

世界の Earthquake Early Warning の調査 Study of Earthquake Early Warning Systems around the World

干場充之¹, 下山利浩²

Mitsuyuki HOSHIBA¹ and Toshihiro SHIMOYAMA²

(Received June 24, 2011: Accepted December 20, 2011)

1 はじめに

Earthquake Early Warning は、地震の発生をいち早く検知し、強く揺れ始める前に通知するものである。このアイデア自体は、1868 年の米国の Cooper によるレポート (Nakamura and Saita, 2007) や、また、日本においても 1884 年の J.ミルンの地震学会報告での記述までさかのぼる(東田, 2010)。日本では、実用化に向けた鉄道事業における先駆的な研究(中村, 1996)の後、1992 年から東海道新幹線への実運用が行われた (Nakamura and Saita, 2007)。さらにその後、気象庁と鉄道総合技術研究所との共同開発 (Odaka et al., 2004; 東田・他, 2004)、気象庁での技術開発 (Kamigaichi, 2004)、また、防災科学技術研究所での研究開発 (Horiuchi et al, 2005; Nakamura et al., 2009) を用いて、気象庁が 2007 年 10 月から一般向けに発表する緊急地震速報の業務を開始し、その運用が本格的に始まった (Hoshiba et al., 2008; Kamigaichi et al., 2009; Doi, 2011)。

一方、世界に目を向けると、メキシコにおいては、1993 年から一般向けの警報を発している (Espinosa Aranda, et al., 2009, 2011)。しかし、気象庁では、全国各地で発生する地震に対して全国各地を対象に警報を発するのに対して、メキシコでは特定の場所で発生する地震に対して、特定の都市を守るという思想で行われている(干場, 2011)。また、気象庁では、震源とマグニチュード (以下、M) を迅速に求め、それらに基づき震度予測を行うのに対して、メキシコでは、ある地震動レベルを超える観測点の個数で判断している。このように両者では、設計の考え方は異なっている。現在、世界各地で Earthquake Early

Warning の研究が行われているが、Earthquake Early Warning と同じ言葉で呼ばれていても、内容的には異なる場合も多い。

最近、Earthquake Early Warning に関する論文が、特集号や単行本の形で相次いで出版された。そこで、世界各地で Earthquake Early Warning の研究や運用の現状を把握するべく、気象研究所地震火山研究部第四研究室と地震火山部の緊急地震速報担当官で、「世界の緊急地震速報 (Earthquake Early Warning)」の勉強会を行ってきた。2010 年 2 月から 11 月までの 10 か月の間に、地域別に担当者を決め、計 6 回、論文紹介とそれに対する質疑応答という形で進めた。主に用いたテキストは、Geophysical Research letter の特集号 (2009, Vol. 36, No.5, L00B01~L00B08)、Seismological Research Letter の特集号 (2009, Vol. 80, No.5; Editors: Allen, Gasparini, Kamigaichi and Boese)、Journal of Disaster Research の特集号(2009, Vol. 4, No.4; Editor: Motosaka)および、単行本、“Earthquake Early Warning Systems (2007, Springer; Editors: Gasparini, Manfredi and Zschau)”である。

本稿は、その勉強会の報告を行うものである。世界の Earthquake Early Warning については、Allen et al.(2009)にも詳しく報告されているので、本稿では、それぞれの地域の特徴に注目して簡単に報告する。

なお、本稿では、“緊急地震速報”とは気象庁で行われているものを指すこととし、世界各地で行われているものを“Earthquake Early Warning”と記し、両者を区別することにする。

¹ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

² 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department
現所属: 内閣府

2 世界の Earthquake Early Warning の現状

表 1 は、この勉強会で行った内容をまとめたものである。現在、Earthquake Early Warning が運用、あるいは、研究されている主な国や地域は、日本以外では、台湾、メキシコ、米国、トルコ、イタリアである。

2.1 対象エリア

対象エリアは、国レベルから、都市レベルまでさまざまである。全国的レベルをターゲットにしているのは、日本以外には、台湾だけであるが、地域レベルということになると、カリフォルニアや南イタリアが該当する。一方、ある特定の都市のみを対象としているのは、メキシコのメキシコシティやオアハカ等と、トルコのイスタンブールが該当する。

