



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 被災地域の震動特性について

佐藤勉¹⁾、中村豊²⁾、齋田淳³⁾、八木義晴⁴⁾

- 1) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員 修士(工学)
e-mail : tsato@sdr.co.jp
- 2) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、代表 工学博士
e-mail : yutaka@sdr.co.jp
- 3) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員
e-mail : jun@sdr.co.jp
- 4) 大阪市高速電気軌道(株) 鉄道事業本部計画部計画課、課長

要 約

2018年に発生した大阪府北部の地震(M6.1)におけるOsaka Metroの地震計システムの動作状況を報告する。同システムは、早期警報と迅速な震動情報を把握する地震計から構成され、大阪府北部の地震では、大きく揺れだす2秒前に地震警報を出力し、その8秒後には全地震計の震動情報から営業線内の点検レベルが把握できる状態となった。また、緊急地震速報の発表状況の検証を行ったほか、被災地域の震動特性と被害の関係を考察した。

キーワード： 2018年大阪府北部の地震、Osaka Metro、早期地震警報、災害情報

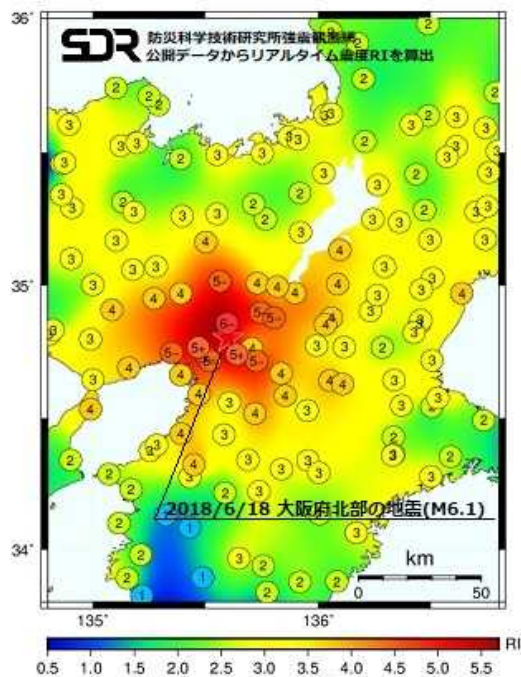
1. はじめに

地震発生直後の緊急対応に必要なものは、その事象に対する早期警報と正確な震動を把握するための情報である。特に、直下地震に対しては、プレート境界で発生する地震よりも被害は局所的になるが、人口密度が高い都市部では、被災度の把握と同時に経済活動の混乱を軽減するためにも重要となる。具体的には、早期警報とその地域で発生した地震動を迅速に把握するためのシステムを効果的に連携させることで、地震後の対応を素早く的確に行うこととなる。地震動の把握には、地盤や構造物の振動特性が大きく影響することから、推定に頼らない実測による把握が望ましい。

本報告では、2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震(M6.1)において、Osaka Metro(大阪市高速電気軌道株式会社)で運用されている早期警報と迅速な震動情報を把握するシステムの動作状況を報告する。また、防災科学技術研究所強震観測網の強震データを用いた被災地域の震動特性や、緊急地震速報の発表状況の検証も行った。

