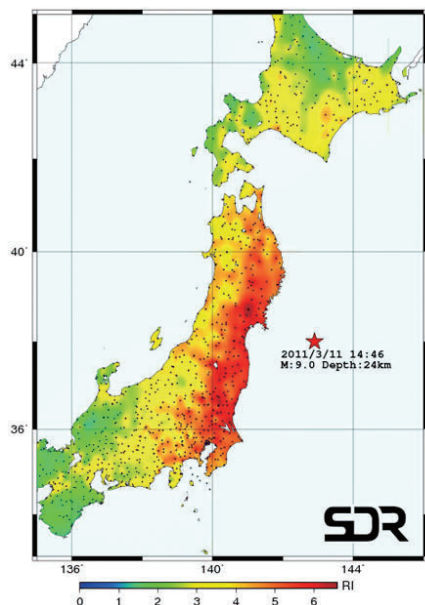


図 5.29 東北地方太平洋沖地震時の震度の分布 (SDR 社提供)

この時、東北新幹線に設置された早期地震警報システムは、震源に最も近い金華山検知点(震源距離：約 130 km)で計測された情報で 27 本の列車を制御している。そのうち、19 本が走行中で、約 270 km/h で走行していた列車もあった⁵⁻⁴¹⁾。

当時の早期検知地震計の配置を図 5.30 に示す。これらの地震計には、B-Δ 法による地震諸元の推定結果と図 5.31 に示す被害エリアの関係に基づいて警報を発令する P 波警報機能と、実際に計測された加速

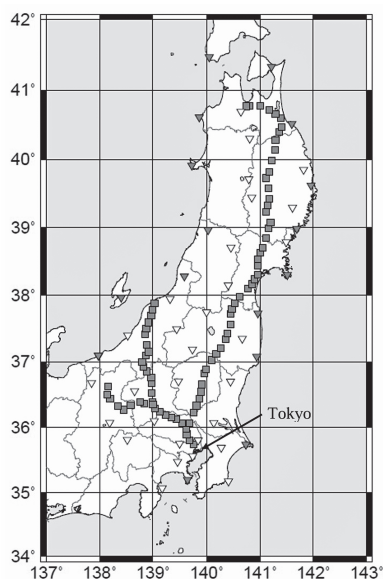


図 5.30 2013 年時点の新幹線早期地震検知システムの早期検知地震計の配置⁵⁻⁴¹⁾
 ■：沿線地震計 ▼：海岸線地震計
 △：2011 年以降に設置された地震計 (掲載許諾)

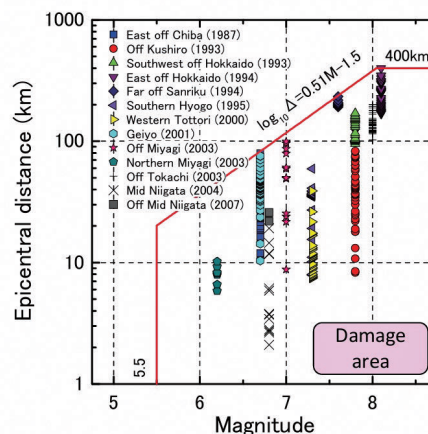


図 5.31 マグニチュードと震央距離、被害エリアの関係⁵⁻⁴¹⁾ (掲載許諾)

表 5.4 地震発生時の金華山検知点の動作履歴など (文献⁵⁻⁴¹⁾を基に筆者作成)

時刻	事象
14:46:18.1	地震発生
14:46:38.9	金華山検知点：早期検知地震計による P 波検知
14:46:40.0	金華山検知点：1 次推定 (推定 M5.5)、地震警報無し
14:46:41.0	金華山検知点：2 次推定 (推定 M5.8)、地震警報無し
14:46:43.0	金華山検知点：3 次推定 (推定 M6.1)、地震警報無し
14:46:48.0	金華山検知点：4 次推定 (推定 M6.9)、地震警報無し
14:47:02.9	金華山検知点：S 波警報 (120 Gal 超過)、白石蔵王駅～北上駅に対して警報出力

度が 120 Gal (海岸線検知点の場合) を超過した場合に警報を発令する S 波警報機能が備わっていた。なお、図 5.31 のマグニチュードと震央距離、被害エリアの関係は、図 4.6 で示した M-Δ 図を改良したものである。

Yamamoto らの文献⁵⁻⁴¹⁾より、金華山地震計の地震発生時の動作状況を表 5.4 にまとめた。14:46:18.1 に発生した地震は、20.8 秒後の 14:46:38.9 に金華山検知点の早期検知地震計で P 波検知され、その 1.1 秒後の 14:46:40.0 に 1 次推定が行われている。この推定では地震の規模が M 5.5、震央も遠方と推定され、P 波警報発令には至らなかった。その後も 4 次推定まで行われたが、いずれも P 波警報発令となる条件を満たさなかった。P 波検知から 14 秒後の 14:47:2.9 に同地震計にて設定値 120 Gal を超過し、S 波警報が白石蔵王駅から北上駅間にかけて発令されている。最終的には東北新幹線全線 (東京駅から新青森駅まで) が停止した (図 5.32)⁵⁻⁴¹⁾。

JR 東日本では、新幹線の運転中止の基準値は SI 値で 18 kine 以上となっていた。金華山検知点で S 波警報が出力されてから、沿線の各早期検知地震計で

東京メトロでは、お客様への安全確保はもちろん、その地理的影響により、国鉄(JR)の早期地震警報システムの整備状況を踏まえ、古くから自社営業線のための早期地震警報システムを構築し、活用を行ってきた。また近年では、早期運転再開に向けた高密度の地震計システムも整備している。同社では、地震発生時は早期地震警報システムによる運行規制を行い、発生後は高密度地震計システム(東京メトロでの名称:エリア地震計)で可能な限り迅速な運転再開を目指す体制が整えられている。

また、自社整備の地震計システムの他にも気象庁の緊急地震速報も併せて整備し、早期地震計システムとしては、独自設置のものと公共機関が提供を行っているもので二重化をし、地震発生時の安全確保に努めている。

このような早期地震警報および高密度な地震観測網は他の鉄道事業者に先駆けて整備され、特に高密度に地震計を設置して早期の運用開始を目指す地震計システムは、その後の国内の他の地下鉄や多くの私鉄にも影響を与えた。

表5.5は、東京メトロにおける地震計システムの変遷をまとめたものである。

表 5.5 東京メトロにおける地震計システムの整備変遷

年	整備内容・出来事
～1978年 (昭和53年)	気象庁発表の震度階、または、震度階級表をもとに家屋の被害や体感等を参考に、運行の判断を行っていた。
1978年 (昭和53年)	地震計を3ヵ所に設置。加速度(Gal)で列車運行を制御。
1988年 (平成元年)	帝都高速度交通営団(現、東京メトロ)専用の地震計を3ヵ所に設置。加速度(Gal)で列車運行を制御。
1997年 (平成9年)	早期警報地震計「コンパクトユレダス」に改良し、地震計を6ヵ所に増設 ⁵⁻⁴³⁾ 。但し、コンパクトユレダスの早期警報機能は試験運用。
2000年 (平成12年)	コンパクトユレダスの早期地震警報機能を導入。P波検知後1秒でS波到来後の加速度を推定し、列車運行を制御。
2005年 (平成17年)	千葉県北西部の地震(M 6.0) →長時間にわたり運転支障が発生 ⁵⁻⁴³⁾ 。 →エリア地震計の整備(高密度地震計システム) 営業線内33ヵ所に地震計を設置 ⁵⁻⁴³⁾
2007年 (平成19年)	早期地震警報システム「フレックル」へ改良 ⁵⁻⁴⁴⁾ 。P波検知後1秒以内にS波到来後の加速度を推定し、列車運行を制御。 CS-ATC(車内信号方式自動列車制御装置)による全列車緊急停止を開始 ⁵⁻⁴⁵⁾ 。 緊急地震速報(気象庁)の運用開始 ⁵⁻⁴⁵⁾ 。
2011年 (平成23年)	東北地方太平洋沖地震(M 9.0)(東日本大震災発生) →首都圏の鉄道の中で、銀座線が最も早く運転を再開 ⁵⁻⁴⁶⁾
2012年 (平成24年)	エリア地震計を3ヵ所増設。計36ヵ所のエリア地震計となる ⁵⁻⁴⁷⁾ 、 ⁵⁻⁴⁸⁾ 。
2013年 (平成25年)	列車運行で使用する指標を加速度から震度(リアルタイム震度RI)へ変更 ⁵⁻⁴⁸⁾ 。

5.4.1 早期地震警報システムの導入

東京メトロの自社専用の地震計は、帝都高速度交通営団(営団地下鉄)時代の1988年に3ヵ所設置したのが始まりであった。その後1997年に、当時の東北・上越新幹線で使用されていた早期警報地震計コンパクトユレダスに改良されると同時に、地震計を新たに3ヵ所増設し、計6ヵ所で地震を計測できるシステムが整えられた⁵⁻⁴³⁾。それら地震計6ヵ所は、営業線を囲むように5ヵ所、営業線内の中央に1ヵ所に設置され、首都圏の周囲と直下いずれの地震に対しても、できるだけ早く地震動を検知できる配置が行われた(図5.36, 図5.37)。

全ての地震計の情報は運行を管理する総合指令所へ常時オンラインで伝送され、リアルタイムに地震動の大きさを把握できる体制がとられている。設定されたレベル以上の揺れが計測された場合は、全列車に対して自動的に列車無線で地震発生の警告、運行制御が行われている。

その後、2007年にコンパクトユレダスの後継機となる早期地震警報システム「フレックル」へ更新され、これまでP波検知後1秒でS波到達後の加速度を推定していたものを、1秒以内に推定できるシステムへ改良を行った(2025年時点では、最短0.1秒でS波到達後の震度を推定している)。これに合わせて、より迅速に列車制御を行うため、フレックルの計測情報をCS-ATC(車内信号方式自動列車制御装置)と連動させ、推定または実際の揺れが規定値を超過した際は、自動的に列車を停止させるシステムを構築している⁵⁻⁴⁴⁾。また同年には、気象庁で提供が始まった緊急地震速報も併せて整備⁵⁻⁴⁵⁾し、自社設置のものと公共機関が提供する早期地震警報システムを併用した地震監視体制が構築された。



図5.36 東京メトロのコンパクトユレダス(2005年当時)
(掲載許諾)

5.4.2 早期運転再開を目指した地震計システムの構築

新幹線のケースを皮切りに実用化された早期地震警報システムは、いかに早く的確に列車を制御（停止、減速）するかを目指したシステムであった。その後、列車停止後の運転再開に向け、早期に地震動を把握し、被災の可能性がある箇所や点検が必要な箇所をできるだけ効率良く抽出することを目指したシステムが構築されていった。現在の国内の主要な鉄道では、早期地震警報システムと早期運転再開を目指した地震計システムが一体となったシステムを活用しており、その中でも特に東京メトロは、私鉄や地下鉄各社の中でもその先駆者である。そこでここでは、その整備の経緯となった事例を紹介する。

2005年7月23日16時34分に発生した千葉県北西部の地震(M 6.0)は、東京都足立区で震度5強が観測されるなど、夕方の首都圏を大きく混乱させた。甚大な被害はなかったものの、多くの帰宅困難者をもたらした。

この時の首都圏の鉄道各社では、計測された値が規定値を超過し、長時間にわたり列車運行を停止させることとなった。東京メトロにおいても同様な事態となり、約4時間の運転支障を生じさせた。その原因として、6カ所の地震計の最大値が規定値を超え、全線において歩行点検による安全確認が行われたことにあった⁵⁻⁴³⁾。

この事例を踏まえて、東京メトロでは早期運転再開を目指す方策として、営業線を細分化してそれぞれの鉄道構造物の揺れを直接計測する地震計システムの検討をはじめた。このシステムにより、細分化したエリアごとの計測値に基づいて点検が必要なエリアを抽出し、合理的な運転規制を適用することが可能になった。具体的には、図5.37に示すように、営業線区間全体に約3kmの間隔で計33カ所に小型地震計(図5.38)を設置し、営業線における震動状況を即座に把握する地震計ネットワークを構築した⁵⁻⁴⁴⁾。

それら33カ所の地震計は全てオンライン化され、常に総合指令所に設けられたエリア地震計センタ装置と通信を行う。また、エリア地震計センタ装置は、地震が発生するとリアルタイムに小型地震計から送信される加速度やリアルタイム震度(RI)の情報はもちろん、その計測値に応じた地震警報レベルや点検範囲を表示する(図5.39)。これにより、地震終了時には、直ちに点検が必要な区間と運転再開できる区間が把握でき、点検が不要な箇所から順次運転を再開できるなど、地震発生後から運転再開までの効率化を図っている。

なお、この小型地震計から構成される地震計システム

は、営業線内の細分化されたエリアの地震動を把握する目的から、エリア地震計と称されている。

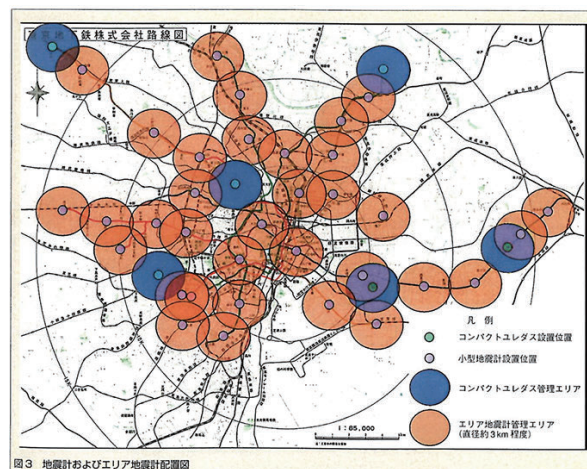


図 5.37 東京メトロの地震計配置図⁵⁻⁴⁴⁾ (2007年頃)
(掲載許諾)



図 5.38 東京メトロ内に設置された小型地震計⁵⁻⁴³⁾
(掲載許諾)

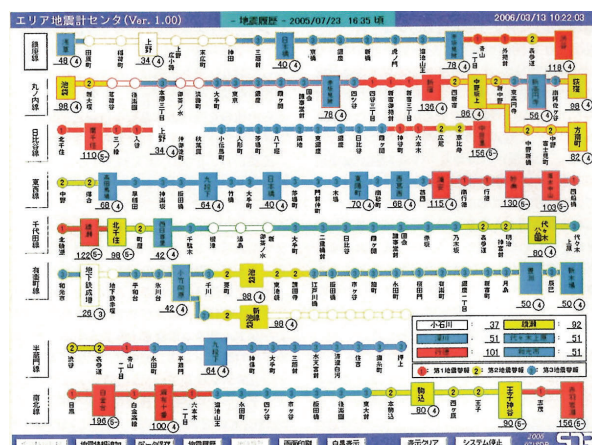


図 5.39 エリア地震計センタ装置の画面⁵⁻⁴⁴⁾
(地震発生時のイメージ画面、2007年頃)
(掲載許諾)

5.4.3 早期地震警報システムの動作例

東京メトロで最も大きな事象となった2011年の東北地方太平洋沖地震(M 9.0、東日本大震災)の時の動作例を紹介する。当時の地震発生から運転再開までの流れは、表5.6の通りであった⁵⁻⁴⁹⁾。

表 5.6 東北地方太平洋沖地震時の
東京メトロの地震発生から運転再開までの流れ
(文献⁵⁻⁴⁶⁾、⁵⁻⁴⁹⁾を基に筆者作成)

時刻	出来事・対応
2011年3月 11日(金) 14:46	地震発生
14:47	早期地震警報(緊急地震速報)により、「緊急停止」指令が発信され、乗務員の操作により全列車緊急停止 ※首都圏に地震の揺れが到達前に全列車停止
14:48	自社の地震計が規定値以上の揺れを検知。全列車に停止信号(列車を自動停止)
14:55	本社に対策本部設置
15:00	駅間停止列車の移動を開始 駅のお客様の安全確保
15:36	駅間停止列車の移動が完了
16:00	緊急設備点検開始
20:40	銀座線全線で運転再開 ※首都圏の鉄道で最も早く運転が再開された半蔵門線で一部区間運転再開
21:20	南北線一部区間で運転再開
22:15	有楽町線一部区間で運転再開
22:35	千代田線一部区間で運転再開
23:00	丸ノ内線全線で運転再開
23:08	東西線一部区間で運転再開
23:32	日比谷線・副都心線一部区間で運転再開

14時46分に三陸沖で地震が発生すると、その1分後に東京メトロの早期地震警報装置(緊急地震速報)において揺れの推定値が規定値超過となり「緊急停止」

指令を発信、乗務員の操作による全列車緊急停止が行われた。この「緊急停止」指令は、首都圏に地震の揺れが到達する前の段階であった。

その後、14時48分以降、地震波の到達とともに自社地震計での規定値超過による自動停止信号発令、対策本部の設置、お客様の安全確保、緊急の設備点検が開始されていった。