2.2 開発のきっかけ

地震関係の研究は、大きな地震による被害がきっかけになることが多いが、Earthquake Early Warning も例外ではない。メキシコでは、1985 年 9 月の Michoacan 地震 (M:8.1) で、400km 離れたメキシコシティで被害があり、この Michoacan 地震の震源域の南側には、いわゆる地震空白域があることから、その対策として開発された。台湾では、1986 年 11 月の台湾東方沖の地震 (M:7.8) で、120km 離れた台北で被害が出たことがきっかけである。また、トルコでは、1999 年 8 月に、Kocaeli 地震 (M:7.4) が発生し、イスタンブールにも被害が出たが、Kocaeli 地震の西側には、やはり、地震空白域があることが、開発のきっかけとなっている。

2.3 運用の位置付けと運用・研究母体

現在、海外において実用段階と位置付けることができるのは、メキシコのみである。メキシコでは、日本の気象庁での運用より早く、1993 年から一般向けの警報が開始されている。また、台湾では、運用に入る前の実験段階と位置付けており (Wen et al, 2009)、2001 年から利用者を限定して Earthquake Early Warning を発している。メキシコ、台湾以外は、現在のところ、試験研究段階と位置付けられよう。なお、本稿では、実用段階とは、Earthquake Early Warning を受けたユーザーが危険回避のための何らかの行動 (あるいは、制御) をすることが期待され

る場合とした。将来の実用段階で母体になると想定される機関が、本格的な運用に入る前の試験をしている段階を「実験段階」、また、実用段階では別の母体が運用することが予想される場合、あるいは、必ずしも直接運用に入るわけではないと想定される場合を「試験研究段階」とした (ただし、運用の位置付けの考え方には、各国それぞれの事情があるので、この分類には著者の主観が入っている)。

実用段階と位置づけることができるメキシコでは、CIRES (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. ,地震観測登録センター)が運用を担っている。CIRES は、“Civil Organization”であり、政府組織でも民間でもなく、地方政府との契約により運営されている組織である (干場, 2011)。日本でいえば、地方の独立行政法人あるいは NPO に相当すると考えられる。メキシコでは、警報にあたる“Public Alert”は、TV やラジオで広く放送されるほか、予報にあたる“Preventive Alert”は、専用端末で受信することができる。実験段階と位置付けられる台湾では、中央気象台が運用を担っている。台湾中央気象台は行政機関であり、一般への警報といった実験段階後の運用が視野に入っていると思われる。台湾では、一般向けの警報発信を模索しているものの、現在は、前述の通り、限定された利用者に対する配信を行っている段階である。メキシコと台湾以外は、大学や研究機関の研究室で試験研究が行われており、いまのところ、情報の発表範囲も研究参加者などの研究者コミュニティ内に限定される。

2.4 基本的なロジック

Earthquake Early Warning には、大きく分けて 2 つの概念がある。1 つは、ネットワーク手法、もう 1 つは、オンサイト手法と呼ばれるものである。

ネットワーク手法は、地震観測網により、震源に近い観測点で地震波をとらえ、複数の観測点からの情報を処理するのが基本概念であり、震源や M を求め、それらの情報をもとに地震動予測を行うものが多い。一方、オンサイト手法は、地震計が設置されている単独観測点のその場所において、地震動があまり大きくない時点で、その後の地震動の大きさを予測しようというのが基本概念である。P 波と S 波の揺れの大きさの関係を経験式として求め、P 波の揺れから S 波部分を予測する考えのものが多い。ま

た、単独観測点でのP波初動部分の周期情報からMを推定している場合も多い。気象庁の緊急地震速報は、基本的にはネットワーク手法に基づいているが、一点での検知の時点から解析を行うB- Δ 法や、上下動が100galを超えた時点で予報を発する仕組みもあり、オンサイト手法の考えも取り入れているといえる。

台湾では、ネットワーク手法にオンサイト手法を併用することを試みている。メキシコのCIRESや米国のカリフォルニア大学バークレー校のグループ、カリフォルニア工科大学とその関連のグループ、トルコのボガジシ大学、イタリアのナポリ大学では、ネットワーク手法の研究を行っている。多くは、「震源とMを決め、それをもとに警報を発する」という考え方だが、メキシコのCIRESとトルコのボガジシ大学では、特定の場所で発生する地震に対して、特定の都市を守るという設計思想のもと、想定震源域直上、あるいは大都市までの経路上で地震波を捉え、「複数の観測点で振幅がある条件を超えると警報を発する」という考え方である。

一方、オンサイト手法としては、カリフォルニア工科大学などが研究を行っている。インスタンブルでSafer and EDIM研究グループが行っているSOSEWINは、都市内に観測点を高密度に展開し、数値を超えた観測点の割合で警報を発するという考えであり、オンサイト手法を基本としながらも、一部、ネットワーク手法の考えを取り入れていると位置付けられるかもしれない。

