

## トルコ南部地震 Mw7.8 の強震記録分析結果

中村 豊

システムアンドデータリサーチ

## 1. はじめに

甚大な被害をもたらしているトルコ南部地震の記録がトルコ防災庁 AFAD から公開されている。この記録の一部をダウンロードして分析した。先ず地震の恐ろしさが如何に迅速に把握できるかを確認した。次に断層運動の様子を確認した。これらの確認のため、強震記録を基にしてリアルタイム震度を算定し、また、強震記録を二回積分して各観測地点の変位を算定した。以下分析結果について述べる。

## 2. リアルタイム震度による地震の検知と警報について

震源域にある観測地点など 20 地点の強震記録をダウンロードして、リアルタイム震度の変動状況を算定した。リアルタイム震度は地震動エネルギーの供給能力に関係した指標で、地震動パワーの対数から算出される。その名のとおりリアルタイムに算定が可能である。リアルタイム震度 6.4 は 1W/kg に相当する。これは単位質量 (kg) あたりの地震動パワーで、1 秒間に自分自身を約 0.1m 持ち上げるパワーである。リアルタイム震度を用いてこの地震の

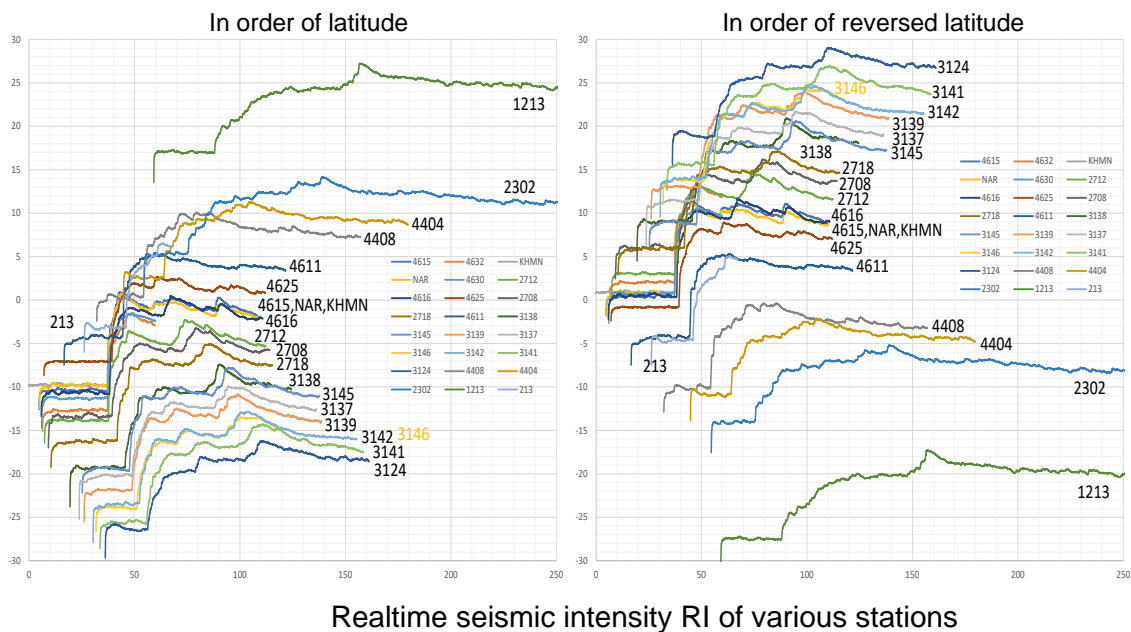


図1 各地のリアルタイム震度の変動状況

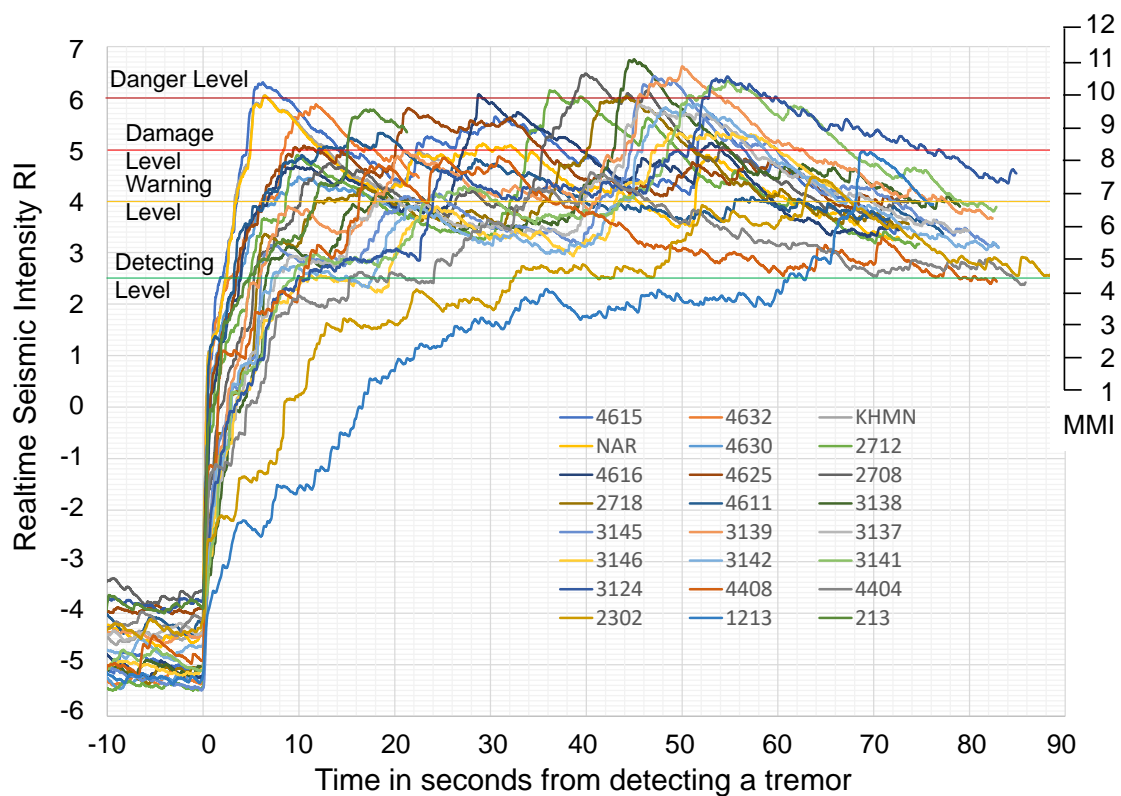


図2 各地のリアルタイム震度の変動状況（地震度到達時刻からの時間：秒）

諸元などを迅速に把握してその凄まじさを警報や緊急救援に活かす可能性について検討した。図1と図2はリアルタイム震度の変動を示したものである。これらから地震動の到着時刻とリアルタイム震度の最大値発生時刻を読み取って、断層破壊開始地点（震源）とMAX震源を算定してみた。