2. 2018年大阪府北部地震の概要

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は、大阪府高槻市を震源(北緯34° 50.6'、



地点 (K-NET/KIK-net/JMA)	緯度	経度	震央 距離	リアルタイム 震度RI	相当震度階
高槻	34.857	135.596	6	5.6	6弱
箕面市箕面	34.832	135.471	12	5.4	5強
豊中	34.767	135.468	13	5.4	5強
高槻市桃園町	34.845	135.617	5	5.2	5強
四條畷	34.741	135.639	8	5.2	5強
大阪	34.726	135.510	12	5.0	5強
島岡	35.017	135.564	24	5.0	5強
大阪国際空港	34.788	135.444	14	4.9	5弱
久御山	34.898	135.746	17	4.9	5弱
生駒	34.715	135.727	15	4.9	5弱
大塚	34.716	135.520	12	4.9	5弱
西宮	34.746	135.350	24	4.7	5弱
西宮市宮前町	34.732	135.335	25	4.6	5弱
宇治	34.878	135.805	21	4.5	5弱
此花	34.663	135.390	25	4.5	5弱
能勢	34.971	135.390	27	4.4	4
堺	34.589	135.471	26	4.2	4
奈良	34.668	135.835	26	4.2	4
三田	34.952	135.271	34	4.2	4
大津	34.972	135.697	33	4.2	4
大和高田	34.517	135.719	33	4.1	4
茨野	34.763	135.705	10	4.1	4
京都	35.009	135.730	26	4.0	4
山本	34.641	136.051	45	3.8	4
近江八幡	35.134	136.096	58	3.8	4
信楽	34.878	136.059	43	3.8	4
信楽	34.853	136.032	40	3.8	4
東浦	34.533	134.990	63	3.8	4
那賀	34.323	135.448	55	3.7	4
日吉	35.164	135.502	41	3.7	4
神戸	34.690	135.158	42	3.7	4
四日市	34.970	136.636	97	3.6	4
岸和田	34.440	135.392	44	3.6	4
名張	34.629	136.107	50	3.6	4
京都	34.996	135.819	30	3.6	4
甲西	35.005	136.085	50	3.6	4
東条	34.908	135.084	49	3.5	4
天理	34.584	135.854	33	3.5	4

図1 2018/6/18 大阪府北部の地震 (M6.1) のリアルタイム震度の分布

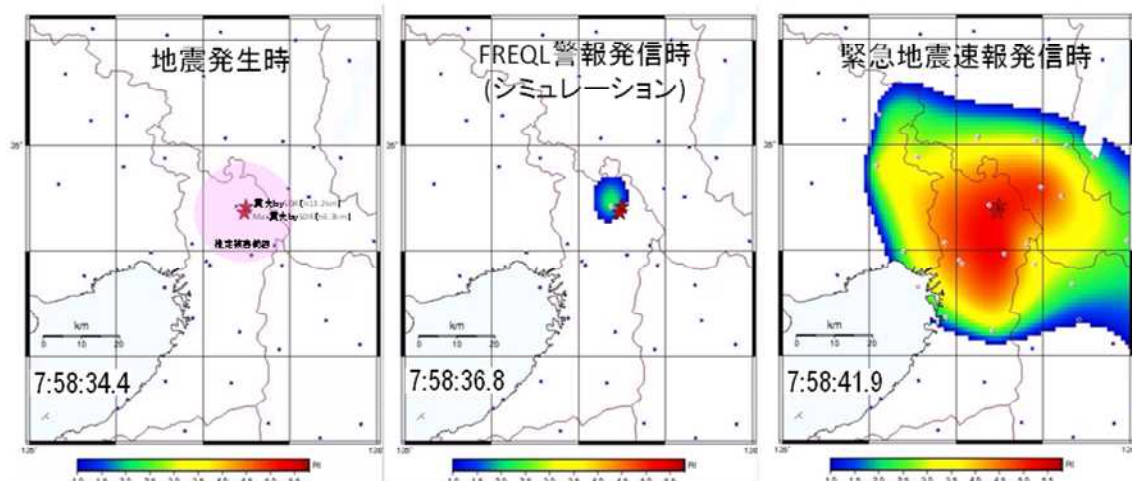


図2 リアルタイム震度でみた地震波動の広がり

東経135° 37.3'、深さ13km)とするM6.1の大都市圏で発生した直下地震であった。この地震では、大阪府市北区、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強が観測されたほか、近畿地方を中心に、関東地方から九州地方まで震度5弱～1が観測された。各地の震度分布を図1に示す。また、www.sdr.co.jpでは、震度の時間経過を表現したアニメーションを公開している。時々刻々と、震央から震動が伝播している様子が把握できる(図2参照)。被害は主に震源の南西に位置し、住宅の全壊・半壊や、上下水道の被害、ブロック塀の倒壊などが発生した。また、大阪府やその周辺の府県においては、エレベーターの閉じ込めが多数あったほか、通勤通学の時間帯であったため、交通機関の大規模な運転見合わせ等による大都市圏特有な混乱も生じた。