2.5 震源、マグニチュードの推定

ネットワーク手法では、震源とMを推定することが多い。震源の決定では、緊急地震速報のテリトリ法、グリッドサーチ法、着未着法で用いられているのと同様に、各観測点での地震波の着震時間を利用するケースが多いが、カリフォルニア工科大学とETH Zurichのグループは、PGA、PGVやPGD（地動最大加速度、速度、変位）といった振幅情報から震源位置を推定する試みを行っている。振幅分布をもっともよく説明する場所に震源を位置させるという考え方である。

緊急地震速報におけるMの推定は、振幅情報に基づいているが、世界的には、Mの推定に、 τ_c や τ_p^{\max} といった地震動の周期を示す指標を用いている場合

も多い。 τ_c や τ_p^{\max} を用いると、震源位置や震源距離の情報がなくてもMを求めることが可能なので、主に、オンサイト手法でのMの推定に用いられることが多いが、ネットワーク手法でも適用が研究されている。一般に、大きな地震になるほど、卓越周期が長周期になる性質を利用したものである。P波の着震から2~4秒程度の地震動を用いて、 τ_c や τ_p^{\max} を求めることが多い。ただし、2~4秒程度の地震動からは、Mの大きな場合には τ_c や τ_p^{\max} がMに対して飽和してしまい、Mの推定が過小評価になる、あるいは、ばらつきが大きい、といった反論もある（たとえば、Rydelek and Horiuchi, 2006）。なお、Hoshiba and Iwakiri(2011)は、2011年の東北地方太平洋沖地震では、 τ_c や τ_p^{\max} によるMの推定は、過小評価になることを報告している。

2.6 地震動の予測

オンサイト手法では、基本的にP波部分の地震動の情報からS波部分の地震動を予測するものである。P波部分の最初の数秒間の変位振幅、Pd、から、PGVを予測しているものが多い。

ネットワーク手法では、気象庁の方式と同様に、M、地震動の距離減衰式、サイトの増幅特性を用いて地震動（気象庁の場合は、震度）を予測しているものが多い。カリフォルニア工科大学とETH Zurichのグループでは、さらに、過去の地震活動やGutenberg-Richterの関係などの事前情報を組み込むことを考察している。また、カリフォルニア大学バークレー校のグループでは、地震動の実測値を見ながら距離減衰式の振幅項を補正するロジックを組み込んでいる。これにより、地震動予測は、経過時間が長くなると、推定したMにあまり依存しなくなり、実測値に近づくようになる。

3 おわりに

1節で述べた様に、現在、世界各地でEarthquake Early Warningの研究が行われており、Earthquake Early Warningと同じ言葉でよばれていても、内容的には異なる場合も多い。今回の勉強会のシリーズを通して、それぞれの国や地域、研究者の思想を調査することができた。また、これを通して、気象庁方式の世界の中での位置付けやユニークな点を考えることができた。さらには、英語論文を読み、それを

まとめ、プレゼンテーションと質疑応答することで、職員個々の能力向上にも貢献したと思われる。教育的な効果も少なくなかったと考えている。

なお、それぞれの報告時の資料は地震火山部地震津波監視課のサーバに保存されている。本稿よりさらに詳しい内容は、そちらを参照されたい。

謝辞

査読者の東田進也 福岡管区気象台地震情報官や編集者の尾崎友亮 津波予測モデル開発推進官、編集長の内藤宏人 評価解析官、さらには、齋藤誠 地震情報企画官からのコメントは、原稿を改定する際に大いに参考となった。また、本稿は表 1 にあるそれぞれの担当者が発表したものをまとめたものであり、著者以外にも、気象研究所の大竹和生主任研究官、岩切一宏研究官、地震火山部の清本真司技術専門官、山田安之技官がそれぞれ報告を担当した（担当者の役職は、2011 年 3 月現在のもの）。査読者、編集者、上記の職員、また、勉強会の質疑応答に参加頂いた方に感謝する。

なお、表 1 の内容に誤りや、また、そこに記した世界各地の状況に変化があり状況が変わったなど、ということがあれば、著者（あるいは、その後任者）まで一報いただけると幸いである。

文献

東田進也・小高俊一・芦谷公稔・大竹和生・野坂大輔 (2004): P 波エンベロープ形状を用いた早期地震緒元推定方法, 地震 2, **56**, 351-361.

東田進也 (2010): 揺れの予測情報—緊急地震速報の現状と今後—, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 91-94.