この中でも16時より開始された緊急設備点検は、エリア地震計の計測値に基づいて、トンネルや高架橋、橋梁、地上の建物で進められた⁵⁻⁴⁹⁾。その結果を踏まえ、運行に支障がないことが確認できた路線から、順次運転の再開が行われた。

東京メトロの営業線で最も早く運転再開が行われた路線は、20時40分に再開された銀座線であった⁵⁻⁴⁹⁾。国土交通省で取りまとめられた報告書⁵⁻⁴⁶⁾によると、この再開時間は、首都圏の鉄道路線の中で最も早期に運転が再開された時間であった。

この地震では、東京メトロにおける二つの地震計システムが有効に機能した。地震発生と共に出来るだけ早く列車を制御することを目的とした早期地震警報システムは、震源が遠方であったこともあり、揺れの到達前に列車を緊急停止させる等、安全な体制に移行することができた。また、早期運転再開を目指したエリア地震計は、計測値に応じて点検の効率化が図られ、迅速な運行再開に生かされた。これらが奏功して、首都圏の鉄道の中で最も早い運転再開となった。

5.4.4 2025年時点の東京メトロの地震計システム

2011年の東日本大震災を踏まえ、東京メトロではより詳細かつ的確に営業線内の振動状況を把握するた

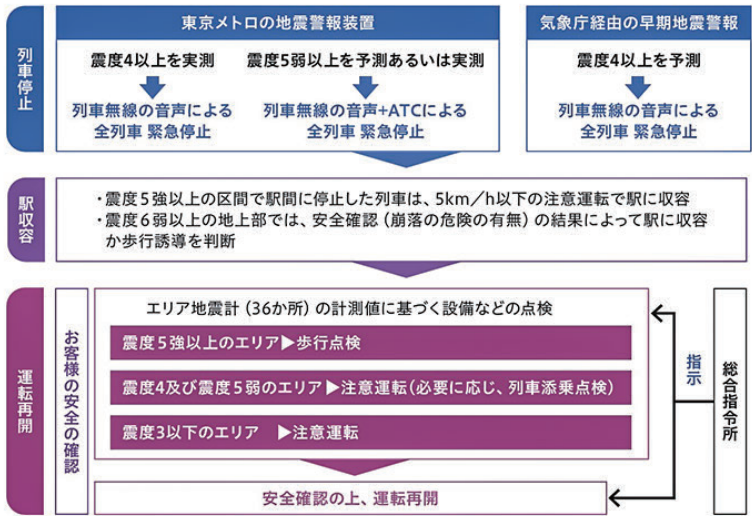


図 5.40 東京メトロの震災対策(地震発生時のプロセス)⁵⁻⁵⁰⁾
(掲載許諾)

めに地震計を増設している。また、列車運行で使用する指標も加速度から震度へ変更している。

2025 年現在、東京メトロの震災対策は図 5.40 の通りである⁵⁻⁵⁰⁾。迅速な列車停止に利用される二つの早期地震警報システムと、運転再開に利用されるエリア地震計を用いた震災への対策は、一地域で営業を行う鉄道の中でも、冗長化および高密度化いずれの面においても地震防災に対する高度なシステムとなっている。

5.5 Osaka Metro の早期地震警報システム

5.5.1 早期地震警報システムの導入

大阪市高速電気軌道株式会社 (Osaka Metro) は、大阪市交通局の民営化により、2018 年に発足した鉄道事業者である。大阪市内に地下鉄 8 路線とニュートラム 1 路線、営業キロ 141 km、134 駅を運営している (2025 年 1 月 19 日時点)⁵⁻⁵¹⁾。

大阪市交通局時代の 2014 年から 2015 年にかけ、地震発生時のより迅速な運転判断と、地震後の点検区間を的確に判断することを目的とした地震計システムが構築された⁵⁻⁵²⁾。この地震計システムは、図 5.41 に示すように、運転の判断を行う基本地震計として早期地震警報システム フレックル 3 台、地震時の点検レベルを判断するエリア地震計としてフレックルの他に小型地震計 5 台の計 8 台の地震計と、全地震計の情報を集約・表示する装置から構成されている⁵⁻⁵³⁾。また、同社では緊急地震速報も活用し、自社システムと外部情報それぞれの早期地震警報システムを利用し、地震に対する早期警報の多重化が図られている。地震発生時は、3 段階に分けられた警報レベルに応じて列車無線で乗務員に地震の発生を知らせ、速やかに緊急停止等の運転処置が実施される⁵⁻⁵⁴⁾。

Osaka Metro が自社整備した地震計システムでは、

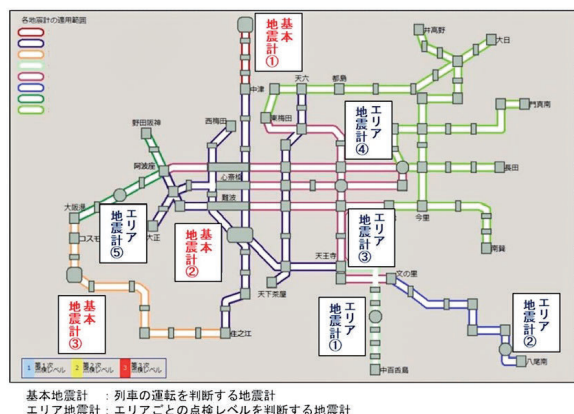


図 5.41 Osaka Metro の地震計システム (2019 年時点)⁵⁻⁵³⁾

大きな地震が発生すると直ちに早期地震警報システムが地震を検知・警報出力し、列車の運行を制御する。その後、全 8 台の地震計の情報に基づいて点検箇所や点検レベルを表示する。つまり、「警報出力」と「情報収集」が一つのシステムで完結し、迅速な運転制御と的確な震動把握が効率良く確認できるシステムとなっており、地震発生をいち早く検知・判断して警報発令し、早期運転再開を目指した地震計システムの運用が行われている。

5.5.2 早期地震警報システムの動作例

2018 年 6 月 18 日、午前 7 時 58 分に発生した大阪府北部の地震 (M 6.1) は、大阪府高槻市を震源とする大都市圏で発生した直下地震であった。各地の震度は、大阪市北区、高槻市、枚方市、茨木市、箕面市の 5 市区で震度 6 弱、京都府京都市など 18 の市区町村で震度 5 強が観測され、近畿地方を中心に関東から九州までの広い地域で揺れが観測された。その時の震度分布を図 5.42 に示す。

この地震による被害は主に震源の南西で発生し、住宅の全壊や半壊、上下水道の被害、ブロック塀の倒壊などがあったほか、大阪府やその周辺の府県ではエレベーターの閉じ込めが多数発生した。また朝の通勤通学の時間帯であったため、多くの交通機関が運転見合わせになり、大都市圏特有の混乱も生じた。Osaka Metro においても、地震発生直後から全線で運転見合わせとなり、御堂筋線では第三軌条が落下する被害もあった⁵⁻⁵⁵⁾。

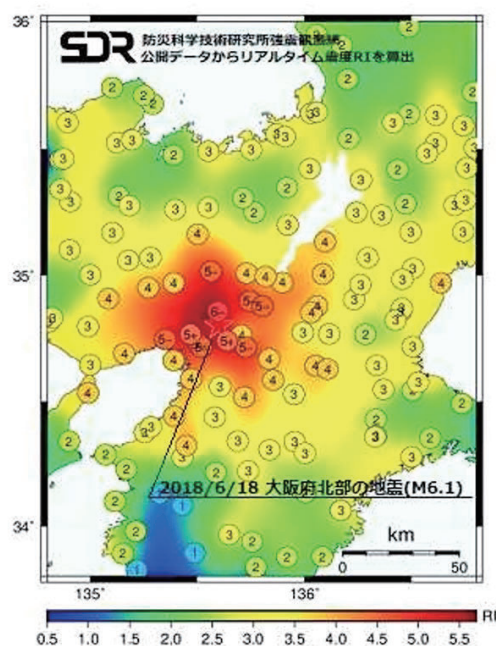
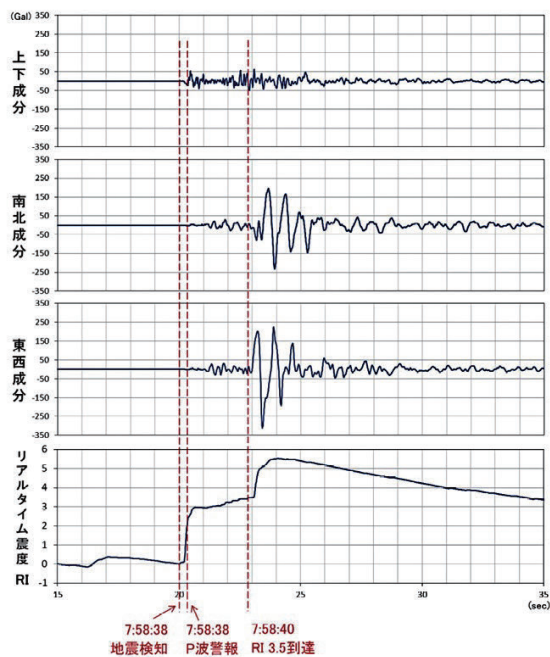


図 5.42 大阪府北部の地震時の震度分布⁵⁻⁵³⁾
(SDR 社提供)

表 5.7 大阪府北部地震時の Oaka Metro 地震計システムの動作状況 ⁵⁻⁵³⁾

	基本地震計 ①	基本地震計 ②	基本地震計 ③	エリア地震計 ①	エリア地震計 ②	エリア地震計 ③	エリア地震計 ④	エリア地震計 ⑤
震央距離(km)	15	24	30	28	27	21	20	24
リアルタイム震度RI	5.5	4.2	4.3	3.2	3.1	4.0	4.1	4.9
5HzPGA(Gal)	329	81	121	33	31	70	145	215
地震検知時刻	7:58:38	7:58:40	7:58:41	7:58:41	7:58:41	7:58:39	7:58:38	7:58:40
P波警報時刻	7:58:38	7:58:39	7:58:41	-	-	-	-	-
第1次点検レベル 到達時刻	7:58:40	7:58:43	7:58:46	-	-	7:58:42	7:58:42	7:58:44
第2次点検レベル 到達時刻	7:58:41	-	-	-	-	-	-	7:59:45
第3次点検レベル 到達時刻	7:58:41	-	-	-	-	-	-	-

計測
レベル
が設定
値に
応じた
点検レ
ベル

図 5.43 基本地震計①の計測波形と震度の変化 ⁵⁻⁵³⁾

この地震の際の Osaka Metro 地震計システムの動作は、表 5.7 の通りであった。7:58:38 に震央に最も近い基本地震計①(震央距離 15 km)が地震を検知し、ほぼ同時に震度 5 弱以上を推定して直ちに P 波警報を出力した。その後、基本地震計②(震央距離 24 km)が 7:58:40 に地震検知し、7:58:39 に P 波警報(地震検知と P 波警報の時刻が逆になっているが、警報の処理を優先させる仕様であったため、そのような時刻となっている。実際には、7:58:39 に地震検知と P 波警報が行われている)、基本地震計③(震央距離 30 km)が 7:58:41 に検知、同時に P 波警報を発信した。この地震は、比較的浅い場所で発生したことから震源と各地震計との距離が近く、P 波到達から S 波到来までの間隔が短かった。図 5.43 は、基本地震計①の計測波形とリアルタイム震度 RI の変化である。図 5.43 および表 5.7 より、基本地震計①では、

7:58:38 の検知後、急激に震度が増加し、2 秒後の 7:58:40 には震度 4 相当を示す RI 3.5 まで大きくなった。その 1 秒後には、震度 5 強相当の RI 4.5 にまで達している。また、図 5.43 の計測波形を見ると、地震検知後から S 波がもたらす大きな揺れ(RI 3.5)まで 2 秒程度しかなかった。人間の感覚とすれば、「揺れを感じた瞬間に大きな揺れに襲われた」と感じるような時間しかなく、何らかの行動に移すには難しい短い時間ではあったが、早期地震警報システムである基本地震計は検知後すぐに大きな揺れになることを判断し警報出力を行っている。

地震警報後は、地震検知から 8 秒後の 7:58:46 には全地震計で点検レベルが確定した震動に達しており、揺れが収まる前に営業線内の点検が必要な区間を抽出し、運行再開に向けて必要な情報を提供した。

以上をまとめると、大阪府北部の地震における Osaka Metro の地震計システムは、大きく揺れだす 2 秒前に自社整備の早期地震警報システムで地震警報を発令し、最初の地震検知から 8 秒後には全営業線内の点検レベルが確定して情報提供を行った。地震発生時の迅速な運転判断と的確な震動把握を目的とした同システムは、地震に対する早期警報はもちろん、その後の対応を迅速に行うための情報の提供に貢献したことが示された。

5.6 球場に設置された早期地震警報システム

5.6.1 楽天野球団の早期地震警報システム

プロ野球チーム「東北楽天ゴールデンイーグルス」の運営をする株式会社楽天野球団(宮城県仙台市)は、2011 年の東日本大震災の被災地に位置する。3 月 11 日に発生した本震では球場近くの気象台で震度 6 弱が観測され、球場自体にも大きな被害が発生した。

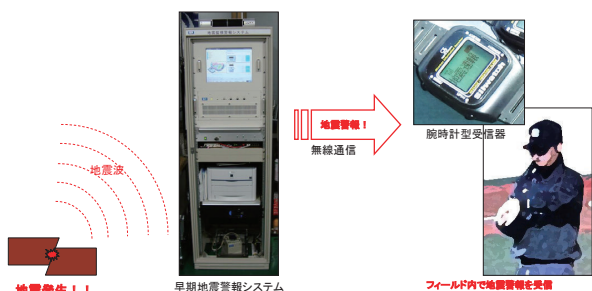


図 5.44 楽天野球団で導入された早期地震警報システム (筆者作成)



図 5.45 2011 年 4 月 29 日、ホーム開幕戦 (筆者撮影)

この震災を受け、当初 3 月下旬に予定されていたプロ野球公式戦の開幕が延期となり、楽天イーグルスのホーム開幕戦は 4 月 29 日になった。

地震発生後から開幕までの約 1 ヶ月半の間、球場の復旧工事と併せて、早期に地震動の危険性を把握する早期地震警報システムの導入も進められた。同社で構築した早期地震警報システムのイメージを図 5.44 に示す。

同社のシステムは、球場内に設置された早期地震警報システム (球団説明名称: 専用の高感度地震計⁵⁻⁵⁶⁾) が地震を検知すると、直ちに震度を推定または実際の震度を算出し、それら値が規定値を超過した場合、フィールド内の審判が装着する腕時計型端末へ自動的に地震発生の通知をする。その後、それを見た審判らは試合の進行を停止し、状況に合わせた対応を行う。また施設を管理する球団では、揺れの大きさに応じて球場内ビジョンでの表示やアナウンス、避難誘導などを行う。

このシステムは、ご利用されるお客様に対してできるだけ速やかな情報提供と安全の確保をするための地震防災システムとして、東日本大震災後の 2011 年 4 月 29 日のホーム開幕戦 (図 5.45) から活用されている。(2025 年 9 月時点の情報)

5.6.2 札幌ドームの早期地震警報システムと動作例

北海道札幌市に、1 年を通して天候に影響を受けない大規模イベント施設として建設された札幌ドーム (株式会社札幌ドーム) においても、早期地震警報シ

ステムが活用された。図 5.46 は、当時の大規模地震時の対応体制を示したものである。

2012 年～2023 年に運用された早期地震警報システム (図 5.47) は、独自に設置された地震計と緊急地震速報から構成され、楽天野球団同様に、計測値が条件を超過すると無線端末 (図 5.48、プロ野球開催の際は審判が携帯) へ地震警報の伝達も行われた。

この早期地震警報システムは、2018 年 9 月 6 日深夜に発生した平成 30 年北海道胆振東部地震 (M 6.7)

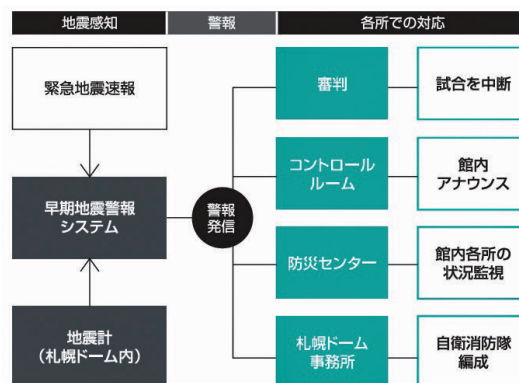


図 5.46 札幌ドームの大規模地震時の対応体制 (イメージ図)⁵⁻⁵⁷⁾ (掲載許諾)



図 5.47 札幌ドームの早期地震警報システム (筆者撮影)