3. Osaka Metro地震計システム

Osaka Metroでは、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し、早期運転

再開を目指した地震計システムを2014年度に構築した¹⁾。この地震計システムは、図3にあるように運転判断を行う基本地震計として早期地震警報システムFREQL(フレックル)3台、点検区間判断用のエリア地震計としてFREQLの他に小型デジタル地震計AcCo(アッコ)5台の計8台の地震計、及び、全地震計の情報を集約・表示するセンタ装置等から構成されている。これにより、地震発生後すぐに早期地震警報システム3台が地震を検知し、その後点検判断用として全8台の地震計が動作することで、“警報”と“情報収集”が連携され、迅速な運転制御と的確な震動把握ができるシステムとなっている。地震発生後の対応を素早く判断、実行し、早期の運転再開を目指すことを目的とした地震計システムの運用が行われている。

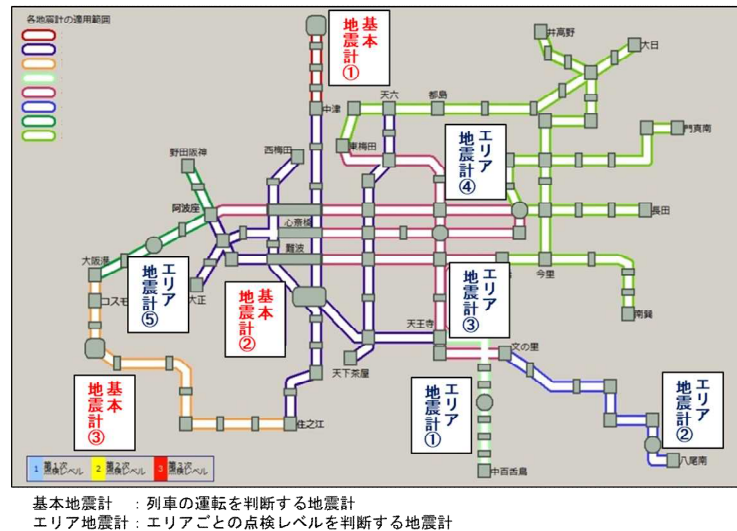


図3 Osaka Metro地震計システム

4. 早期地震警報システムFREQL及びPI値法による警報出力

早期地震警報システムFREQLは、世界最初のP波警報システムUrEDAS(ユレダス)の開発や運営経験にもとづき開発されたP波瞬間警報機能を持った地震計である。P波検知後1秒で地震諸元を推定できると共に、PI値法により、P波検知後最短0.1秒でその後の震度を推定し、警報出力できる機能を有している。そのため、PS時間が少ない直下地震に対しても有効であることから、鉄道や工場、発電所、プロ野球のスタジアムのほか、可搬型として消防や警察の救助隊でも利用されている。