MAX震源とは、最大のリアルタイム震度をもたらした地震動の源のことで、大きな地震の場合にはひとつとは限らない。この結果、いわゆる震源はすぐさま大まかに特定できたものの、MAX震源は特定できなかった。最初に地震を検知してから1秒以内に最初の6地点の初動時間が読み取れ、大まかな震源情報を得ることができた。その後9地点を使った震源推定、全20点を使った震源推定を行ったが、いずれもAFADやUSGSによる震源近傍に算定され、断層破壊開始点については迅速に正確な位置や発生時間を把握することができた。ここではP波伝播速度を6km/sとしている。震源推定結果を図3に示す。また推定震源諸元を表1に示す。通常MAX震源も同様にして推定することができるが、今回の地震については概ね結果が発散してしまった。唯一、最初の5地点のみの最大RI値発生時間を用いて、S波伝播速度を3.4km/sに設定すると、MAX震源が求められた。その震源は、最初の破壊開始点の直ぐ北に位置し、深さはほぼ0.2kmで地表近くである。震源時は41秒で最初の破壊開始点の概ね33秒から8秒が経過している。概ね17kmの深さから地表面までの破壊ということになるので、その破壊速度は概ね2km/sということになる。断層の大きさは20km程度であり、概ねM6を少し超える程度の地震に対応する。これ以上の測点を用いた最大RI値発生時刻を用いた震源算定は発散してしまうが、図2に示す各地のリアルタ

イム震度の変動をみると、その最大値が異常に遅く生じていたり最大値以外にも顕著なピークが生じていたりしている地点があることがわかった。つまり MAX 震源候補がたくさんあり、ひとつに特定できない状況ということである。最初の地震がトリガーとなり、次々に