図 5.48 携帯型無線端末 (筆者撮影)

2018年9月6日 北海道胆振東部地震 (M6.7)

札幌ドームまでの震央距離: 61km

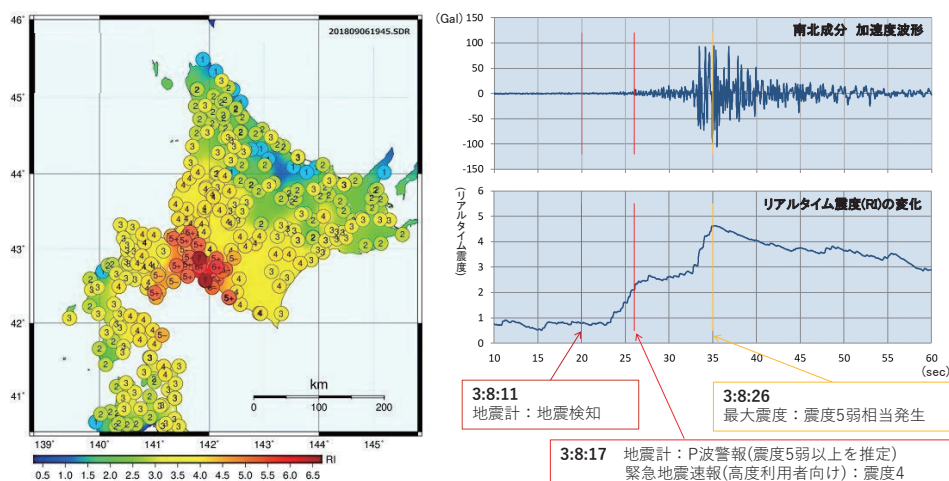


図 5.49 北海道胆振東部地震時の早期地震警報システムの動作 (筆者作成)

の際にも大きな揺れの到達前に地震警報を発令するなど、その効果を実証する貴重な記録が得られている。図 5.49 はその時の動作をまとめたものである。

9 月 6 日 3 時 7 分 59 秒に札幌ドームから約 60 km 遠方で発生した地震は、その 12 秒後の 3:8:11 に札幌ドーム内に設置された早期地震警報システムの地震計で検知された。6 秒後の 3:8:17 には検知された P 波により推定震度 5 弱以上の警報が発令され、同時に高度利用者向けの緊急地震速報を受信している。実際に震度 5 弱相当の揺れが計測されたのは、P 波警報から 9 秒後の 3:8:26 であった。

不特定多数が利用する大規模施設において、事象発生直後の混乱を抑制し、利用者の安全を確保するためには情報の提供が最優先となる。この地震では、大きな震動が予測されてから実際に到来するまでわずかな時間 (9 秒) しかなかった。しかし、これは被災を避け

る／軽減させるために貴重な時間である。迅速な状況把握からの素早い対応、特に図 5.46 に示されたような各所での対応に向けた体制づくりが、利用者の身を守るための有効な手段となる。この地震の際の早期地震警報システムの動作は、地震後の初動対応を的確に促すために有効に働いたことを示している。

5.7 半導体工場に設置された早期地震警報システム

日本の半導体メーカーである株式会社ジャパンセミコンダクター大分事業所 (図 5.50) では、前身の株式会社東芝大分工場時代の 2012 年に、工場敷地内に早期地震警報機能を持った地震計と緊急地震速報受信機を設置し、独自の早期地震警報システムを構築した。

同社の早期地震警報システムは、気象庁から配信さ



図 5.50 株式会社ジャパンセミコンダクター大分事業所 (株式会社ジャパンセミコンダクター大分事業所提供)

れる緊急地震速報と工場敷地内に設置された複数の地震計の情報を統合し地震警報を出力している。例えば鉄道では、できるだけ早期に制御を行う目的から、緊急地震速報または独自設置の地震計いずれかが規定値を超えると判断された場合に直ちに制御を行うことが多い。

一方、同社で構築した早期地震警報システムは、図 5.51 に示すように緊急地震速報と自社設置の地震計両方の地震情報が規定値を超えると判断された場合に地震警報を出力する。つまり外部情報（緊急地震速報）と自社情報（工場敷地内の地震計）を統合することで、誤警報の抑止を目的としたシステム作りが行われている。

このシステムで地震警報が発令されると、製造装置の停止等の他に、避難を促す構内放送が自動的に行われる。設備被害への軽減以外にも、従業員の安全確保を目指した運用が続けられている（2025 年 9 月時点）。

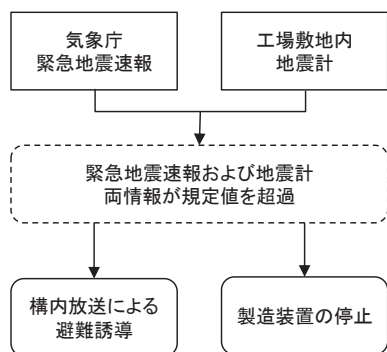


図 5.51 システム構成イメージ (筆者作成)

5.8 可搬型の早期地震警報システム

2006 年（平成 18 年）に総務省消防庁の省令に規定されて以降、日本各地の消防や警察などで導入が進められ

た持ち運びができる早期地震警報システムは、2025 年時点で、200 を超える消防・警察・自衛隊に配備されている。この可搬型早期地震警報システムは、平常時は救助訓練等で使用され、またメンテナンスを行いながら緊急時の利用に向け整備が行われている。

本来ならば実際に使用されないことが望ましいところではあるが、地震が多々発生する日本では、それを活用する機会が度々訪れる。例えば、図 5.52 は令和 6 年能登半島地震（M 7.6）時の被災現場での使用例である。土砂崩落の恐れがある場所において、隊員の二次被害を防止するために設置し救護活動が行われた。また、2008 年に中国の四川で発生した地震（M_w 7.9）においても、日本の国際緊急援助隊が建物の多くが被災した地域での救助活動時に、余震による崩壊から退避させるための警報機として利用された⁵⁻⁵⁸⁾。

5.9 海外の事例

医学博士クーパーによる最初のアイデアから 100 年以上を経て初めて日本で実用化された早期地震警報システムであるが、その事例に触発され、特に巨大地震に見舞われる可能性が高い国々で実用化に向けた研究開発が始まった。例えば、1985 年のメキシコ地震の際には震源から約 350 km 離れた首都メキシコシティにも甚大な被害が生じたが、地震動が到達したのは地震発生後 1 分以上経ってからだったこともあり、メキシコ合衆国でも比較的早い段階から研究が始まっている。他の国々でも前線検知型の早期地震警報システムから検討が始まり、その後、徐々に P 波検知やマグニチュードの推定、さらには地震の様々な情報の表示



図 5.52 令和 6 年能登半島地震時の早期地震警報システムの使用風景 (東京消防庁提供)

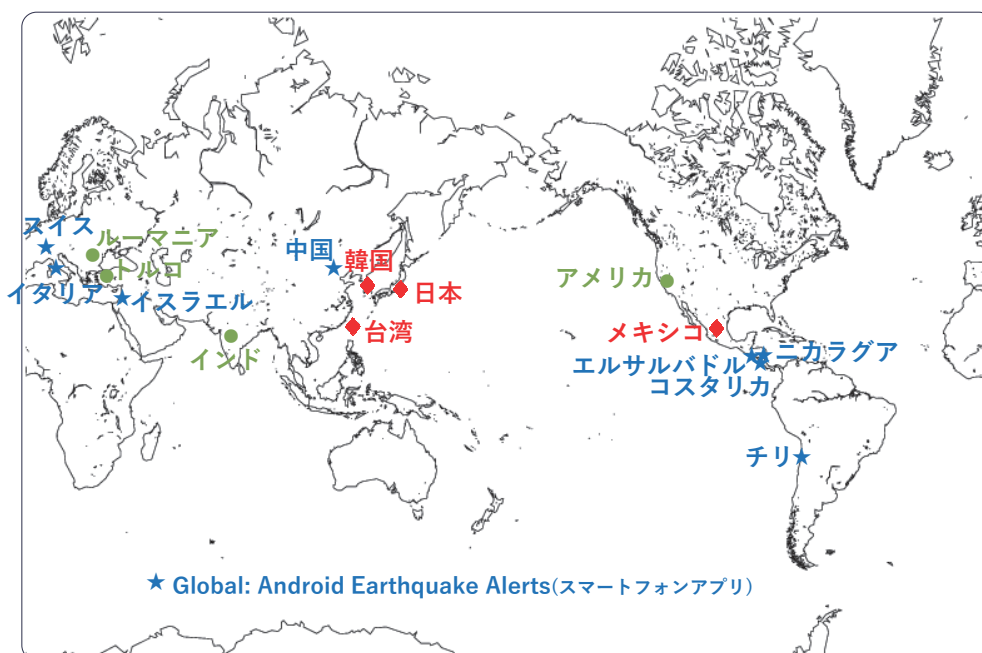


図 5.53 早期地震警報システムを構築した国々 (2018 年時点)
 ◆：公共向け ●：限られたユーザー向け ★：テスト運用
 (文献 5-59) を基に筆者作成)

方法や伝達方法など、それぞれの国に適した早期地震警報システムが研究開発され、まだ一部の国や地域ではあるが、実際に警報を発令するシステムが実用化されている。図 5.53 に、早期地震警報システムを構築した国々を示す (2018 年時点)。

ここでは代表的なシステムについて、それぞれの地域の特性や警報発令方法などを含めていくつか紹介していく。

5.9.1 カリフォルニア州の早期地震警報システム

アメリカ合衆国カリフォルニア州は、太平洋プレートと北アメリカプレートの境界に位置する地震多発地域であり、過去には 1906 年のサンフランシスコ地震 (M 7.8) や 1989 年のロムプリエタ地震 (M 7.1) などによる地震災害を経験してきた。こうした背景のもと、同州では早くから地震発生直後に地震動の強さや震源を推定し、被害軽減に役立てる早期地震警報システムの開発を続けてきた。その発展は段階的に進み、複数の観測ネットワークや技術システムが連携しながら、今日の ShakeAlert という早期地震警報システム (EEW, Earthquake Early Warning System) へと進化している⁵⁻⁶⁰⁾。

最初に始まったのは、1991 年にプロジェクトが始動した CUBE (Caltech/USGS Broadcast of Earthquakes) という、カリフォルニア工科大学 (Caltech, California Institute of Technology) と米国地質調査所 (USGS)

が共同で構築した初期の速報型地震情報配信システムである^{5-61), 5-62)}。

南カリフォルニアには、1988 年から整備された TERRA scope という約 250 箇所の高感度の広帯域地震計とデジタルデータロガーが設置された観測点により構成される地震観測網が存在していた。CUBE はこの高精度の地震波形をパサディナの Caltech の地震研究所に集約し、自動で震源とマグニチュードを決定して関係機関に伝達する仕組みであった。情報は専用回線でポケットベル (pager) 会社へ送られ、ポケットベルを通してパソコンやワークステーションに表示される。CUBE が稼働する前にも、地震が発生すると Caltech の地震研究所にはメディアから問い合わせが多かったが、波形を回収しそれを解析してからでないと地震情報を伝えることができなかった。それが、この CUBE が稼働することにより、すでに日本では実用化されていたユレダスのようにほぼリアルタイムではないものの、地震発生から情報配信までに約 2～3 分と、当時としては画期的な即時性を実現した。

また、CUBE にはマスコミ向けの Media CUBE もあり、マグニチュード 5 未満の地震は 2～3 分で自動配信し、大きな地震は Caltech の研究者による確認後 15 分以内に配信される運用が行われていた。このように、CUBE は速報型システムとしては先駆的であったが、実際の早期警報のように地震動到達前に警告する機能はまだ備えていなかった。

一方、北カリフォルニアでは、CUBE と同時期にカリフォルニア大学バークレー校 (UCB, University of California, Berkeley) が中心となって早期地震情報システム REDI (Rapid Earthquake Data Integration) の構築が始められ、1993 年に稼働した⁵⁻⁶³⁾。REDI は BDSN (Berkeley Digital Seismic Network) や USGS の地震観測網を活用して P 波初動から震源・マグニチュードを推定するシステムであり、さらに、断層破壊特性や地震動分布の即時推定、将来的な早期被害評価をも視野に入れて開発された。

1994 年 1 月 17 日未明に発生したノースリッジ地震 (M_w 6.7) の際には、地震発生直後 CUBE には南カリフォルニア各地の観測点から大量の波形データが一度に送られ、システムの処理能力を超えて約 1 時間ダウンする事態となった。幸いにも本震直前に発生した前震の情報がシステム停止前に配信されており、受信した報道機関などはマグニチュードが小さいながらも震源位置は正確と判断して対応を開始した。その後、余震情報などを含めてこの地震の全貌が明らかになり CUBE の情報が防災に有効であることが確認される一方、処理能力や冗長性の不足が重大な課題として浮き彫りとなった⁵⁻⁶⁴⁾。

なお、Caltech の協力により 1993 年 9 月から試験運用を始めていたパサディナユレダス (4.5.4 (1) 参照) は単一の観測点で震源位置などをリアルタイムで推定しており、ノースリッジ地震の際にも 1994 年 1 月 17 日 4 時 30 分 55 秒に発生した本震を 4 時 31 分には捉え、マグニチュードは 0.3 程度、位置は 20 km 程度の誤差で推定できている。さらに、その後の余震群もとらえ続けた⁵⁻⁶⁵⁾。図 5.54 にパサディナユレダスによるノースリッジ地震の検知状況を示す。

ノースリッジ地震当時の CUBE の地震速報ではマグニチュードが過小評価される傾向も見られ、被害規模の予測に遅れが生じた。また、即時被害推定図はま

だ整備されていなかったため災害対応への活用は限定的であった。この結果を受け、1997 年に開始されたのが TriNET プロジェクトである^{5-66), 5-67)}。Caltech、USGS、UCB、当時のカリフォルニア州地質調査部 (CDMG、現 California Geological Survey) が連携して構築したこのシステムは、CUBE の後継として大幅に強化されたシステムとなっている。すなわち、375 台以上の地震計と GPS を組み合わせた観測点から地震波形をフレームリレー回線で常時取得し、リアルタイムで地震諸元を決定するとともに、ShakeMap と呼ばれる震度・最大速度・最大加速度の分布図を自動生成してインターネットで公開した⁵⁻⁶⁸⁾。これは、地震発生後に加速度・速度・震度などの観測データをもとに、震源からの距離、地盤条件なども加味して、どの地域でどれだけの揺れがあったかを即座に把握できる、地震動分布を可視化したものであった。

これにより、CUBE が地震検知により様々なソフトウェア的な処理を始めるイベントドリブン方式のシステムであり、ノースリッジ地震の際に膨大なデータを処理できなくなった点を、TriNET では常時処理方式にすることで、地震時の情報処理量の変化を最小限にするという、システムの設計思想そのものを変更している。ちなみに、ユレダスの場合は、警報システムであるということを強く意識して、システムの設計思想として CPU に対する負荷を一定にすることを考えており、当初からリアルタイムに波形を処理して地震発生時に急激に CPU に負荷を与えない安定した動作を目指していた。TriNet は情報の公開についても、地図上にわかりやすく示すことで、どの地域でどれだけの揺れがあったかを即座に把握できるようにして、災害対応機関にとって初動対応を行うために重要な情報を提供し、被害推定や支援の優先順位付けにも利用できるようにした。

2006 年にはカリフォルニア州の地震観測網は統合され、約 600 台の地震観測点により構成される CISN (California Integrated Seismic Network) が稼働した。CISN は TriNet や REDI、TERRAScope などの観測網を統合することで、広域的かつ高精度なリアルタイム地震情報処理を可能にした。さらに、UCB で開発された ElarmS (Earthquake Alarm System)⁵⁻⁵⁹⁾ のアルゴリズムにより、P 波初動から地震の規模や震源を推定する能力が向上し、実用的な早期地震警報の基盤が整った。

この ElarmS は、最初に検知した P 波の到着情報を使用して、地震の発生位置、発生時刻、およびマグニチュードを決定し、地震波の減衰特性から最大地表加

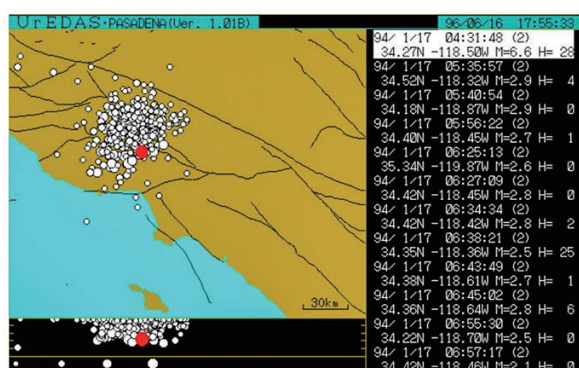


図 5.54 パサディナユレダスによるノースリッジ地震の検知状況 (筆者作成)