FREQLの最も大きな機能であるPI値法²⁾とは、次の通りである。

図4を参照に、PI値はP波部分の最大DI値として(1)で定義される。

$$DI = \log|a \cdot v| \quad (1)$$

ここに、 a ：加速度(Gal)、 v ：速度(mkine)。

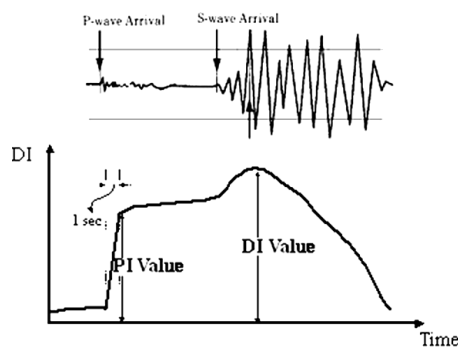


図4 地震時のPI値及びDI値の変動

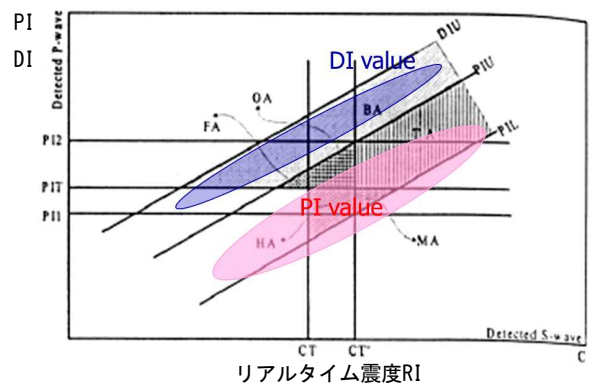


図5 PI値及びDI値とリアルタイム震度RIの関係

DIは、加速度と速度の内積から算出され、地震動のパワーに関連する値となる。PI及びDI値は、図5のようにリアルタイム震度RI³⁾と相関があることから、PI値の大きさからその後のRIを推定できる。なお、リアルタイム震度RIは、地震動の仕事率に基づいた指標で、地震で揺れている最中でも気象庁の計測震度とほぼ同等の値をリアルタイムに算出することができ、より迅速な震動把握に役立つ値となっている。

5. Osaka Metro地震計システムの地震検知状況

大阪府北部の地震時のOsaka Metro地震計システムの検知状況は、表1の通りであった。まず、7:58:38に震央に最も近い基本地震計①(震央距離15km)が地震を検知し、同時刻中に震度5弱以上を推定しP波警報を出力した。その後、基本地震計②(震央距離24km)が7:58:40に検知、7:58:39にP波警報（地震検知とP波警報の時刻が反対になっているように見えるが、仕様上、警報処理を優先させるためにそのような時刻となった。実際は、7:58:39に検知と警報が行われている）、基本地震計③(震央距離30km)が7:58:41に地震検知、7:58:41にP波警報を発令している。全地震計の検知時間及び計測値を比較してみると、凡そ震央距離に応じた関係となっており、震源に最も近い基本地震計①でRI5.5、5HzPGA⁴⁾で329Galが計測され、遠方の内陸に位置するエリア地震計②では、RI3.1、5HzPGAで31Galが計測された。

表1 大阪府北部地震時のOsaka Metro地震計システムの計測状況

	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	-	-	-	-	-	-	-

今回の地震では、比較的浅い都市直下で発生したことから、各地震計との距離が近く、それに伴いPS時間が短かった。図6は、基本地震計①の計測波形とRIの変化を示したものである。同図及び表1より、基本地震計①では、7:58:38に地震を検知すると、RIは急激に上昇し、2秒後にはRI3.5(震度4相当)、その1秒後の7:58:41にはRI5.0(震度5強)に達している。計測波形を見ると、P波からS波到来まで2秒程度しかなく、人間の感覚で言えば“揺れを感じた瞬間に大きな揺れに襲われた”と感じるような何も対応ができない短時間ではあったが、早期地震警報システムを用いた基本地震計では、検知後すぐに警報出力が行われ、より大きな震動が到達する前に警報出力が行われていた。

最も検知が遅い地震計の検知時間が7:58:41であったが、その5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、揺れが完全に収まる前に営業線内の点検区間が抽出された。