中村豊 (1996): 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, **531**, 1-33.

干場充之 (2012): メキシコの緊急地震速報の現状と将来展望—CIRES の Juan Manuel Espinosa Aranda 所長を招へいして—, 験震時報, **75**, 107-111.

Alcik, H., O. Ozel, N. Apaydin and M. Erdik (2009): A study on warning algorithm for Istanbul earthquake early warning system, Geophys. Res. Lett., **36**, L00B05, doi:10.1029/2008GL036659.

Allen, M. R., P. Gasparini, O. Kamigaichi and M. Boese (Editors) (2009): Special section: Earthquake Early

Warning, Seismol. Res. Lett., **80**, pp681-782.

Allen, M. R., P. Gasparini, O. Kamigaichi and M. Böse (2009): The status of Earthquake Early Warning around the world: An introductory overview, Seismol. Res. Lett., **80**, 682-693.

Böse, M., F. Wenzel and M. Erdik (2008): PreSEIS: A neural network-based approach to earthquake early warning for finite faults, Bull. Seismol. Soc. Amer., **98**, 366-382.

Doi, K. (2011): The operation and performance of Earthquake Early Warnings by the Japan Meteorological Agency, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **31**, 119-126.

Espinosa Aranda, J.M., A.Cuellar, G. Ibarrola, A. Garcia, S. Maldonado, F.H. Rodriguez (2009): Evolution of the Mexican seismic alert system (SASMEX), Seismological Research Letters, **80**, 694-706.

Espinosa Aranda, J.M., A.Cuellar, F.H. Rodriguez, B. Frontana, G. Ibarrola, R.Islas, A. Garcia (2010): The seismic alert system of Mexico (SASMEX), progress and its current applications, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **31**, 154-162.

Gasparini, P., G. Manfredi and J. Zschau (editors) (2007): Earthquake Early Warning Systems, Springer, pp1-349.

Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kaminuma and Y. Fujinawa (2005): An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, Bull. Seismol. Soc. Amer., **95**, 708-718.

Hoshiba, M., O. Kamigaichi, M. Saito, S. Tsukada and N. Hamada (2008): Earthquake early warning starts nationwide in Japan, EOS Trans, AGU, **89**, 73-74.

Hoshiba, M. and K. Iwakiri (2011): Initial 30 seconds of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (*M*_w 9.0)—amplitude and τ_c for magnitude estimation for Earthquake Early Warning—, Earth Planets Space, **63**, 553-557.

Iglesias, A., S.K. Singh, M. Ordaz, M.A. Santoyo and J. Pacheco (2007): The Seismic Alert system for Mexico City: An Evaluation of its performance and a strategy for its improvement, Bull. Seismol. Soc. Amer., **97**, 1718-1729.

Kamigaichi, O. (2004): JMA earthquake early warning, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, **4**, 134-137.

- Kamigaichi, O., M. Saito, K. Doi, T. Matsumori, S. Tsukada, K. Takeda, T. Shimoyama, K. Nakamura, M. Kiyomoto, Y. Watanabe (2009): Earthquake Early Warning in Japan – Warning the general public and future prospects -, *Seismol. Res. Lett.*, **80**, 717-726.
- Motosaka, M.(editor) (2009): Special section: Early Warning for Natural Disaster Mitigation, *Journal of Disaster Research*, **4**, pp201-277.
- Nakamura, H., S. Horiuchi, C. Wu, S. Yamamoto and P. A. Rydelek (2009): Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, doi:10.1029/2008GL036470.
- Nakamura, Y. and J. Saita (2007): UrEDAS, the earthquake warning system: today and tomorrow, *Earthquake Early Warning Systems*, Springer, 249-281.
- Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake & D. Nozaka (2003): A new method of quickly estimating epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record., *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **93**, 526-532.
- Rydelek, P. and S. Horiuchi (2006): Is earthquake rupture deterministic?, *Nature*, **442**, E5-E6.
- Wen K.L, T.C. Shin, Y.M. Wu, N.C. Hsiao, B.R. Wu (2009): Earthquake Early Warning technology progress in Taiwan, *Journal of Disaster Research*, **4**, pp202-210.