速度の空間分布を推定する。つぎに、S波の発生時刻と走時曲線（地震波動伝播時間曲線）に基づいて警報時間を推定する。ここでは、ユレダスに類似した手法でP波初動の周波数成分から地震の規模を推定している。すなわち、小さな地震は、断層の小さな領域での滑りにより発生し、大きな地震に比べて比較的高い周波数のエネルギーを放射する。逆に大きな地震は、大きな領域の断層の破壊により発生し、低い周波数のエネルギーを放出する。従って、P波到着開始後数秒間の地震波形の卓越周波数を測定することで、マグニチュードを推定できる。卓越周波数は、各観測点における速度センサーの垂直成分の波形からリアルタイムかつ連続的に算出され、漸化式により決定される。小さな地震に対応する高い周波数成分は、大きな地震の低い周波数よりも短い時間で推定可能であり、大きな地震よりも早くマグニチュードが推定できる。つまり、地震検知後1秒で推定されたマグニチュードは最小値であり、2秒、3秒と波形データを使うと推定されたマグニチュードが大きくなる可能性があることを意味している。

2007年からは、米国西海岸全体を対象にした公式EEWシステム ShakeAlert の開発プロジェクトが始まった⁵⁻⁶⁹⁾。ShakeAlert は USGS が主導し、Caltech、UCB、ワシントン大学などが参加する協働プロジェクトである。広帯域地震計、強震計、全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) など複数のセンサーからの情報を統合解析し、数秒から数十秒前に警報を発する。このための理論も、当初は前述の ElarmS に AI による予測を組み合わせていたのが、後に ElarmS の一点検知方式になり、さらにこれのマグニチュードが飽和してしまう点を改善した EPIC と呼ばれる方式へとアップデートされ、FinDer⁵⁻⁷⁰⁾ という断層破壊領域を推定し断層モデルを構築することで得られる地震動の空間分推定手法と組み合わせた結果が公表されるようになった。現在ではこれに G-FAST⁵⁻⁷¹⁾ という、GNSS の情報を用いた地表面の詳細な変位情報によるマグニチュードの推定も組み込まれるようになり、早期地震警報システムとしての技術開発も連綿と引き継がれアップデートされている。

なお、ShakeMap と ShakeAlert は名称が似ているが、ShakeMap は CUBE などにより推定された結果をユーザーに分かりやすく可視化するためのシステムであったのに対して、ShakeAlert は地震の検知から警報発令までをすべて含めており、情報や警報の発令までの時間も ShakeMap は数分かかっていたのが、

ShakeAlert では数秒以内と迅速な早期警報を提供できるようになった。

ShakeAlert は 2012 年からカナダ国境からメキシコ国境にかけて設置された 700 台の地震計による処理結果が一部の開発者に配信されるようになり、2018 年には限定的な早期地震警報の公開が始まった。マグニチュード 4.5 以上を推定した地震については震度などの地震動分布図が提供され、その試験運用の結果、2019 年にカリフォルニア州で正式運用が開始された。現在の ShakeAlert は、スマートフォンアプリ MyShake や携帯キャリア経由の緊急速報 (WEA, Wireless Emergency Alerts) を通じて住民に直接警報を届けられる。また、カリフォルニア州以外の州でもそれぞれに対応したスマートフォンのアプリなどで早期地震警報が段階的に提供されるようになってきている。さらに、鉄道の自動停止、病院の手術中断、エレベーター制御、学校での児童避難など、社会インフラとの連携も進んでいる。

なお、これらの地震警報に使われる地震観測点も広帯域地震計と強震計を備えた観測点が 2023 年には 1,509 点に、さらに 2025 年には 1,675 点まで増える予定で、サンフランシスコのベイエリアやロサンゼルスなど人口密集地では 10 km 間隔で、その周辺の都市部で 20 km 間隔、地震があまり発生しない地域では 40 km 間隔と、稠密かつ合理的に地震計を配置した巨大なネットワークになっている。

2019 年から 2023 年までの ShakeAlert の動作履歴によると、警報発令基準 ($M \geq 4.5$) に達したと判断した事象が 95 回あり、そのうち実際に $M \geq 4.5$ だったものが 41 回あった。他は、実際には $M < 4.5$ の地震が 46 回、100 km 以上離れていて警報の必要のない地震が 7 回、対応する地震がないものが 1 回であり、この他に実際には $M \geq 4.5$ なのに警報発令しなかったものが 7 回という結果であった。

5.9.2 メキシコの早期地震警報システム

メキシコ合衆国は北米プレートの南西の縁に沿って位置しており、南西部の太平洋プレートに対して、ココスプレートとリベラプレートが沈み込んでいる。このため、メキシコの太平洋岸では繰り返し $M 7$ を超える巨大地震が発生している。また、メキシコ合衆国の首都メキシコシティは 2,000 万人以上の人口を擁する高地の盆地に位置する巨大都市であり、かつては市域のかなりの範囲が巨大な湖であった。17 世紀以降に干拓が進められてその上に都市が造られたため、元の島の上に位置する中心部を除くと都市のほとんどが

軟弱地盤の上に位置する。このため、太平洋岸からは距離があるもののメキシコシティは繰り返し地震により被害を受けてきた。とりわけ1985年のミチョアカン地震(M_s 8.1、図5.55)の際には震源から約350 km 離れているにもかかわらず、死者4,000人以上、負傷者10,000人以上、被災家屋1,000棟以上と、甚大な被害をもたらした⁵⁻⁷²⁾。

図5.56のようにメキシコでは太平洋岸で巨大な地震が繰り返し発生しているが、この帯状の地域には地震空白域といわれるプレートの境界域にもかかわらず長期間にわたって地震が発生していない領域がある。1985年のミチョアカン地震はミチョアカン空白域(Michoacan gap)といわれる領域で起きたのに対し、ゲレロ空白域(Guerrero gap)は2024年現在でも100年以上にわたって壊れずに残っているといわれている。

このような状況を受け、メキシコシティでは Sistema de Alerta Sísmica (SAS) と呼ばれるリアルタイム地震警報システムの構築が1989年からはじめられ、1991年8月に完成した⁵⁻⁷⁴⁾。このシステムの構成を図5.57に示したが、基本的な考え方は国鉄の前線検知システムと同様に、海岸線で発生した巨大な地震を検知し、その情報を通信により地震動よりも少しでも早くメキシコシティに伝達しようというものである。

設置当初のSASは、地震検知システム、伝送システム、中央制御システムにより構成されていた。

まず、地震検知システムは、地震空白域となっている Guerrero gap を中心とした海岸線沿いに300 km にわたり25 km ごとに全部で12箇所配置されており、それぞれが半径100 km のエリアをカバーしている。3方向成分加速度計とコンピュータにより構成される観測点は常時地震活動を監視しており、メキシコシティに地震動が到達する50秒～70秒前には前もって警報を出すことができるようになっている。次に伝送システムは、VHF の無線中継システムが国土の太平洋側(南西側)に位置するゲレロ州の海岸の近くに設置され、さらに6組のUHF の無線中継システムがゲレロ州の海岸からメキシコシティの間に設置されている。このシステムでゲレロ州の海岸からメキシコシティまで約2秒で情報を送信できる。なお、各システムの受信・送信部は常時稼働しており、一定間隔で通信試験をして故障していないことを確認している。さらに、中央制御システムはメキシコシティのSASを運用している非営利機関CIRES (centro de instrumentación y registro sísmico) に設置され、地震検知システムや伝送システムの動作情報を常時受信

している。また早期警報はこのシステムの無線警報システムから、小学校31校、民間ラジオ局25局、軍、電力会社、地下鉄、自治体、行政機関、大学に送られている。



図 5.55 メキシコシティとミチョアカン地震の震央位置 (筆者作成)

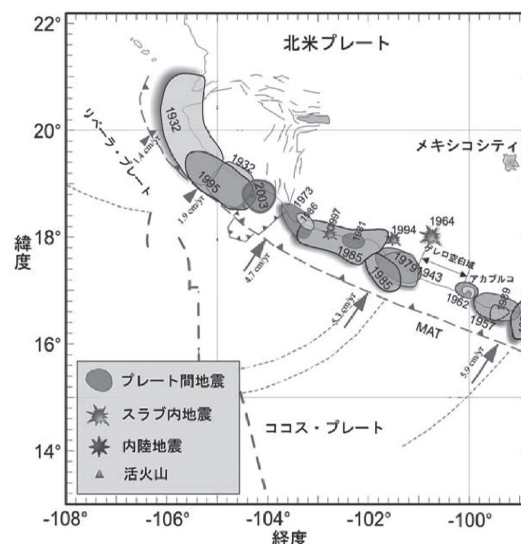


図 5.56 メキシコ周辺で発生した大きな地震の分布⁵⁻⁷³⁾ (掲載許諾)

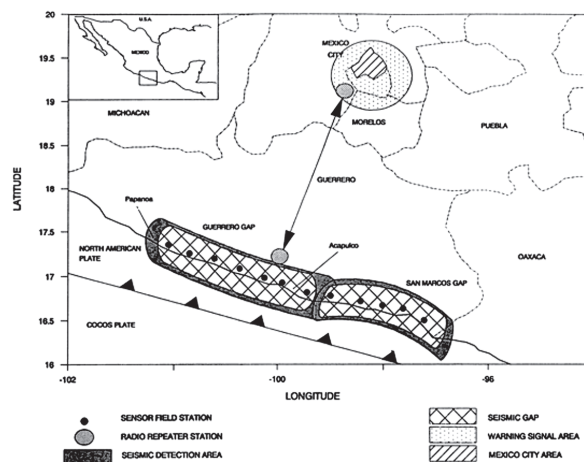


図 5.57 Sistema de Alerta Sísmica (SAS) のシステム概要図⁵⁻⁷⁴⁾ (掲載許諾)

ていた。なお、この CIRES と SDR の共同事業として一時期はユレダスがメキシコシティに設置されて共同観測を実施していた(4.5.4 (2) メキシコ・ユレダス参照)⁵⁻⁷⁵⁾。

SAS は稼働後に順調に地震検知を続け、1995 年 9 月 14 日にメキシコシティの南約 300 km のゲレロ州で発生した M 7.4 の地震の場合は、地震発生の際はメキシコシティでは小被害が発生したものの人的・構造的被害はなかったが、被害を及ぼすような地震が発生した場合にも公共の安全が守られるであろうことを示した。

その後 1999 年にプエブラ州で起きた M 6.7 の地震では、メキシコシティからは遠い地震であったが、プエブラ市で死者 72 人という被害のほか、多くの歴史的建造物が倒壊した⁵⁻⁷⁶⁾。この地震を受けオアハカ州もメキシコシティと同等のシステムを構築することを決め、SAS と同様に CIRES がシステムの設計から構築、運営することとなった。これが 2001 年に 36 台の地震計を使った Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca (SASO) として運用を開始した^{5-77), 5-78)}。

現在では、この SAS と SASO は統合され、SASMEX としてメキシコシティなどに対する早期地震警報システムとして運用されている。例えば、2004 年 6 月に起きたオアハカ州の海岸沿いの地震 (M 5.8) では、メキシコシティに対する警報は SASO のみの場合は 30 秒の余裕時間しか得られないところ、統合された SASMEX であれば 60 秒以上の余裕となる。この SASMEX の特徴としては、プレートの沈み込み帯を対象として特別に設計された地震計を 97 台設置し、それぞれが独立して地震波の解析と警報発令の判断を行う自立型のシステムであり、地震波形をセンターシステムに送信することなく必要な情報のみを送信していることがあげられる。また前述のように、メキシコの早期地震警報システムは SAS 開発当初から SASMEX に至るまで、メキシコシティから離れた太平洋岸で発生する巨大地震をターゲットとした前線検知型のシステムであったが、現在は P 波の最初の 3 秒のデータを用いてメキシコシティの近くで発生した地震に対する警報出力の検討も進められている⁵⁻⁷⁹⁾。

5.9.3 台湾の早期地震警報システム^{5-80) ~ 5-82)}

フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に位置する台湾では繰り返し地震の被害を受けており(例えば図 5.58)、1986 年の花蓮地震 (M_w 7.4) を契機に早期地震警報システムの開発が始まり、高度化が進められてきた。この地震では震源は東部の花蓮沖で

あったが、強い揺れが最も大きく観測され被害が発生したのは約 120 km 離れた台北都市圏であった。S 波の伝播時間を考慮すると、震源から台北までは約 30 秒のリードタイムがあり、大地震の発生から 20 秒以内に震源とマグニチュードが推定できれば、都市部には 10 秒以上の早期警報が可能であるという認識が確立された。

これを受けて、台湾中央気象台 (Central Weather Bureau, CWB) は、1993 年、花蓮地域に 10 台の 3 成分加速度計を設置した前線検知型の実験的 EEW システムを構築した。このシステムは、花蓮地区の地震発生から 10 秒以内に震源パラメーターを推定し、その情報を回線経由で強い震動が到来する前に台北に伝送することを目的としていた。1994 年から半年間の試験運用の中で、M 3.1 ~ M 6.5 までの 32 地震で平均 10 秒以内の検知と通報が達成されたが、観測点密度の不足により震源決定やマグニチュード推定には大きな不確実性が残った。

この経験をもとに、1995 年から CWB は台湾全土に 110 観測点にダイナミックレンジ (観測範囲) が ± 2 G の地震計を設置したリアルタイム強震観測網を整備して地震即時通報システム (RTD) が運用開始された。このシステムでは、仮想サブネット (VSN) と呼ばれる震源近傍の観測点だけを自動的に抽出し、観測点を最小限に絞った処理⁵⁻⁸³⁾によって、報告時間

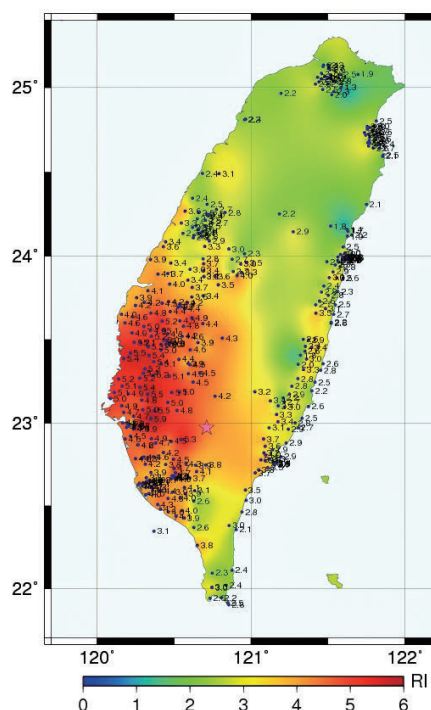


図 5.58 2010 年甲仙地震 (M 6.4) の震度分布
(この地震では、台湾の高速鉄道が開業以降初めて脱線した)
(筆者作成)

を平均 22 秒まで短縮することに成功した。さらに、P 波到達後の最初の 10 秒間の波形からローカルマグニチュードを推定する M_{L10} 法⁵⁻⁸⁴⁾を導入し、一定の精度で地震規模の速報が可能になった。

なお、1999 年に台湾中部で発生し多くの被害をもたらした集集 (Chi-Chi) 地震 (M_w 7.6) (図 5.59) の際にもこのシステムは自動的に位置とマグニチュードを決定し、地震発生から 102 秒後には地震動分布図を作成した⁵⁻⁸⁵⁾。この結果はポケットベル、e-mail、FAX により伝達された。

しかしこの VSN と M_{L10} を用いる方式には致命的な制限があった。すなわち、P 波到達から 10 秒分の波形を待たなければならないため、震源から 60 km 以内に位置する「ブラインドゾーン」では、強い揺れが到達する前に警報を出すことができなかった。これを克服するため、2005 年以降に第二世代の早期地震警報システムとして導入されたのが、P 波の最初の 3 秒間だけを利用して、より迅速に震源情報と規模を推定する手法である。この手法は Pd (ピーク変位) 法⁵⁻⁸⁶⁾といわれるもので、P 波到達後 3 秒以内の鉛直変位の最大値 (Pd) を用いてマグニチュードを推定する。Pd は地震の規模に強く依存し、またリアルタイムで計測が可能であることから、非常に有効な早期警報指標とされている。例えば、Pd が 0.3 cm を超えるような場合は M 5 以上の地震が予想されるとされ、しきい値を超えた瞬間に警報が発せられる。

この新世代の早期地震警報システムが、CWB によって 2012 年以降に開発・運用されている「eBEAR システム」である。eBEAR は米国 USGS が開発した Earthworm プラットフォームを用い、加速度型、短周期、広帯域、海底など多様なセンサーからのデータをリアルタイムに統合処理する。そして P 波の到達と同時に震源位置を推定し、一定の精度を満たせば数秒以内に警報が発せられる仕組みとなっている。これ