以上まとめると、大阪府北部の地震におけるOsaka

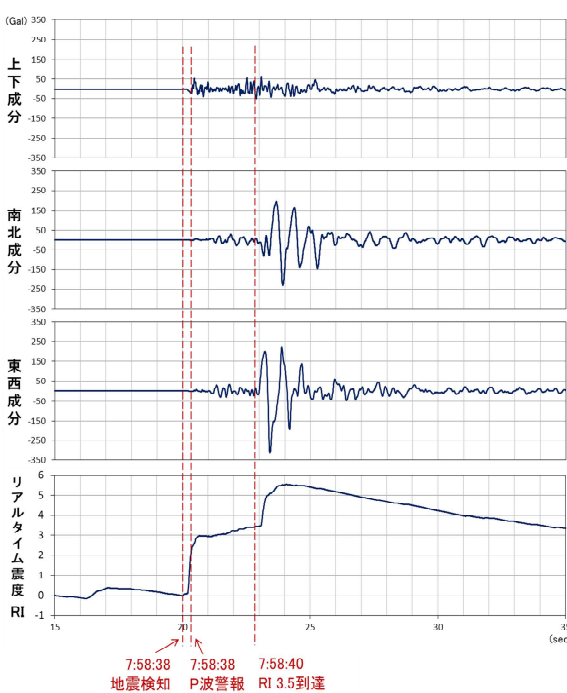


図6 基本地震計①の計測波形と震度の変化

Metro地震計システムでは、大きく揺れだす2秒前(7:58:38)に大きな震動が予測される警報出力が行われ、最初の地震検知後から8秒後(7:58:46)には全営業線内の点検レベル情報が得られていた。同地震計システムは、地震発生時の迅速な運転制御と的確な震動把握ができるシステムとして、地震後の対応を素早く行える情報提供に貢献したことが示唆された。

6. 早期地震警報システムFREQのシミュレーション結果と緊急地震速報との比較

今回の地震の震央付近にある防災科学技術研究所の11カ所の強震観測記録を用いて、リアルタイム震度RIを算定した。その結果を図7に示す。RIの時間的変化状況に、気象庁の緊急地震速報発令時刻、防災科研強震観測記録を使ったFREQの警報シミュレーション結果などを書き込んでみた。これによると、震央にもっとも近い観測点「高槻」では、7:58:36.8にはP波警報が発信されると期待され、その時の震度は2程度であるが、2秒足らずで震度4を超え、2.5秒後には震度6弱を超える。震度6弱以上となった時間は1秒程度で以後速やかに地震動は減少しているが、体感的な揺れは数十秒継続したと思われる。緊急地震速報(警報)は、7:58:41.9に発令されているので、高槻では主要動到来後の収まりつつある状況であり、震央からやや離れた此花や西宮などを除き、概ね震度5程度の地震動とほぼ同時という状況であった。

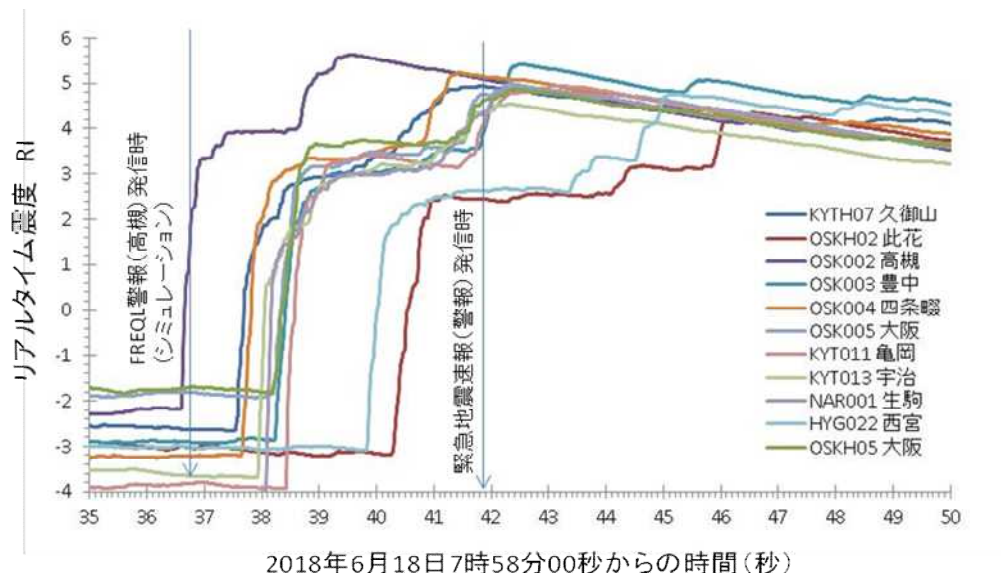


図7 各地のリアルタイム震度の時系列変化状況と警報タイミング

7. 地震規模と被害について

この地震はM6.1とそれほど大きなものではないにもかかわらず、広い範囲で大きな地震動が観測され、被害も思いがけず大きかった。

表2は各地のリアルタイム震度の変化情報から、読み取ったP波検知時刻や最大値発現時刻、警報発信時刻などを示したものである。示した地点は、防災科学技術研究所の観測点で震度5弱以上となった地点である。これらの地点のP波検知時間や最大値発現時間から、いわゆる破壊開始点である震源の位置や最大震度の震源(Max震源)を最小自乗法により求めてみた。