表 1 震源情報推定結果

	N (degree)	E (degree)	depth (km)	origin time hh:mm:ss	
SDR20	37.327	36.949	17.4	01:17:33.6	20地点を使ったSDR震源 Vp=6km/s仮定 最初の検知から1秒以内の6地点を使用 最初の検知から2.5秒以内の9地点を使用
SDR6	37.218	37.022	16.4	01:17:32.7	
SDR9	37.203	37.038	12.1	01:17:33.0	
MAX	37.369	37.048	0.2	01:17:41.0	最初5地点のRimax時使用 Vs=3.4km/s仮定 以後どの組み合わせでも収束せず
AFAD	37.288	37.043	8.6	01:17:32	
USGS	37.174	37.032	17.9	01:17:35	

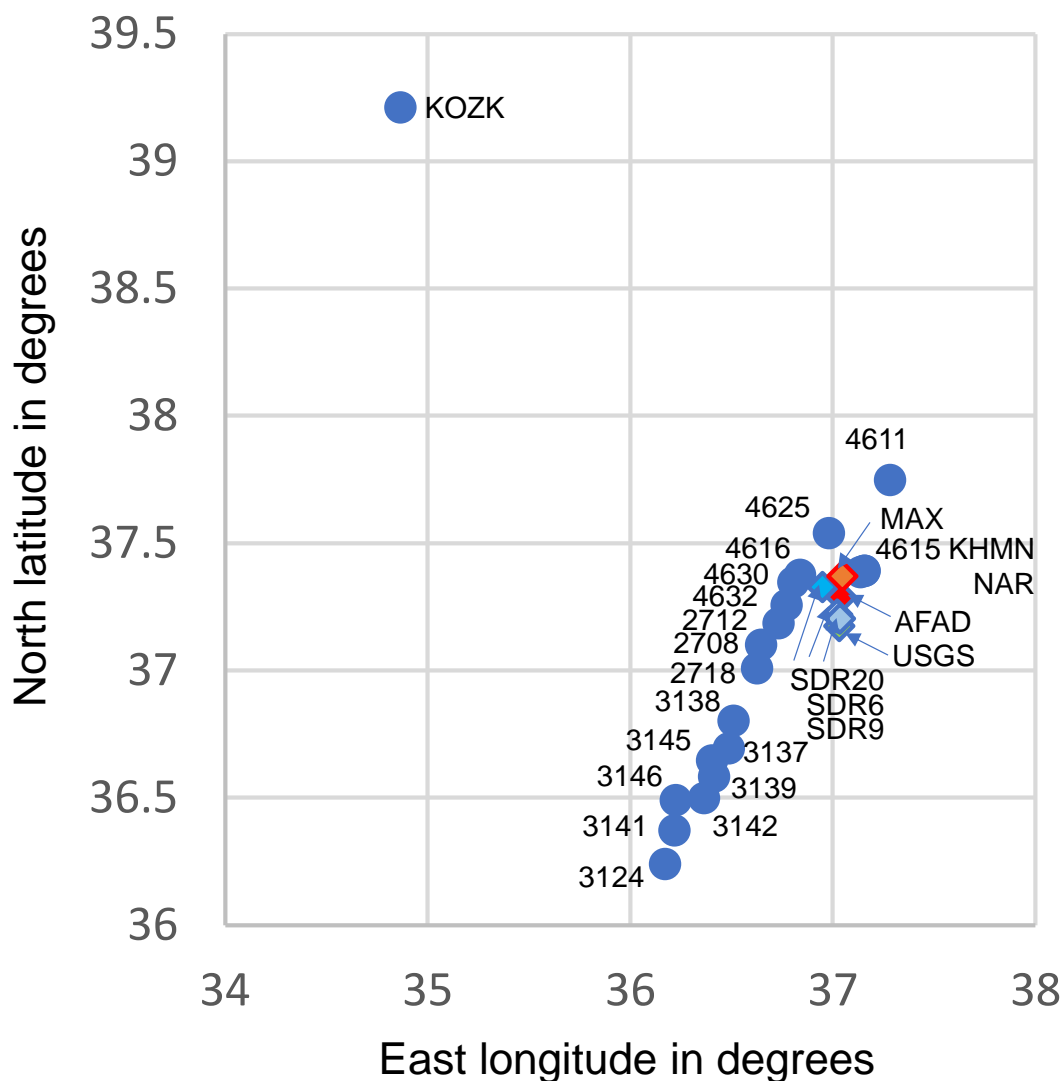


図 3 震源計算に用いた地点群と推定震源

表 2 検知時間ほか検知情報と推定情報

Station	1:17:00からの秒数		RI	5HzPGA Gal	MMI (11RI/7+0.5)	Me $(2(RI-1.5\log PGA)+4)$
	検知時間	RImax時間				
4615	37.196	43.3	6.3	570	10.4	8.3
4632	37.308	49.0	5.9	332	9.7	8.2
KHMN	37.349	43.9	6.0	449	10.0	8.1
NAR	37.383	43.8	6.0	496	10.0	8.0
4630	37.463	47.3	4.5	137	7.5	6.5
2712	37.753	73.8	6.1	582	10.2	8.0
4616	38.177	67.0	6.1	541	10.0	7.9
4625	39.362	60.7	5.8	431	9.6	7.7
2708	39.459	79.3	6.5	688	10.7	8.4
2718	42.173	86.0	6.0	559	10.0	7.8
4611	44.396	62.9	5.3	270	8.9	7.3
3138	45.432	90.4	6.8	958	11.1	8.6
3145	47.951	94.7	6.4	690	10.6	8.3
3139	48.959	98.8	6.6	540	10.9	9.0
3137	49.379	94.5	5.9	460	9.7	7.8
3146	51.295	104.9	5.3	315	8.9	7.2
3142	52.498	103.9	5.9	547	9.7	7.6
3141	56.259	110.6	6.3	793	10.4	8.0
3124	56.685	111.0	6.4	598	10.6	8.5
KOZK	78.570	153.3	3.0	10	5.2	7.0
4408			4.9	118	8.1	7.5