により、特に内陸地震においては平均 10.5 秒以内に警報が出され、40 km 以上離れた地域には S 波到達前に警報が届くようになっている。

これに加えて、国立臺灣大學 (NTU) は、コストを抑えた MEMS 加速度センサー「P-Alert」を開発し、2010 年から展開を開始した。このシステムは台湾全土に 700 台以上設置され、それぞれが Pd や PGA (最大加速度) を独自に監視しており、しきい値 (例: $PGA > 80$ Gal または $Pd > 0.35$ cm) を超えた際に警報音を発する。この分散型・オンサイト型の警報方式により、震源至近距離でも 2 秒～8 秒のリードタイムを持って警報を出すことができ、2016 年の美濃 (Meinong) の地震 (M_w 6.3) や 2018 年の花蓮 (Hualien) の地震 (M_w 6.4) などでも有効に機能した。また、P-Alert のデータは中央に集約され、リアルタイムの震度分布図 (ShakeMap) を 1 分～2 分以内に作成し、救助活動にも活用されている。

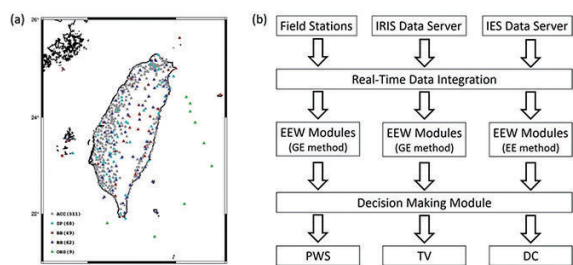
さらに、国家地震工学研究センター (NCREE) は、2009 年からオンサイト型の早期地震警報システム「NEEWS」を整備した。このシステムからの警報が適切に発令されていることを受けて、台湾政府は 2015 年から全国の小中学校約 3,500 校に対し 98 箇所の地震観測点やデータロガーなどをいくつかの学校に分散配置し、観測点からのオンサイト警報と CWB からの広域警報のいずれか早い方が自動的に校内放送で流れるハイブリッド方式の早期地震警報システムを整備している。NEEWS は 2016 年から 2019 年にかけての大地震でも安定した性能を示し、平均 4 秒～15 秒のリードタイムと、90 % 以上の強震度予測精度を達成している。

以上のように、日本と同じく地震が非常に多い台湾では、中央気象局 (CWB) による全国規模の広域前方検知型 EEW システム (eBEAR)、国立臺灣大學による MEMS センサーを活用した現地対応型・分散型 P-Alert システム、国家地震工学研究センターによる教育機関向けハイブリッド警報システム (NEEWS) が併存し、それぞれの地理的・機能的特性を活かしながら連携・補完しており、震源至近から遠隔都市部に至るまで、幅広い範囲にわたる地震警報が可能となっている。この多層的かつ冗長性を持つシステム構成は、地震が多発する台湾にとって、極めて実効性の高い防災インフラとなっており、世界的にも先進的な EEW のモデルケースとして注目されている。

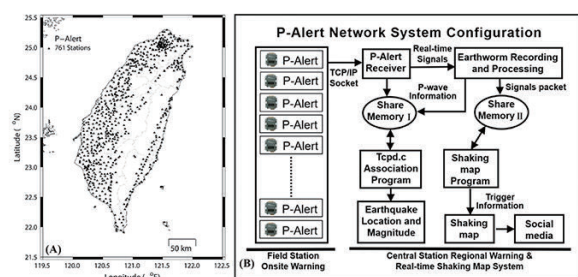
図 5.60 に、上記 3 システムのそれぞれの構成図を示す。



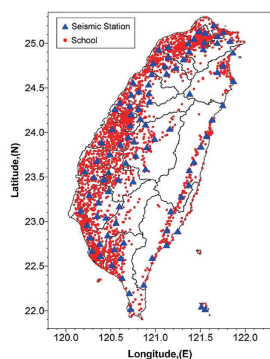
図 5.59 1999 年集集地震時の被害 (筆者撮影)



(a) 台湾中央気象台 (CWB) のシステム構成



(b) 国立臺灣大學 (NTU) のシステム構成



(c) 国家地震工学研究センターによる
ハイブリッド警報システム (NEEWS) の地震計配置

図 5.60 台湾の各早期地震警報システムの構成図⁵⁻⁸²⁾
(掲載許諾)

5.9.4 その他の国の早期地震警報

その他のいくつかの国でも早期地震警報システムが研究開発され稼働している⁵⁻⁸⁷⁾。繰り返し地震の被害を受け、また来るべき次の大地震に備えて、それぞれの国の特性に合わせたシステムが開発されてきたので、それらについても概説する。

ルーマニア^{5-88), 5-89)}の首都ブカレストは、国土の中央に位置するヴランチャ (Vrancea) 地方で発生する、平均して 130 km 程度離れた深さ 70 km ~ 200 km と非常に深いところの最大でマグニチュード M 8 に達する地震により繰り返し被害を受けてきた。このため、メキシコシティのように地震発生を震源近くで検知してそれを伝達することでブカレストに警報を出すことができる早期地震警報システム「25 秒前警報システム」が、ドイツのカーlsruhe 大学との共同研究として早くから検討されてきた。実際の早期地震警報システムは 2002 年から構築が始まり、ヴランチャ

地方に 30 台以上の強震計が設置されている。このシステムは 2007 年からはマグニチュードを推定する機能が付加されているが、特徴的なのはヴランチャ地方で発生する地震のみをターゲットにしているため、震源位置の推定機能がないものになっていたことである。その後 2013 年には後述するイタリアで開発された PRESTo というアルゴリズム⁵⁻⁹⁰⁾により震源位置も推定するようになり、ブルガリアとルーマニアの緊急対応機関に設置された専用の受信機に送信されるようになった。

トルコ^{5-89), 5-91)}のイスタンブールは、市街から 15 km しか離れていない北アナトリア断層で発生する地震により繰り返し被害を受けてきた。このため、2002 年からボアジチ大学のキャンディリ観測所と地震研究所 (KOERI) は IEEWS (Istanbul earthquake early warning system) を構築してきた。当初は地上の 10 観測点だったのが 2013 年にマルマラ海の海底にも 5 箇所の観測点を追加している。警報はシンプルに地震を検知して一定の値を超えることで重要なインフラ設備 (ガス、鉄道など) に発令されている。

イタリアもヨーロッパの中で地震の多い国であるが、2005 年から早期地震警報システムの試験運用がはじまり⁵⁻⁹²⁾、PRESTo と呼ばれる震源位置やマグニチュードを進化的アルゴリズムにより逐次推定する手法が開発された⁵⁻⁹³⁾。その後、イタリア政府と鉄道会社 RFI (Rete Ferroviaria Italiana)、フェデリコ二世ナポリ大学、日本の鉄道総合技術研究所などの協力により、ローマナポリ間の高速鉄道において沿線に設置した加速度計で P 波検知を行い、一定の値を超えると警報を出す早期地震警報システムが 2025 年から運用開始されている⁵⁻⁹⁴⁾。

インド⁵⁻⁹⁵⁾は、北部のヒマラヤ山脈で巨大地震が発生する可能性が高く、一方で、大規模な人口密集地や主要な工業拠点 (首都デリーを含む) がヒマラヤ山脈に隣接する平野部に位置している。この状況に鑑みインド工科大学では 2014 年から早期地震警報システム用の地震観測網を構築し警報を発令している。

大韓民国⁵⁻⁹⁶⁾はヨーロッパプレート上に位置し、100 年以内に被害地震に見舞われると考えられている。このため韓国では、大韓民国気象庁 (KMA, Korea Meteorological Administration) が 2007 年から Korean Earthquake Early Warning System (KEEWS) と呼ばれる早期地震警報システムの構築を始めた。このシステムは 188 観測点で構成され、カリフォルニアの ElarmS を韓国向けに対応させたシステムである。2010 年にリアルタイム処理を開始し、2015 年から一般

向けに携帯電話のテキストメッセージの送信を始めた。

カナダ^{5-97), 5-98)}の中でブリティッシュコロンビア州の南西部には、地震が数多く発生している。それまでも通常の地震観測を行っていたが、2015年からはビクトリア大学の Ocean Networks Canada (ONC) は天然資源省 (Natural Resources Canada) と共同で早期地震警報システムの構築を始めた。このシステムは地上と海底の地震計に加え、海岸線に設置されたアンテナで観測される GNSS の情報を取り入れてマグニチュードの推定を行うもので、2024 年からブリティッシュコロンビア州で一般向けの運用が開始され、2025 年中にはケベック州とオンタリオ州にも展開される。

この他、中国では 2013 年から早期地震警報システムの試験運用が始まり、7 秒以内に警報を発令可能であるとされている^{5-99), 5-100)}。イスラエルでは、110 箇所以上の地震観測点のデータをもとにカリフォルニアの ShakeAlert の手法を取り入れた早期地震警報システム TRUAA の構築を始めており、2014 年からの試験運用を経て 2022 年から正式な運用が始まった^{5-101), 5-102)}。繰り返し巨大地震が発生しているチリでも ElarmS を適用した早期地震警報システムが 2020 年から運用されている⁵⁻¹⁰³⁾。

またスイスでは、スイス地震学サービス (SED, Swiss Seismological Service) が中心となり、前述したカリフォルニアの Virtual Seismologist と FinDer を用いた早期地震警報システムの試験が 200 点以上の観測点のデータを用いて続けられており、試験観測の結果 ShakeAlert と同等の結果が得られている⁵⁻¹⁰⁴⁾。さらに SED はこの試験運用で得られた知見をもとに、ATTAC というプロジェクトで中米 (エルサルバドル、グアテマラ、コスタリカ、ニカラグア) においても早期地震警報システムの試験運用を行っている⁵⁻¹⁰⁵⁾。

この他にも Google はカリフォルニア大学バークレー校で REDI から ShakeAlert に続く早期地震警報システムの研究を続けてきたリチャード・アレン (Richard Allen) との共同研究で、Android 搭載スマートフォンの内蔵加速度計によるデータを広範囲で共有することで早期地震警報を発令する Android Earthquake Alerts というサービスを 2021 年のニュージーランドとギリシャを対象に始め、2023 年末までに 98 か国で展開している^{5-106), 5-107)}。

5.10 早期地震警報システムなどに関する特許と考察

早期地震警報システムについては、開発を行ってきた国鉄やそれを継承した鉄道総合技術研究所を始め、気象庁や関係する会社などから多くの特許が出願されている。ここでは早期地震警報システムに関する技術の発展を特許の面からも考察するため、特許登録された主要なものを取り上げる。

早期地震警報システムに関する特許は、その開発の当初から国鉄を中心とするグループによりまず基本となる概念が特許化され、要素技術の研究開発の進捗にあわせて個別の具体的な要素技術も出願されていった。これらの特許を基礎技術として、1992 年の東海道新幹線の「のぞみ」開業時にはユレダスの実用化がなされた。なお、これに先立って 1984 年 4 月には、「地震早期検知警報システム」の特許^{5-108)~5-110)}は科学技術庁 (当時) の第 43 回注目発明に選定されている。また、前述のように地震防災の基本は施設の耐震性を十分に確保することで、その上で早期地震警報システムが有効であるという考えのもとに、国鉄やそれを引き継いだ鉄道総合技術研究所は構造物の健全度を判定するための壊れやすさ指標などに関する特許も出願している。

その後も早期地震警報システムに関する研究開発は続けられ、地震の持つエネルギーそのものに着目した警報方法やその要素技術、また構造物の診断方法が引き続き株式会社システムアンドデータリサーチにより特許出願され、その後登録されている。この他にも、P 波で地震検知した結果で警報判断を行い、警報が必要な場合には回線を通じて広く伝達する方法として、株式会社フジタほかによる特許⁵⁻¹¹¹⁾が登録されている。

一方、日本で広く使われている早期地震警報システムとして気象庁から発令される緊急地震速報があり、P 波検知時点での地震諸元の推定方法に関する特許が鉄道総合技術研究所と気象庁の共同で出願され、登録されている。その他にも緊急地震速報の応用など多くの特許が登録されている。なお、特許情報プラットフォーム「J-PlatPat」にて、特許の技術的内容を記載した請求の範囲に「緊急地震速報」を含むものを検索したところ、2025 年 10 月 9 日現在で総数が 503 件、そのうち登録されている特許は 137 件あり、非常に多く活用されていることがわかる。

以上の観点により、筆者の視点にはなるが、早期地震警報システムおよびそれに関する代表的な特許を表 5.8 に、また主要な特許の流れを図 5.61 にまとめた。

表 5.8 早期地震警報システムおよび関連する特許

(a) 早期地震警報システムの初期からの一連の特許 (UrEDAS から FREQL への系譜)

特許の名称	登録番号	出願人	内容
地震早期検知警報システム	特許第 1285667 号 (特公昭 60-008468)	日本国有鉄道 沖電気工業	地震検知し、周期と振幅から震源とマグニチュードを推定し、それにより加害性を算出して必要な警報を発令する。
地震早期検知警報システム	特許第 1291223 号 (特公昭 60-014315)	日本国有鉄道 沖電気工業	各地震計からの観測波形をセンターに集約して警報を発令する。
地震早期検知警報システム	特許第 1291229 号 (特公昭 60-014316)	日本国有鉄道 沖電気工業	複数の観測点からの情報を制御処理装置に集約し、検知した地震の加害性に基づいて警報を発令する。
震央方位推定装置	特許第 1610592 号 (特公平 02-036196)	日本国有鉄道 沖電気工業	上下方向、東西方向及び南北方向のセンサの検出値の指数平滑値の比から方位を算出する。
地震波卓越周期検出装置	特許第 1610621 号 (特公平 02-036911)	日本国有鉄道 沖電気工業	固有周期が異なる 2 種の出力をするセンサとその固有周期から地震波の卓越周期を算出する。
卓越周波数算出装置	特許第 1610622 号 (特公平 02-036910)	日本国有鉄道 沖電気工業	センサから入力された波形の指数平滑値と、微分又は積分波形の指数平滑値との比から入力振動波形の卓越周波数を得る。
S 波検出装置	特許第 1636955 号 (特公平 02-063193)	日本国有鉄道 沖電気工業	水平動成分の平滑値と、上下動成分と水平動成分の振幅比と地震波の到来方向と常時監視し、それぞれが変化することで S 波の到来を検出する。
震源距離算出装置	特許第 1636970 号 (特公平 02-063194)	日本国有鉄道 沖電気工業	固有周期が異なる 2 種のセンサの出力の指数平滑値を算出し、卓越周期から周波数の差との比で震源距離を得る。
1 観測点 3 成分による地震早期検知警報システム	特許第 1723255 号 (特公昭 62-034369)	日本国有鉄道 沖電気工業	1 ケ所の検知点のみで地震の到来を検出し、マグニチュード、震源距離、震央方位に基づいて被害域を推定して警報を発令する。
震源距離及び震源の深さ推定装置	特許第 1800764 号 (特公平 05-011871)	日本国有鉄道 沖電気工業	一観測地点において上下動成分と水平動成分の振幅の比により地震波の到来を検出し、初動部分の周期、振幅と上下動成分と水平動成分の比の最大値から震源距離と震源の深さを推定する。
地震検知警報記録装置	特許第 1916696 号 (特公平 06-034032)	日本国有鉄道	地震動を検出して記録、警報発令を行う地震計で、かつ誤警報出力に結び付くような異常を自己診断機能する。
リアルタイムデータ観測時の雷ノイズ識別方法	特許第 3750977 号	システムアンドデータ リサーチ	観測しているデータの各観測成分間の相互相関値をリアルタイムに算出し、それが閾値を上回っていれば、観測されたリアルタイムデータには雷ノイズが混入していると判断する。
地震動の危険度モニタリング手法	特許第 3764943 号	システムアンドデータ リサーチ	地震動の応答加速度ベクトルと応答速度ベクトルの内積をリアルタイムに算出し、その値が一定の値を超えたことにより、作用している地震動が危険であると判断する。
地震動の P 波検知方法とそれに基づいた警報発令方法	特許第 3793787 号	システムアンドデータ リサーチ	地動を常時観測し、水平動と上下動から危険度判定指標値を算出し、また一方で観測した地動の水平動のみから危険度判定指標値を算出し、これらの差が一定以上の値の場合に地震動の P 波とする。また、P 波の警報レベルを超過した場合、P 波を検知したことを確認して警報を発令するので、従来よりも迅速かつ的確な地震警報が、地震動の危険度判定指標値だけを用いて提供することができる。
地震警報システム	特許第 3890366 号	フジタ システムアンドデータ リサーチ	地震観測装置は P 波を検出すると解析装置に出力して警報の必要性の有無の判定を行い、地震警報情報を生成して回線に送出する。稼働設備は回線を介して受けた地震警報データに応じて稼働中の作業の中断、あるいは地震到来を警告する警報動作の少なくとも一方の動作を実行する。
地震動の初期微動を用いた震源距離または震央距離推定方法	特許第 4182259 号	システムアンドデータ リサーチ	地震の初期微動を検知した場合、その最大値を保持し、最大振幅と震源距離または震央距離の関係を示す統計量との関係から、震源距離あるいは震央距離を推定する。