この時P波とS波の速度として、それぞれ6km/秒と4km/秒を仮定した。破壊開始点については、5点以上の観測点の情報が集まった時点で震源推定を行い、確定した段階で推定を終了した。この結果を、気象庁による2日後の暫定震源とともに表3に示す。これを図にしたものが、図8である。この図には、各測点の数を震源確定以後も増やして震源推定した結果も併せて示している。左図の中の四角の部分拡大したものが右図であり、×印と+印が気象庁の震源で、それぞれ当初と2日後のものを示している。黒丸

表2 各地のP波検知時刻と最大震度発現時刻、シミュレーションによるFREQI警報時刻

観測点	コード	緯度(°)	経度(°)	2018年6月18日7時58分		PI1.5
				P検知時刻 秒	Max時刻 秒	PI警報時刻 秒
高槻	OSK002	34.8573	135.5958	36.58	39.53	36.75
久御山	KYTH07	34.8983	135.7461	37.51	41.82	37.90
四条畷	OSK004	34.7405	135.6394	37.64	41.43	37.90
宇治	KYT013	34.8784	135.8047	37.91	42.32	38.40
生駒	NAR001	34.7154	135.7272	38.06	42.34	38.47
大阪	OSK005	34.7255	135.5099	38.13	42.33	38.49
大阪	OSKH05	34.7159	135.5199	38.19	42.38	38.50
豊中	OSK003	34.7668	135.4683	38.19	42.52	38.52
亀岡	KYT011	35.0170	135.5638	38.41	43.11	38.68
西宮	HYG022	34.7463	135.3499	39.81	45.09	40.14
此花	OSKH02	34.6628	135.3896	40.27	71.00	40.75

表3 震源推定結果と気象庁による推定結果との比較

	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	震源時(秒)	
最初の6地点のP検知時刻を使った震源推定結果($V_p=6\text{km/s}$ 仮定)	34.856	135.624	13.2	34.4	
最初の7地点のMax時刻を用いたMax震源推定結果($V_s=4\text{km/s}$ 仮定)	34.843	135.619	6.3	37.9	
JMA震源(二日後の暫定値)	2016 年6月18日 7時58分	34.84333	135.6217	13	34.1
			6.1	大阪府北部	

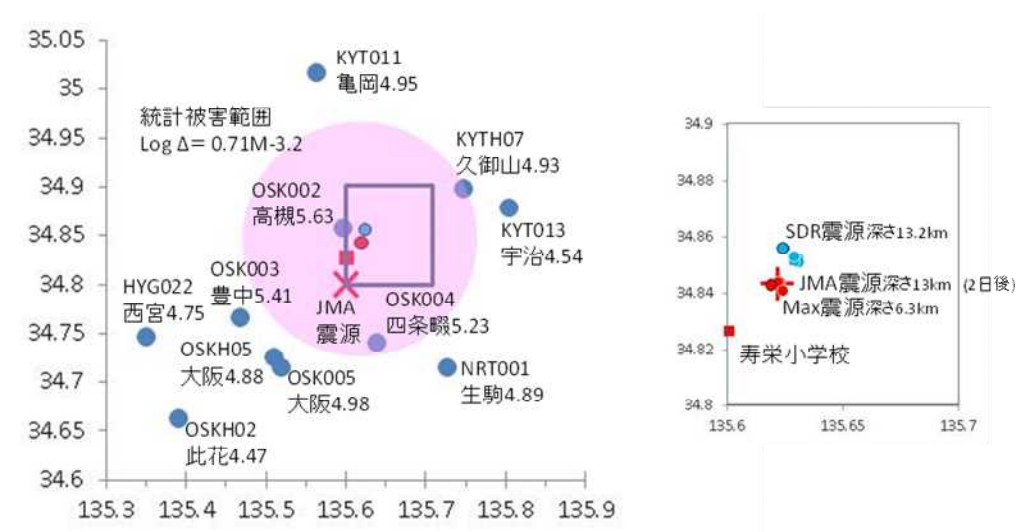


図8 各測点の分布状況と推定震源位置の比較

で囲まれた青丸や赤丸が推定された震源とMax震源の位置である。黒丸で囲まれていないものは確定後に観測点を増やしながら推定した震源位置を示す。参考として、プールの目隠しブロック塀が倒壊した寿栄小学校の位置を小さな赤い四角で示した。