(編集担当 尾崎友亮)

表1. 世界の主なEarthquake Early Warning のまとめ

国/地域	対象エリア	ロジック	運用母体	現在の位置付け	運用開始	情報発表範囲	情報発表基準	その他	担当
台湾	台湾全土	・ネットワーク手法とオンサイト手法の併用 特定の地震(太平洋のサブダクション)を、特定の都市に	中央気象台(行政機関) Centro de Instrumentacion Registro Sismico (CIRS), 独立行政法人がNPOに相当すると思われる	実験段階 実用段階	2001年 1991年から試験 1993年から一般向け警報	限定ユーザーのみ	M6以上	・1986年M7.8がきっかけ ・M算出は、振幅情報と周期情報の併用、「一般向け」を旨として実験中 ・1985年Michoacan地震M8.1がきっかけ ・当初、メキシコシティのみであったが、オアハカ州も独自に整備 ・両者の協力関係を模索中 ・「あまり当たっていない」との論文*1 ・M算出は、振幅情報と周期情報の併用 ・震度予測は、実測を見ながら距離減衰式の振幅項を修正→この操作があるので、経過時間が大きくなると震度予測にMIはあまり関係なくなる ・現時点では伝送遅延が大きい→改善へ ・個々の地震計で、P波の最初の3秒から τ_c (平均周期), Pd(上下変位振幅)を用いる ・ τ_c からMをPdから予測震度を推定する ・ τ_c とPdをノイズ除去にも応用している	干場 (2010.02.04) 岩切 (2010.03.24)
米国	カリフォルニア(ロジックはUCバークレーで考えられたもの)	・ネットワーク手法(ElarmS)	カリフォルニア大学(UC)バークレー校	試験研究段階	2006年 からリアルタイム試験開始	研究参加グループ	?	・任意のMと震源位置から尤度を求めることで、Mと震源の推定を統一的に扱う。 ・さらに、ベイズ統計を使用して、過去の地震活動やGR関係などの事前情報を組み込むことができる ・Mや震源の決定は、ピーク加速度、速度、変位の情報による。(相の時間差は必ずしも必要ではない)	清本 (2010.06.07)
米国	南カリフォルニア(Wu and Kanamori, 2005等の方法)	・オンサイト手法(τ_c -Pd法)	Caltech ?	試験研究段階	?	研究者コミュニティ	?	・1999年Kocaeli地震(M7.4)がきっかけ。Rapid Response(震度速報のようなもの)と並行して開発 ・敷居値には、PGA, PGV, CAV ^{*2} (さらには、BCA V, BCAV-Wも) ・ニューラルネットワークを使った方法(Böse et al., 2008), τ_c , Pd法の導入を検討中 ・観測点の増設計画(含OBS)あり。	清本 (2010.06.07)
トルコ	南カリフォルニア(Caltechで考えられたもの)	・ネットワーク手法(Virtual Seismologist)	Caltech および ETH Zurich	試験研究段階	2008年7月 から試験	研究参加者(道路会社、ガス会社等のWebサイトへ送る)	10観測点中、2点で閾値を超えたら第1報、3点で第2報	・1999年Kocaeli地震(M7.4)がきっかけ。Rapid Response(震度速報のようなもの)と並行して開発 ・敷居値には、PGA, PGV, CAV ^{*2} (さらには、BCA V, BCAV-Wも) ・ニューラルネットワークを使った方法(Böse et al., 2008), τ_c , Pd法の導入を検討中 ・観測点の増設計画(含OBS)あり。	干場 (2010.08.11)
トルコ	イスタンブール	特定の地震(マルマナ断層での地震)を特定の都市に	Bogazici大学Kandilli観測所	試験研究段階	2002年 に構築	研究参加者(道路会社、ガス会社等のWebサイトへ送る)	・グループ内の50%以上が検知でグループアラート ・3つ以上のグループアラートでシステムアラート	・SOSEMINと呼ばれるもの ・MEMSの加速度計を高密度(50~200m間隔)に展開 ・2008年6月現在、20観測点で試験中 ・各観測点の通信は無線LAN	大竹 (2010.08.11)
イタリア	南イタリア	観測点を高密度に展開し中央集権でない自己構成型震源を決めない	SAFER and EDIM 研究グループ	試験研究段階	2008年 から	?	?	・震源決定は、トリトリ法、着未着法に似ている。確率密度関数で表現 ・MIは、P波やS波の最初の1.2,4秒の最大変位振幅から求めている。(最初の数秒からMIは決められない、と反論する論文もある) ^{*3} ・揺れは、PGVで予測	山田 (2010.11.02)

*1 Iglesias et al.(2007)

*2 CAV Cumulative absolute velocity; BCAG Bracketed CAV; BCAG-W Windowed BCAG 詳しくは, Alcik et al.(2009)

*3 たとえば, Rydelek and Horiuchi (2006)