(b) 緊急地震速報とその応用に関する特許

特許の名称	登録番号	出願人	内容
震央距離及びマグニチュード推定方法とそのための装置	特許第 3695579 号	鉄道総合技術研究所 気象庁長官	地震波初動部分の波形を地震波形の初動振幅の時間変化や最大振幅による関数にフィッティングして震央距離やマグニチュードを推定する。
地震予測即時報知システム	特許第 3755131 号	防災科学技術研究所	複数地点の地震波形から地震の震源、大きさ、時刻を求めて有感の半径を求め、他方で特定の場所の予測強度と予測時刻を求めて、これが有感の半径に入っていることと報知の要否を判定して警報発令を行う。
計測震度概算装置、それを用いた計測震度概算システム及び計測震度概算方法	特許第 4229337 号	防災科学技術研究所	加速度の時系列データをフィルタ処理し振幅換算振幅時系列データに変換して継続時間カウントを用いて計測震度の概算値を算出する。
緊急地震速報システム	特許第 4465489 号	エイソー ホームサイスマメータ	緊急地震速報を受信した受信端末装置が P 波を検知することができる地震計となっており、緊急地震速報の地震到来予想時間以内に P 波を検出した場合に緊急地震速報を発令する
地震防災システム	特許第 4491399 号	OKI セミコンダクタ OKI セミコンダクタ宮城 沖環境テクノロジー	緊急地震速報を受信すると予測震度が設定値を超えるか判断し、P 波地震計が P 波を検出する前であれば大陸型またはプレート型かあるいは直下型かを判断して制御出力を行う。
地震判定システム及び地震解析方法	特許第 4510128 号	エイソー	複数の観測点からの P 波情報を受けたときに、観測点との距離、地震エネルギーの限界距離、P 波の伝播速度の関係から地震発生を判定する。
地震防災システム	特許第 5073515 号	ラビセセミコンダクタ	緊急地震速報を受信すると震度と地震動到達までの時間を計算して閾値を超えるかを判断し、P 波地震計が P 波を検知したことで制御信号を出力する。
地震警報システム	特許第 6358923 号	防災科学技術研究所	複数の領域に観測点を設け、地震を検知すると各領域を代表する地震動指標を計算し、閾値を超えた時に隣接領域のデータに基づいてそこにも警報を発令する
地震警報システム	特許第 6887310 号	ミエルカ防災	建物や事業所内の敷地内に設けられる 3 つ以上の地震計の相関係数を算出し、それに基づいて P 波検出とする。この P 波データに基づいて S 波強度を予測し警報を出力する。
地震警報システム	特許第 7015523 号	ミエルカ防災	発生した地震の P 波の最大加速度に係数を乗じることによって S 波の最大加速度とし、当該地震に対応するための処理を実行する地震警報システム
地震動を検出するための検出装置及びその検出結果に基づいて地震動の強度を予測するための予測装置	特許第 7109120 号	ミエルカ防災	複数の地震計で P 波の検出を判定値に基づいて行い、P 波データにより S 波を予測する地震動検出予測システム。
S 波の強度を連続的に予測する S 波予測方法、予測システム、コンピュータ及びコンピュータ・プログラム	特許第 7634318 号	ミエルカ防災	地震動が観測されるごとに 1 つ又は複数の観測点で計測された加速度 3 成分の各々を用いてリアルタイム S 波強度を算出し、距離減衰を加味した複数の予測 S 波強度を算出し、最大予測 S 波強度を出力する。

早期地震警報システムの初期の特許（UrEDAS）

件 名	早期地震検知警報システム
登録番号	特許第1285667号
出願人	日本国有鉄道 沖電気工業
内 容	地震検知し、周期と振幅から震源とマグニチュードを推定し、それにより加害性を算出して必要な警報を発令する

要素技術

件 名	震央方位推定装置
登録番号	特許第1610592号
出願人	日本国有鉄道 沖電気工業
内 容	上下動と水平動の比から震央方位を算出しP波とS波の識別を行う

件 名	卓越振動数算出装置
登録番号	特許第1610622号（1991年登録）
出願人	日本国有鉄道 沖電気工業
内 容	入力振動波形から卓越周期を算出する

より速い警報発令へ（FREQL）

件 名	地震動のP波警報検知方法とそれに基づいた警報発令方法
登録番号	特許第3793787号
出願人	システムアンドデータリサーチ
内 容	常時地動を監視して地震動危険度判定指標値を算出し、地震動のP波を検出するとそれに応じた迅速な警報を発令する

要素技術

件 名	地震動の危険度モニタリング手法
登録番号	特許第3764943号
出願人	システムアンドデータリサーチ
内 容	地震動の作用している物体に対して、作用しているエネルギーをリアルタイムに算出して、その値が一定の値を超えたことにより危険と判断する

(a) 早期地震警報システム UrEDAS から FREQL への系譜

初期の緊急地震速報の地震諸元推定手法

件 名	震央距離及びマグニチュード推定方法とそのための装置
登録番号	特許第3695579号
出願人	鉄道総合技術研究所 気象庁長官
内 容	地震波初動部分の波形をフィッティングし震央距離やマグニチュードを推定する

緊急地震速報に類似したもの

件 名	地震警報システム
登録番号	特許第3890366号
出願人	フジタ システムアンドデータリサーチ
内 容	地震のP波を検出すると警報の必要性を判断し回線を介して警報発令を行う

緊急地震速報に関連するもの

件 名	地震予測即時報知システム
登録番号	特許第3755131号
出願人	防災科学技術研究所
内 容	複数地点の地震波形から地震の震源、大きさ、時刻を求めて有感の半径を求め、他方で特定の場所の予測強度と予測時刻を求めて、これが有感の半径に入っていることと報知の要否を判定して警報発令を行う。

緊急地震速報の応用など

件 名	緊急地震速報システム
登録番号	特許第4465489号
出願人	エイツー、ホームサイスマメータ
内 容	緊急地震速報を受信した受信端末装置がP波を検知することができる地震計となっており、緊急地震速報の地震到達予想時間以内にP波を検出した場合に緊急地震速報を発令する

件 名	計測震度概算装置、それを用いた計測震度概算システム及び計測震度概算方法
登録番号	特許第4229337号
出願人	防災科学技術研究所
内 容	加速度の時系列データをフィルタ処理し振幅換算振幅時系列データに変換して継続時間カウントを用いて計測震度の概算値を算出する。

件 名	地震防災システム
登録番号	特許第4491399号
出願人	OKIセミコンダクタ OKIセミコンダクタ宮城 沖環境テクノロジー
内 容	緊急地震速報を受信すると予測震度が設定値を超えるか判断し、P波地震計がP波を検出した前だったら大陸型またはプレート型かあるいは直下型かを判断して制御出力を行う。

件 名	地震警報システム
登録番号	特許第6358923号
出願人	防災科学技術研究所
内 容	複数の領域に観測点を設け、地震を検知すると各領域を代表する地震動指標を計算し、閾値を超えたときに隣接領域のデータに基づいてそちらにも警報を発令する

件 名	地震警報システム
登録番号	特許第6887310号
出願人	ミエルカ防災
内 容	建物や事業所内の敷地内に設けられる3つ以上の地震計の相関係数を算出し、それに基づいてP波検出とする。このP波データに基づいてS波強度を予測し警報を出力する。

(b) 緊急地震速報とその応用など

図 5.61 早期地震警報システムに関連する特許の流れ

参考文献

- 5-1) 芦谷公稔, 室野剛隆:「鉄道における早期地震警報システム」, 土木学会誌, 第 87 巻第 12 号, 27-28 (2002)
- 5-2) 中村豊:「早期警報が災害軽減に役立った事例と今後の展開」, 情報通信技術を利用した今後の防災研究のあり方に関する検討会 (京大防災研講演), 株式会社システムアンドデータリサーチ, https://www.sdr.co.jp/papers/20060622_kyoto.html (2025年10月1日閲覧)
- 5-3) 平岩崇人, 村上智勇, 谷田和貴, 岡田有功:「日本の鉄道の安全を支える早期地震警報システム」, 電気学会誌, 133 巻 2 号, 100-103 (2013)
- 5-4) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』, 早期地震警報システム, <https://ja.wikipedia.org/wiki/早期地震警報システム> (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-5) 株式会社 ANET, <https://anetrt.jp/service/eew/> (2025 年 9 月 11 日閲覧)
- 5-6) 気象庁, 予報業務の許可事業者一覧 (地震動), https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/minkan_jishin.html#25 (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-7) 明星電気株式会社, QCAST® 受信装置 S704-FCPL, https://www.meisei.co.jp/products/earthq/earthq_earthq/p3527 (2025年10月2日閲覧) (掲載許諾)
- 5-8) 安全・安心サポート株式会社, <https://www.anan-sup.co.jp/index.html> (2025 年 11 月 10 日閲覧) (掲載許諾)
- 5-9) 株式会社 RiaNet, <http://rianet.jp/eew/> (2025年10月2日閲覧) (掲載許諾)
- 5-10) 株式会社エィター, 地震計内蔵緊急地震速報受信機サイスモガード, <https://www.a-2.co.jp/seismoguard/index.html> (2025年10月2日閲覧) (掲載許諾)
- 5-11) 公益財団法人日本デザイン振興会, 2008 グッドデザイン地震警報システム 早期地震警報システム 震度番, <https://www.g-mark.org/gallery/winners/9d6836d7-803d-11ed-862b-0242ac130002> (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-12) 他谷周一, 荒鹿忠義, 中嶋繁:「東海道新幹線の早期地震警報システムの構築」, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, Vol.60, 1-653 (2005)
- 5-13) 小高俊一, 芦谷公稔, 東田進也, 佐藤新二, 大竹和生, 野坂大輔:「早期地震検知における震央距離とマグニチュードの新しい推定方法 (1) 原理」, 地球惑星関連学会 2001 予稿集, Sp-010 (2001)
- 5-14) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 佐藤新二, 大竹和生, 野坂大輔:「早期地震検知における震央距離とマグニチュードの新しい推定方法 (2) 気象庁津波地震早期検知網データへの適用」, 地球惑星関連学会 2001 予稿集, Ss-P003 (2001)
- 5-15) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 上垣内修, 干場充之:「P 波初動部の平均的傾きの距離に伴う減少について」, 日本地震学会 2002 年秋季大会予稿集, 124 (2002)
- 5-16) 他谷周一, 芦谷公稔:「早期警報用地震計の機能向上のための検討」, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, 687-688 (2003)
- 5-17) 若森吉邦, 杉崎英司, 他谷周一, 中嶋繁:「東海道新幹線地震防災の機能強化について」, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, Vol.62, 4-331 (2007)
- 5-18) 中村豊:「総合地震防災システムの研究」, 土木学会論文集, No.531/I-34, 1-33 (1996)
- 5-19) 馬場隆徳, 他谷周一, 中嶋繁, 荒鹿忠義:「地震発生後の運転規制判断の適正化の検討」, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, Vol.62, 4-330 (2007)
- 5-20) 中嶋繁, 他谷周一, 片岡建人:「地震時安全性向上のための広域警報導入と計測震度による運転規制の効果」, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 第 4 部, Vol.65, 633-634, IV-317 (2010)
- 5-21) 東海旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2012.04.23, 東海道新幹線 地震防災システムの機能強化について, https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000014824.pdf (2025年8月30日閲覧)
- 5-22) 他谷周一:「東海道新幹線地震防災システム機能強化」, JREA, Vol.56, 3779-37800 (2013)
- 5-23) 東海旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2017.10.30, 東海道新幹線における地震検知の早期化について, https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000035513.pdf (2025年8月30日閲覧)
- 5-24) 鉄道総合技術研究所, News Release 2019.2.18, 新しい新幹線用早期地震検知・警報アルゴリズムによる警報時間の短縮と推定精度の向上, https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000a3c3-att/20190218_001.pdf (2025 年 8 月 30 日閲覧)
- 5-25) 東海旅客鉄道株式会社, 安全報告書 2024, <https://company.jr-central.co.jp/others/report/> (2025 年 8 月 30 日閲覧)
- 5-26) 気象庁, 地震防災及び地震情報等の高度利用に関する気象庁・東海旅客鉄道株式会社・公益財団法人鉄道総合技術研究所による産学官連携について令和 4 年 8 月 25 日, https://www.jma.go.jp/jma/press/2208/25a/220825_CJRC-RTRI-joint-research.html (2025年10月2日閲覧)
- 5-27) 東海旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2022.8.25, 地震対策の強化に向けた取り組みについて, https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000042215.pdf (2025 年 8 月 30 日閲覧)
- 5-28) 高山昭, 江本祐橘, 阿部英彦, 中村豊:「地震動早期検知システムの研究—新幹線の安全のために—」, 土木学会誌, Vol.66, No.5, 51-56 (1981)
- 5-29) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2023.12.5, 地震発生時に新幹線をさらに早く緊急停止させます～新幹線早期地震検知システムの改良～, https://www.jreast.co.jp/press/2023/20231205_ho03.pdf (2025 年 8 月 31 日閲覧)
- 5-30) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2005.10.19, 大規模地震に対する当社の取り組みについて, https://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/index.html (2025年8月31日閲覧)
- 5-31) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2005.10.19, 大規模地震に対する当社の取り組みについて (資料 3: 新幹線早期地震検知システムの改良等について, 別紙: 新幹線早期地震検知システムの改良等について), https://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/pdf/3_1.pdf (2025年8月31日閲覧)
- 5-32) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2005.10.19, 大規模地震に対する当社の取り組みについて (資料 3: 新幹線早期地震検知システムの改良等について), https://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/no_3.html (2025 年 8 月 31 日閲覧)
- 5-33) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2013.3.5, 大規模地震に対する取り組みについて, <https://www.jreast.co.jp/press/2012/20130307.pdf> (2025 年 8 月 31 日閲覧)
- 5-34) 東日本旅客鉄道株式会社, ニュースリリース 2017.10.3, 海底地震計情報の活用等による早期地震検知体制の強化について, <https://www.jreast.co.jp/press/2017/20171019.pdf> (2025 年 8 月 31 日閲覧)
- 5-35) 山本俊六, 野田俊太, 是永将宏:「P 波初動部の立ち上がり特性に着目した震央距離推定手法」, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, 5-10 (2012)
- 5-36) 東日本旅客鉄道株式会社, JR 東日本ニュース 2019.1.18, 新幹線早期地震検知システムへの海底地震計情報の追加導入について, <https://www.jreast.co.jp/press/2018/20190110.pdf> (2025 年 8 月 31 日閲覧)
- 5-37) 公益社団法人土木学会, 土木学会賞受賞 事業・技術紹介, 技術開発賞 2012 年 (平成 23 年度) 新幹線早期地震検知システム, https://www.jsce.or.jp/prize/tech/files/2012_23.shtml (2025 年 10 月 1 日閲覧)
- 5-38) 東日本旅客鉄道株式会社, JR 東日本ニュース 2025.9.9, 在来線地震時運転規制における社外地震計情報の活用～地震発生を早く検知し, 早く停車するシステムの実