強震記録を用いた震源推定は最初の6地点で確定し、その結果は、気象庁の暫定震源とは1km程度のず

れはあるものの、深さも13.2kmとほぼ同じ位置に推定されている。この推定計算は、最初に地震を検知してから1.53秒後には開始することが可能であり、P波検知後2秒後の7:58:39には結果が得られるものと期待される。これに対して、Max震源確定には、7地点の情報を要しているが、最大値確定のための時間を考えても、7:58:50頃には確定するものと推定される。確定したMax震源の水平位置は破壊開始点の1kmほど南で、深さは6.3kmと浅くなっている。震源時の差は3.5秒で、この間に7kmほど断層が破壊したと解釈できる。破壊速度は2km/秒で妥当な値だと思われる。断層の破壊が地表に向かって進んだと推定され、破壊開始点とMax震源を結ぶ延長線が地表と交わる付近に寿栄小学校があるようにみえる。大まかな解析であるが、破壊が地表に向かったのが事実であれば、地震規模の割に被害が多いように感じるのも納得できる。

なお、Google Earthの衛星写真にMax震源を中心にした被害範囲などを示したものを図9に掲げる。実際の被害^{5), 6)}の分布は、概ねこのピンク円内に入っている。

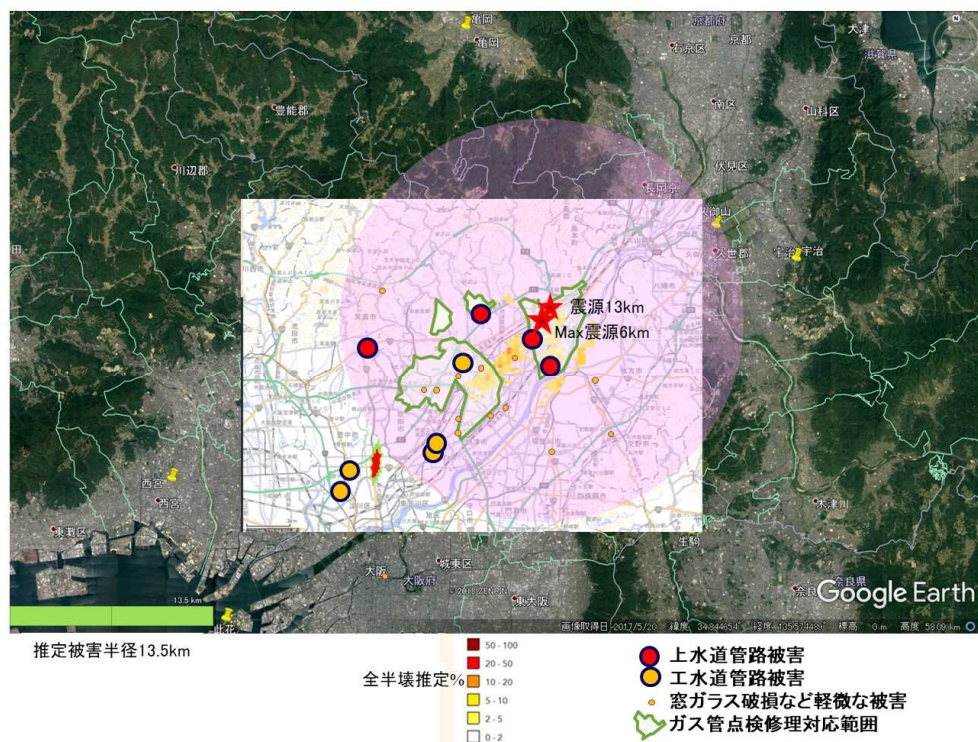


図9 大阪府北部地震の推定被害エリア

寿栄小学校のプールの目隠しブロック塀は東西に走っており、北側に倒壊している。この倒壊がいつ発生したか、ここから3～4km北に位置する高槻の記録から推定してみる。K-NET高槻観測点の加速度記録を2回積分して得られた変位波形を図10に示す。これによると、高槻は周期2秒程度でパルス的に大きく東に約10cm揺れ動いた後、南に1秒くらいのパルスで約4cm揺れ動いている。おそらくこの変位で目隠しブロックが北側に倒壊したと思われる。この変位は7:58:39.5にピークとなっている。なお、緊急地震速報(警報)が7:58:41.9に発令されたが、既に変位のピークが過ぎており、ブロック塀が倒壊した後の発表になったことが推測される。高槻の強震波形を用いたFREQのシミュレーションによれば、P波警報は7:58:37には出されると期待されるので、倒壊して地上に落下するまでには3秒近くの時間があっただと思われる。

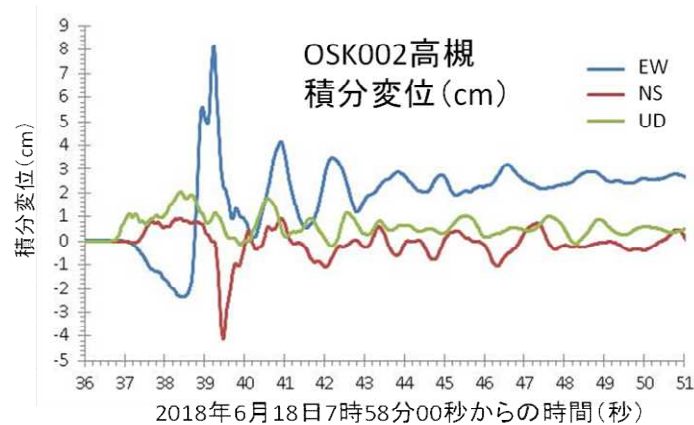


図10 K-NET高槻の積分変位波形

8. まとめ