- 現～, https://www.jreast.co.jp/press/2025/20250909_ho02.pdf (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-39) 中村豊:「早期検知と脱線」, 地震工学研究発表会報告集, Vol.28, 115, 1-11 (2005)
- 5-40) 航空・鉄道事故調査委員会:「鉄道事故調査報告書 I 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故」, 平成 19 年 11 月 30 日 (2007)
- 5-41) S. Yamamoto, M. Tomori: “Earthquake Early Warning System for Railways and Its Performance”, *Journal of JSCE*, Vol.1, 322-328 (2013)
- 5-42) 東京メトロ, 営業状況, www.tokymetro.jp/corporate/enterprise/passenger_rail/transportation/lines/index.html (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-43) 渡邊正美, 菅原孝男, 石黒宏一, 佐藤勉:「鉄道における地震発生後の早期運転再開に向けた小型地震計の設置について」, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 4-350 (2006)
- 5-44) 佐藤浩幸, 山下清貴, 森園和徳:「東京地下鉄の地震対策 地震発生後の早期運転再開をめざしたエリア地震計」の導入, 土木施工, 48 巻, 1 号, 49-52 (2007)
- 5-45) 東京地下鉄株式会社:「社会環境報告書 2007」(2007)
- 5-46) 国土交通省, 大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会:「大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会報告書」(2012)
- 5-47) 東京地下鉄株式会社:「安全報告書 2012」(2012)
- 5-48) 東京地下鉄株式会社:「安全報告書 2013」(2013)
- 5-49) 東京地下鉄株式会社:「社会環境報告書 2011」(2011)
- 5-50) 東京地下鉄株式会社:「安全報告書 2025」(2025)
- 5-51) Osaka Metro, 会社概要, https://www.osakametro.co.jp/company/company_profile/kaisya_gaiyou.php (2025 年 9 月 25 日閲覧)
- 5-52) Osaka Metro, 大阪府交通局 2015 地下鉄・ニュートラム安全報告書, https://www.osakametro.co.jp/safety/library/h27_anzen-hokoku/all.pdf (2025 年 9 月 1 日閲覧)
- 5-53) 佐藤勉, 中村豊, 齋田淳, 八木義晴:「2018 年大阪府北部の地震における Osaka Metro 地震計システムの動作と被害地域の震動特性について」, 日本地震工学会・大会-2019 梗概集 (2019)
- 5-54) Osaka Metro, Osaka Metro 2024 年度安全報告書, https://www.osakametro.co.jp/safety/safety_report/2024_anzenhoukoku.php (2025 年 9 月 5 日閲覧)
- 5-55) 国土交通省, 大阪府北部を震源とする地震について (第 3 報), <https://www.mlit.go.jp/common/001238993.pdf> (2025 年 9 月 4 日閲覧)
- 5-56) 東北楽天ゴールデンイーグルス, <https://www.rakuten eagles.jp/stadium/exit/> (2025 年 10 月 2 日閲覧)
- 5-57) 札幌ドーム:「CSR レポート 2012」(2012)
- 5-58) 朝日新聞夕刊, 2008 年 5 月 17 日付
- 5-59) Allen, R. M. and D. Melgar: “Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs”, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 47, 361-88 (2019)
- 5-60) Allen, R. M. and H. Kanamori: “The potential for earthquake early warning in southern California”, *Science*, 300 (5620), 786-789 (2003)
- 5-61) Kanamori, H., E. Hauksson, and T. Heaton: “TERRAScope and CUBE Project at Caltech”, *EOS*, 72, 564-565 (1991)
- 5-62) Hutton, K., J. Woessner, and E. Hauksson: “Earthquake Monitoring in Southern California for Seventy-Seven Years (1932-2008)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (2), 423-446 (2010)
- 5-63) Gee, L. S., D. Neuhauser, D. Dreger, M. Pasyanos, R. Uhrhammer, and B. Romanowicz: “Real-Time Seismology at UC Berkeley: The Rapid Earthquake Data Integration Project”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 936-945 (1996)
- 5-64) Hauksson, E.: “The Northridge Earthquake and the Earthquake Deficit”, *Engineering and Science*, 57 (4), 12-22 (1994)
- 5-65) 中村豊, 新谷恒章:「ユレダスによるノースリッジ地震群のリアルタイムモニター」, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部, Vol.49, 1492-1493 (1994)
- 5-66) Mori, J.: “TriNet: Seismic and Strong-motion Recording in Southern California”, *地震学会ニュースレター*, Vol.11, No.2, 18-21 (1999)
- 5-67) Hauksson, E., P. Small, K. Hafner, R. Busby, R. Clayton, J. Goltz, T. Heaton, K. Hulton, H. Kanamori, J. Polet, D. Given, L. Jones, and D. Wald: “Southern California Seismic Network: Caltech/USGS Element of TriNet 1997-2001”, *Seismological Research Letters*, 72 (6), doi.org/10.1785/gssrl.72.6.690, 690-704 (2001)
- 5-68) Wald, D., V. Quitoriano, T. Heaton, H. Kanamori, C. Scrivner, and C. Worden: “TriNet ShakeMaps: Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California”, *Earthquake Spectra*, 15 (3), 537-55 (1999)
- 5-69) Lux, A. I., D. Smith, M. Böse, J. McGuire, J. Saunders, M. Huynh, I. Stubbailo, J. Andrews, G. Lotto, B. Crowell, S. Crane, R. Allen, D. Given, R. Hartog, T. Heaton, A. Husker, J. Marty, L. O’ Driscoll, H. Tobin, S. McBride, and D. Toomey: “Status and Performance of the ShakeAlert Earthquake Early Warning System: 2019-2023”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114 (6), doi.org/10.1785/0120230259, 3041-3062 (2024)
- 5-70) Böse, M., C. Felizardo, and T. Heaton: “Finite-Fault Rupture Detector (FinDer): Going Real-Time in Californian ShakeAlert Warning System”, *Seismological Research Letters*, 86 (6), doi.org/10.1785/0220150154, 1692-1704 (2015)
- 5-71) Crowell, B. W., D. Schmidt, P. Bodin, J. Vidale, J. Gomberg, J. Hartog, V. Kress, T. Melbourne, M. Santillan, S. Minson, and D. Jamison: “Demonstration of the Cascadia G-FAST geodetic earthquake early warning system for the Nisqually, Washington, earthquake”, *Seismological Research Letters*, 87 (4), doi.org/10.1785/0220150255, 930-943 (2016)
- 5-72) 和泉正哲 (研究代表者):「1985 年 メキシコ地震に関する調査研究」, 文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害研究成果報告書 (1986)
- 5-73) 三雲健:「2003 年メキシコ・コリマ州の大地震」, なみふる, No.37, 4-5 (2003)
- 5-74) Espinosa-Aranda: “Mexico City Seismic Alert System”, *Seism. Res. Let.*, Vol.66, No.6, 42-53 (1995)
- 5-75) 中村豊:「世界最初の実用 P 波警報システム「ユレダス」の現状と将来」, 第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 107-112 (2000)
- 5-76) 正木和明:「1999 年メキシコ・テウアカン地震におけるプエブラ市地震被害調査」愛知工業大学研究報告, 第 35 号 B, 97-102 (2000)
- 5-77) Espinosa-Aranda, J. M., A. Cuellar, A. Garcia, G. Ibarrola, R. Islas, S. Maldonado, and F. Rodriguez: “Evolution of the Mexican Seismic Alert System (SASMEX) Available to Purchase”, *Seism. Res. Let.*, 80 (5), 694-706 (2009)
- 5-78) Espinosa-Aranda, J. M., A. Cuéllar, G. Ibarrola, R. Islas, A. García, F. Rodríguez, and B. Frontana: “The Seismic Alert System of Mexico (SASMEX) and their Alert Signals broadcast results”, *15WCEE, Paper ID:1455* (2012)
- 5-79) Suárez, G.: “The Seismic Early Warning System of Mexico (SASMEX): A Retrospective View and

- Future Challenges”, *Front. Earth Sci.*, Vol.10, 2022, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.827236> (2022)
- 5-80) Wu, Y-M., N-C. Hsiao, W. Lee, T. Teng, and T-C. Shin: “State of the art and progresses of early warning system in Taiwan”, *Earthquake Early Warning Systems*, Springer-Verlag, 283-306 (2007)
- 5-81) Wu, Y-M., N-C. Hsiao, T-L. Chinc, D-Y. Chenb, Y-T. Chana and K-S. Wangd: “Earthquake early warning systems in Taiwan”, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-35344-4_99 (2013)
- 5-82) Wu, Y-M., H. Mittal, D-Y. Chen, T-Y. Hsu, and P-Y. Lin: “Earthquake Early Warning Systems in Taiwan: Current Status”, *J. Geol. Soc. India*, 97, 1525-1532, doi: 10.1007/s12594-021-1909-6 (2021)
- 5-83) Wu, Y-M. and Teng T-L: “A virtual sub-network approach to earthquake early warning”, *Bull Seismol Soc Am*, 92, 2008-2018 (2002)
- 5-84) Wu, Y-M., T-C. Shin; and Y-B. Tsai: “Quick and reliable determination of magnitude for seismic early warning”, *Bull Seismol Soc Am*, 88, 1254-1259 (1998) .
- 5-85) Shin, T. C., K. Kuo, W. Lee, T. Teng, and Y. Tsai: “A Preliminary Report on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake”, *Seis. Res. Let.*, 71 (1) , 24-30, doi. org/10.1785/gssrl.71.1.24 (2000)
- 5-86) Wu, Y-M. and H. Kanamori: “Rapid assessment of damaging potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P Waves”, *Bull Seismol Soc Am*, 95, 1181-1185 (2005)
- 5-87) Allen, R. M. and D. Melgar: “Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs”, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 47, 361-88(2019)
- 5-88) Wenzel, F., M. Oncescu, M. Baur, F. Fiedrich, and C. Ionescu: “25 Seconds for Bucharest”, *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*, Springer, doi. org/10.1007/978-3-642-55903-7_61, 471-477 (2003)
- 5-89) Clinton, J., A. Zollo, A. Marmureanu, C. Zulfikar, and S. Parolai: “State-of-the-art and future of earthquake early warning in the European region”, *Bull. Earthq. Eng.*, 14 (9), 2441-2458 (2016)
- 5-90) Satriano, C., L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo, and G. Iannaccone d: “PRESTo, the earthquake early warning system for southern Italy: concepts, capabilities and future perspectives”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31, 137-153 (2010)
- 5-91) Erdik, M., Y. Fahjan, O. Ozel, H. Alcik, A. Mert, and M. Gul: “Istanbul earthquake rapid response and the early warning system”, *Bull Earthq Eng*, 1, 157-163 (2003)
- 5-92) Zollo, A., G. Iannaccone, M. Lancieri, L. Cantore, V. Convertito, A. Emolo, G. Festa, F. Gallovič, M. Vassallo, C. Martino, C. Satriano, and P. Gasparin: “Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation”, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol.36, L00B07, doi:10.1029/2008GL036689 (2009)
- 5-93) Ladina, C., S. Marzorati, A. Amato, and M. Cattaneo: “Feasibility Study of an Earthquake Early Warning System in Eastern Central Italy”, *Front. Earth Sci.*, 9:685751., doi: 10.3389/feart.2021.685751 (2021)
- 5-94) <https://www.euronews.com/travel/2025/07/15/romenaples-railway-line-gets-earthquake-early-warning-system-that-stops-trains-automatic> (2025 年 8 月 17 日閲覧)
- 5-95) Kumar, A., H. Mittal, B. Chamoli, A. Gairola, R. Jakka, and A. Srivastava: “Earthquake early warning system for Northern India”, *Proceedings of the 15th Symposium on Earthquake Engineering*, 231-238(2014)
- 5-96) Sheen, D-H., J-H. Park, H-C. Chi, E-H. Hwang, I-S. Lim, Y. Seong, and J. Pak: “The First Stage of an Earthquake Early Warning System in South Korea”, *Seismological Research Letters*, Vol.88, No.6, 1491-1498 (2017)
- 5-97) Schlesinger, A., J. Kukovica, A. Rosenberger, M. Hee semann, B. Pirenne, J. Robinson, and M. Morley: “An Earthquake Early Warning System for Southwestern British Columbia”, *Frontiers in Earth Science*, 9, DOI: 10.3389/feart.2021.684084 (2021)
- 5-98) <https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/eeew-asp/system-en.php> (2025 年 8 月 15 日閲覧)
- 5-99) Jin, X., Y. Wei, J. Li, H. Zhang, Q. Ma, and L. Kang: “Progress of the earthquake early warning system in Fujian, China”, *Earthq Sci*, 26 (1) , DOI 10.1007/s11589-013-0030-3, 3-14 (2013)
- 5-100) Zhang, H. and X. Jin: “Probabilistic earthquake early warning times in Fujian Province”, *Earthq Sci*, 26 (1) , DOI 10.1007/s11589-013-0004-5, 33-41 (2013)
- 5-101) Nof, R. N., I. Lior, and I. Kurzon: “Earthquake Early Warning System in Israel—Towards an Operational Stage”, *Front. Earth Sci.*, 9:684421, doi: 10.3389/feart.2021.684421 (2021)
- 5-102) https://www.timesofisrael.com/israel-gets-new-earthquake-warning-system-sends-alert-within-seconds-of-1st-tremor/?utm_source=chatgpt.com (2025 年 8 月 17 日閲覧)
- 5-103) Medina, M., R. Sanchez, S. Riquelme, M. Flores, P. Koch, F. Bravo, S. Barrientos; I. Henson, A. C. Melgar, C. Mpodozis, M. Hellweg, and R. Allen: “An Earthquake Early Warning System for Northern Chile Based on ElarmS-3”, *Seismol. Res. Lett.*, 93, doi: 10.1785/0220210331, 3337-3347 (2022)
- 5-104) Massin, F., J. Clinton, and M. Böse: “Status of Earthquake Early Warning in Switzerland”, *Front. Earth Sci.* 9:707654, doi: 10.3389/feart.2021.707654 (2021)
- 5-105) Orihuela, B., I. Dallo, J. Clinton, W. Strauch, M. Protti, R. Yani, G. Marroquín, J. Sanchez, F. Vega, M. Marti, F. Massin, M. Böse, and S. Wiemer: “Earthquake early warning in Central America: The societal perspective”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103982, Vol.97, (2023)
- 5-106) Allen, R.M., A. Barski, M. Berman R. Bosch, Y. Cho, X.S. Jiang, Y.L. Lee, , S. Malkos, SM. Mousavi, P. Robertson, B. Spooner, M. Stogaitis, N. Thiruverahan, and G. Wimpey: “Global earthquake detection and warning using Android phones”, *Science*, Vol.389, Issue 6757, DOI: 10.1126/science.ads4779, 254-259 (2025)
- 5-107) <https://research.google/blog/android-earthquake-alerts-a-global-system-for-early-warning/> (2025 年 8 月 17 日閲覧)
- 5-108) 特公昭 60-008468 (特許第 1285667 号), 「地震早期検知警報システム」
- 5-109) 特公昭 60-014315 (特許第 1291223 号), 「地震早期検知警報システム」
- 5-110) 特公昭 60-014316 (特許第 1291229 号), 「地震早期検知警報システム」
- 5-111) 特許第 3890366 号, 「地震警報システム」

6 | おわりに

本系統化調査は「早期地震警報システム」に主眼を置いたものであるが、この技術は突然発生したのではなく、これまでの長きにわたる地震観測、そして、なにより人命、財産や社会基盤を地震から守るための地震防災の歴史の中で、地震警報を少しでも迅速かつ確なものにしようとする地震学者、地震工学者の研究開発にける熱意と不断の努力によって生まれてきたものである。このことを伝えるため、本報告では地震計や地震そのものに関する研究の歴史などについても概括し、早期地震警報システムがどのようにして生まれ、そして発展してきたか、その歴史の変遷を辿ることができるような構成とした。

地震防災の基本は、想定される地震に襲われても施設や社会そのものが耐えうるようにすることである。しかし、前もって十分な耐震化を施したとしても、大きな地震時は、老朽化による要因や予期しない事象で被災することは多々ある。早期地震警報システムはそのような事態に対処するための技術であり、被害を軽減するための1つのアイデアである。早期地震警報システムによる警報は迅速さが生命線であり、警報が必要な地域に間に合うことに意味がある。多少の誤差があっても被災する可能性がある地域に対して素早く警報を出し、危険性が低いことが確認できたら直ちに警報を解除するシステムが望ましい。

このような早期地震警報システムの効果に着目し必要性を認識したのが、世界初的高速鉄道である新幹線を運行する国鉄であった。大量輸送を行う鉄道は、高速になるほど地震発生時の危険性が増大する。地震発生時は、極力動的な状態から安定する方へ移行させ、被害を防止または軽減させなければならない。当時の国鉄は、まずは震源近くに地震計を設置し地震を検知する前線警報を整備し、その後、初期微動を検知し、出来るだけ大きく揺れだす前に警報を出力する早期地震検知警報システム「ユレダス」の実用化に至った。現在も、国鉄を継承するJRを含む鉄道各社は改良を続け、利用者の安全性をより高める努力が行われている。

新幹線での経験を持つJRと気象庁の共同研究から始まった緊急地震速報は、日本国内における早期地震情報として定着し、多種多様な方法で一般の人々に提供されている。従前は鉄道や産業の中で限定的に利用されていた早期地震警報システムが緊急地震速報として一般の人々にも提供され、身近に活用できる地震

情報として広まったことは、日本国民の地震防災への関心の向上にも繋がった。

世界の中でも他に類を見ない地震観測網を利用した緊急地震速報ではあるが、地震のような広範囲に広がる突発的な災害に対し、中央から一元的に通達される情報に頼ることはいざという時に機能しない危険性もある。まず、大地震時のような異常事態の中では、大きなネットワークを介する情報伝達は不達の可能性が心配される。また、情報が到達したとしても、既に大きな揺れに襲われている場合もあるだろう。私たちは、想定外の場面に遭遇する可能性があることを理解し、予期せず突然襲来する「その時」に備えなければならない。その時に、適切な対応を迅速かつ合理的に行うことが自身を守ることになる。