2018年大阪府北部の地震時のOsaka Metro地震計システムの動作例と、震央周辺の震動特性及び被害との関係について報告を行った。Osaka Metroの早期警報システムと震動把握用の地震計を活用した地震計システムは、大阪府北部の地震ではその場所で大きく揺れだす2秒前に地震警報が出力され、地震検知の8秒後には全地震計の統合情報から営業線内の点検レベルが把握できた。また、この地震による被害は、主に震央の南西に位置したが、断層の破壊の方向によるものと推測された。緊急地震速報については、やはり従来から言われているように、直下地震においては揺れが大きい地域に対しての警報発令に難があることが改めて認識された。

規模が大きい地震において、発生直後は、情報の混乱や断絶するケースが多々発生する。その中で緊急対応に必要な情報は不可欠で、素早く正確な情報を収集することは急務となる。また鉄道等の重要な施設においては、できる限り安全な状態に遷移するための早期警報情報も重要となる。Osaka Metro地震計システムの大阪府北部の地震時の動作例より、早期警報と実測値の迅速な把握が、企業のBCPにおける減災と地震直後の初動対応に大きく貢献する要素であることが示された。

謝 辞

本論の作成に当たっては、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET, KiK-net)及び気象庁の公開データを利用させて頂いた。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大阪市交通局：大阪市交通局 2015 地下鉄・ニュートラム安全報告書、2015年
- 2) Nakamura, Yutaka: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, Early Warning Conference '98, Potsdam, Germany, 1998.
- 3) 中村豊：合理的な地震動強度指標値の検討- DI値を中心とした地震動指標値間の関係 -、第27回地震工学研究発表会、2003年
- 4) 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、昭和59年、pp. 783-784.
- 5) 大阪ガス株式会社：都市ガス供給の復旧状況などについて、地震関連リリース第10報、平成30年6月21日21時00分
- 6) 大阪広域水道企業団：大阪府北部の地震における管路破損原因調査報告、平成31年2月28日