国外に目を向けると、1990年代にメキシコや米国などで始まった早期地震警報システムの実用化は、2000年以降、複数の地震国でも整備が進められた。現在、各国独自に構築されたシステムではあるが、その技術を遡ると一部はユレダスに起因するものもある。1980年初頭に開発されたユレダスであるが、40年を経た今もその理念や技術が世界中のシステムに現役で貢献していることに驚きを感じる。巨大IT企業による早期地震警報の提供サービスが瞬く間に多くの国々に展開された状況は、まさに近年の高度情報化の波が高速で伝播した様子を示しているが、その中でもユレダスの開発当初からの技術が脈々と使われているのを見ると、『地震の情報を伝えるのがP波であり、地震の力を伝えるのがS波である地震波にも似ているかも』と、ふと想像したりもする。

早期地震警報システムの技術開発の歴史や有効性と実績を紹介してきた本報告であるが、地震時に被災しないためにも、また減災につなげるためにも、強調して述べておきたいことがある。大きな地震動は突発的に襲ってくる。列車や機器の制御に対しては、早期地震情報は到達と共に直ちに活用ができる情報ではあるが、人間の場合は、正常性バイアスなどにより、よほど訓練をしておかないと躊躇してしまうことが多々ある。私たち人間の行動を考えると、与えられる情報のみに頼ることにより、被災へのリスクが高まる場合があることを十分認識する必要がある。まずは自分自身で地震の監視を怠らずに状況把握を行うと共に、そこへ外部情報も加味し、自身がとるべき適切な行動をする「自律防災」が重要となる。

最後に、本報告の執筆を進めていた主任調査員の中村豊は、原稿完成前に急逝された。本報告は、株式会社システムアンドデータリサーチの佐藤勉と齋田淳が中心となり、中村が遺した原稿や資料をもとにまとめたものである。中村は早期地震警報システムの分野で数多くの論文を発表し、その業績は日本のみならず世界でも広く引用されている。また地震防災の観点から、地盤や構造物が持つ地震に耐える力や健全性の判定に関しても研究を続けてきた。特に常時微動という、絶えずどこにでも生じている非常に小さな振動を利用した研究でも多数の成果を残している。その中

でも H/V スペクトルという振動波形の水平動と上下動のスペクトル比を使って振動特性を明らかにする方法は、中村スペクトルや「Nakamura Method」などとも呼ばれ、世界各所で広く適用され、早期地震警報システムと共に大きな功績である。あらためて故人の数々の業績に敬意を表するとともに、衷心よりその眠りが安らかであることをお祈りする。

※本報告書に掲載している製品名やサービスの名称の一部は、各社・団体の登録商標である。

謝辞

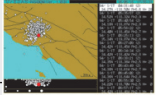
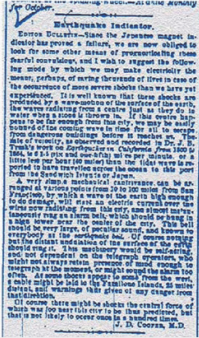
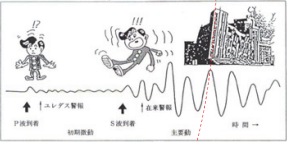
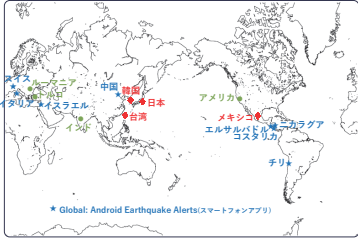
本稿をまとめるにあたり、多くの方々から資料や情報、有用なご示唆を頂きました。この場を借りて深く謝意を表します。特に以下の方々からは、内容についてのご示唆、システムの構成や動作状況、写真や図版など、多岐にわたるご教示、ご協力を頂きました。記して深く感謝いたします。

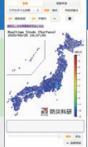
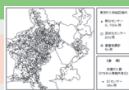
カリフォルニア工科大学 名誉教授 金森博雄様
Yih-Min Wu Professor,
Department of Geosciences,
National Taiwan University
東京科学大学 環境・社会理工学院 教授 松岡昌志様
東京ガスネットワーク株式会社
技術革新部技術研究所
主席技術者 基盤技術チームリーダー 小林実央様
防災・供給部 防災グループ
防災チームリーダー 主席 佐治亮宏様
東北工業大学 名誉教授 神山 眞様
東京消防庁 装備部長 伊藤幸永様
帝国繊維株式会社
業務品質管理部 品質管理室 室長 牧嶋由亘様
株式会社 ANET 代表取締役 山本俊六様
東京地下鉄株式会社
鉄道本部 工務部 土木課 課長補佐 佐藤浩幸様
課長補佐 大藤正和様
鉄道本部 工務部 土木工事所 土木第二課
主任 田中大介様
統括工務係 井上珠希様

元東京地下鉄株式会社
鉄道本部 安全・技術部 部長 渡邊正美様
東京臨海高速鉄道株式会社
運輸部 施設担当課長 菊地圭介様
株式会社楽天野球団
コーポレート本部 スタジアム部 部長 山縣大介様
コーポレート本部 スタジアム部
ボールパーク開発グループ
マネージャー 加茂あゆみ様
株式会社札幌ドーム 営業担当部長 久末隆志様
株式会社ジャパンセミコンダクター
ファクトリーオートメーション技術部
大分ファクトリー生産技術担当
グループ長 佐藤城治様
総務部 大分総務担当 グループ長 原岡 明様
公益財団法人鉄道総合技術研究所
東海旅客鉄道株式会社
東日本旅客鉄道株式会社
気象庁

なお、本報告書の図 2.1 および図 2.8 は、執筆途中で急逝された中村豊氏のご子息(中村和延様)に描いて頂きました。また、図 4.5 は中村豊氏本人による描画です。画才も柔和な作風も、父から子へ伝わっている様子が見て取れます。これも技術の継承の一つのようにも感じられます。

早期地震警報システムの系統図

年代	～1900年	1900年～1980年	1990年
主な出来事/早期地震警報システムに影響を与えた地震	・1880年 地震学会(初代)設立 ・1891年 濃尾地震(M8.0) 国内最大の inland 地震	・1923年 関東地震(M7.9)「関東大震災」 ・1960年 強震年報刊行 ・1964年 東海道新幹線開業 ・1982年 東北新幹線開業	・1992年 東海道新幹線「のぞみ」運転開始 ・1994年 ノースリッジ地震(Mw6.7) 
国/公共機関	[国内] ・1875年 東京気象台:地震業務を開始 ・1884年 内務省:全国的な震度観測開始  パルミエリ地震計 [国外] ・1961年 米国:WWSSN ・1984年 GSN	・1956年 気象庁:発足 ・1956年 パルミエリ地震計による観測開始 ・1958年 気象庁:87型電磁式強震計観測開始 ・1962年 港湾技術研究所 港湾地域強震観測開始 ・1955年 日本国有鉄道:地震計の整備を開始 →民営化後はJR各社で整備 	・1991年 気象庁:計測震度計の運用を開始
センサー/地震計/地震観測(民間)	・132年 候風地動儀 世界初の地震計(感震器) 	・1932年 USGS Standard型強震計 ・1953年 SMAC型強震計  SMAC型強震計	・1994年 関西地震観測研究協議会 ・1994年 東京ガス:SIGNAL
早期地震警報システム	・1868年 クーパーによる早期地震警報のアイデア  当時の新聞記事	・1972年 伯野らによる「10秒前大地震警報システム構想」 ・1983年 鉄道総合技術研究所:UrEDASプロトタイプ完成 ・1988年 青函トンネルUrEDAS ・1982年 東北新幹線:海岸線検知システム稼働   	[国内] 製品/サービス ・1992年 鉄道総合技術研究所:UrEDAS実用開始  導入事例 ・1992年 東海道新幹線:UrEDAS運用開始 ※世界初のP波地震警報が実用化される ・1990年:UrEDAS限定利用  総合指令所
			[国外] ・1991年 メキシコ:SAS, SASMEX ・1991年 米国:CUBE ・1993年 REDI  * Global: Android Earthquake Alerts(スマートフォンアプリ)

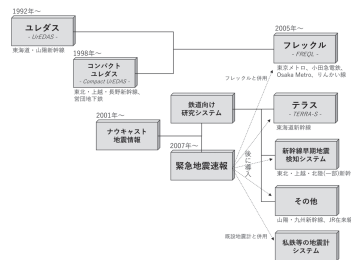
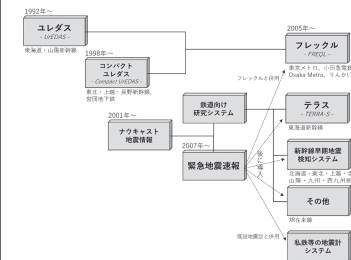
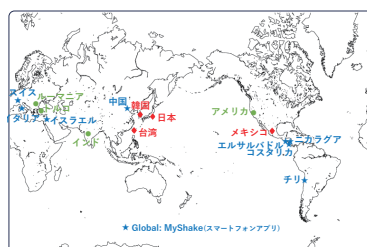
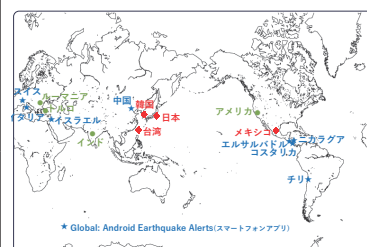
1995年	2000年	2005年	2010年～
・1995年 兵庫県南部地震(M7.3) 「阪神・淡路大震災」 	・2003年 メキシコ・コリマ地震(Mw7.8) ・2004年 新潟県中越地震(M6.8) 走行中の新幹線が脱線 土砂崩落で親子が被災	・2005年 千葉県西北部の地震(M6.0) 	・2011年 東北地方太平洋沖地震(Mw9.0) 「東日本大震災」 ・2018年 大阪北部の地震(M6.1) 北海道胆振東部地震(M6.7) 
・1996年 気象庁:計測震度計へ切換え (震度の自動計測化) 	・2001年 気象庁および鉄道総合技術研究所 :ナウキャスト地震情報	・2004年 :緊急地震速報試験運用開始 ・2007年 :緊急地震速報一般向け運用開始	
多機能型地震観測装置			
港湾技術研究所:港湾地域強震観測			
・1996年 防災科学技術研究所 地震観測網 :K-NET	・1997年 :KiK-net, Hi-net, F-net		強震モニタ
米国:GSN			
関西地震観測研究協議会			
東京ガス: SIGNAL	・2001年 SUPREME 		
鉄道総合技術研究所:UrEDAS			
・1998年 Compact UrEDAS稼働 (1997年システムアンドデータリサーチ開発) 		・2005年 システムアンドデータリサーチ:FREQL開発・運用開始 ※東京消防庁のアイデアから開発される ・2005年 システムアンドデータリサーチ:可搬型FREQLリリース ・2007年～ 様々な可搬型システムがリリース   	
・2001年 気象庁・鉄道総研 :ナウキャスト地震情報 ・2004年 :緊急地震速報 試験運用開始 ・2007年 :緊急地震速報 一般向け運用開始			
・1996年 山陽新幹線:UrEDAS運用開始 - 東海道新幹線:UrEDAS	・2005年 TERRA-S稼働 ・2008年 緊急地震速報導入		
・1998年 東北・上越新幹線:Compact UrEDAS運用開始	・2004年新潟県中越地震 上越新幹線のCompact UrEDASが直ちに大きな揺れを予測し緊急停止信号出力	・2006年 新たな新幹線早期地震検知システムへ改良 ・2012年 緊急地震速報導入	
・1997年 営団地下鉄:Compact UrEDAS設置 ・2000年 早期警報機能を導入 	・2007年 東京メトロ :FREQLへ改良、 緊急地震速報運用開始	・2011年 東日本大震災 緊急地震速報が有効に機能する ・2014年 OsakaMetro FREQL設置 ・2018年大阪北部地震 FREQLが有効に機能する	
メキシコ:SAS, SASMEX			
米国: ・1997年 TriNET ・2006年 CISON, ElarnS ・2007年 ShakeAlert			
			・2021年 Google:Android Earthquake Alerts開始

早期地震警報システムの系統化調査 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	製作年	製造社	所在地	選定理由
1	SMAC-A 型強震計	1953 年	株式会社明石製作所 (設計：標準強震計試 作試験研究委員会)	東京大学 地震研究所 地震計博物館	日本で最初に開発された強震計。それまでの地震計は、大きな揺れが計測できず、記録が振り切れてしまうことがあった(例えば、1923 年の関東地震では震源に近い地震計の記録は振り切れている)。これを鑑み、被害地震の震動波形を必ず記録することを目指して、研究者と技術者から構成される委員会で設計された地震計であり、国内最初の量産型強震計。
2	早期地震検知警報システム UrEDAS (ユレダス)	1991 年	財団法人鉄道総合技 術研究所、東海旅客 鉄道株式会社	株式会社システム アンドデータ リサーチ	世界初の初期微動(P 波)による早期地震警報システム。それまでの地震計は、実際に計測された加速度の大きさから警報発令を行っていた。ユレダスは、1 台(単一観測点)で P 波初動の情報から、地震の規模(マグニチュード)、震央の方向、震央距離、震源の深さを同時に推定し、震央距離と地震規模の関係から被害が想定される地域に対し警報を発令した。1992 年の東海道新幹線「のぞみ」開業とともに実用化された。
3	早期警報地震計 Compact UrEDAS (コンパクトユレダス)	1998 年	株式会社システム アンドデータ リサーチ	株式会社システム アンドデータ リサーチ	世界で初めて被災した高速鉄道に運転制御を行った早期地震警報システム。2004 年新潟県中越地震において、震源近傍に設置されたコンパクトユレダスは P 波検知後直ちに大きな揺れになることを予測し、新幹線を緊急停止させる信号を出力した。これにより、震央域の新幹線全列車を緊急停止させた。このうち 1 列車は脱線したものの、対向列車が突入する危険性を抑止し死傷者無しに貢献した。
4	緊急地震速報	2004 年 (試験運用開始) 2007 年 (一般提供開始)	気象庁	気象庁	日本国内で一般向けに運用開始された早期地震警報システム。国内に整備された類のない大規模なシステムであり、身近に活用できる早期地震情報として日本国民の地震防災への関心の向上に繋がった。
5	早期地震警報システム 可搬型 FREQL	2005 年	株式会社システム アンドデータ リサーチ	株式会社システム アンドデータ リサーチ	大規模な土砂崩落現場での救助活動を経験した東京消防庁のアイデアから開発された早期地震警報システム。それまででない持ち運びができる機器構成で、被災地へ携帯し活動中の隊員の二次被害を防止するために活用される。その後、省令として規定され、全国の消防や警察などで導入が進められた。

「早期地震警報システムの系統化調査（2025 年度版）」

報告書冊子との相違点（正誤表）

ページ	段落	行	第 35 集 冊子版 2026 年 3 月	全文 PDF 版 2026 年 6 月 (正)
351	左	下から 21 行目	周波数レンジ 0.1 Hz ～ 30 Hz	周波数レンジを 0.1 Hz ～ 30 Hz
354	左	12 行目	1893 年	1883 年
358	左	下から 19 行目	東京大学生産研究所	東京大学生産技術研究所
368	左	10 行目	コンドルに	コンドルが
368	右	下から 16 行目	復興院及び	復興院理事及び
369	左	13 行目	地震力を水平震度 0.2 が	地震力として水平震度 0.2 が
373	コラム	16 行目	東京帝国大学	東京帝国大学
374	右	2 行目	書影の書影と	書影と
381	参考文献 右	6 行目	3-12) 菊池和幸	3-12) 菊池正幸
384	右	3 行目	20 分以下	120 分以下
387	左	6 行目	水平 2 方向と組み合わせ	水平 2 方向と上下方向を組み合わせ
397	右	12 行目	一辺約 15 cm の立方体	一辺約 12 cm の立方体
403	参考文献 左	16 行目	4-7) 菊池和幸	4-7) 菊池正幸
404	右	6 行目	対象施設に対する早期地震警報や地震情報の収集を行っている企業も存在する。	対象施設に対する早期地震警報や地震情報の収集を行っている企業も存在する。例えば新幹線では、全路線に自社の早期地震警報システムが導入されている。
404	図 5.1	図内右中央 図内右下	 東北・上越・北陸（一部）新幹線 山陽・九州新幹線、JR 在来線	 北海道・東北・上越・北陸・山陽・九州・西九州新幹線 JR 在来線
417	右	18 行目	東京メトロにおける	東京メトロにおける
417	右	20 行目	列車の制御すること	列車を制御すること
420	左	15 行目	揺れの大きさに応じて	揺れの大きさに応じて
422	左	8 行目	超えたと判断された場合に	超えると判断された場合に
423	図 5.53	図 5.53 図内中央下	 Global: MyShake	 Global: Android Earthquake Alerts
440	系統図	1900-1980 年 最下段 図		
436	左	下から 28 行目	5-89) John Clinton1, J.	5-89) Clinton1, J.
441	系統図	1995 ～ 2000 年 2 段目 (国/公共機関) 画像キャプション	多機能地震観測装置	多機能型地震観測装置