4404			4.6	111	7.7	7.0
2302			4.5	168	7.5	6.3
1213			5.0	276	8.3	6.6
213			5.8	206	9.6	8.6

地震を誘発していったのではないかと想像される。

リアルタイム震度の最大値と 5HzPGA から、地震動の卓越周期を大まかに算定できるので、これから地震規模マグニチュード M を概算した (以下 Me と称す)。結果を表 2 に示す。発生した地震動の周期が長ければ大きめの M となり、周期が短ければ小さめの M が推定される。これによると、各観測点での推定 M は Me9.0 から Me6.3 までばらついているが、震源域では Me8 前後の巨大地震であることが迅速に把握できていることがわかる。FREQI 警報はリアルタイム震度を基準に発令しているが、図 2 によると震源近傍では概ね 1 秒以下で警報でき、どんなに遅くとも検知後 2 秒以内には警報できるものと推測される。地震諸元の迅速な把握は地震の全体像を把握するのに役立つ、迅速で合理的な緊急救援に役立つ。次に、大きな破壊がいつ生じたのかについて考察する。

### 3. 加速度記録の二回積分による観測地点の変位挙動について

加速度強震記録を積分して変位を算出し、震源域の地盤変動について考える。加速度記録を積分すると、一般には誤差が累積して発散してしまう。しかし、地震前が静穏であるこ

と、地震（断層運動）終了時以降は速度も変位も変化しないことなどを条件として、変位変動を算定することができる。もちろん記録に予期せぬ打撃などの振動が混入している場合には適切に積分できないことに注意が必要である。今回の記録については、できるだけ何も加工していない生の記録を入手しようとした。しかし積分結果がやや異常に感じられ、記録ヘッダー部に“BASELINE REMOVED”とあるのに気付いたため、地震動が到着する前の部分を拡大して確認したところ、ほとんどの地点で基線が傾斜しているのを発見した。そこで、この基線傾斜を補正したものをを用いて積分処理を行った（前節で示したRIの変動図は基線傾斜を補正したデータで算定している）。地点2715の記録は基線が途中で折れ曲がっていて正確な補正は困難なので分析から除外した（ただし、このような長周期変動はRIの算定にはあまり影響しない）。また、震央付近にある、4615地点、KHMN地点そしてNAR地点の3地点が数kmの範囲に近接して存在していたので、積分結果を相互に比較してみた。図4にこの結果を示すが、これらの測点では初動以後の大まかな変動は概ね一致しているものの、4615地点のNSとUD成分については初動部分で大きく異なっている。KHMN地点のデータは地震発生からの部分が短いため補正が十分できていないが、KHMN地点とNAR地点は初動も含めて変位波形が基本的によく一致している。一方、4615地点の変位波形は初動で大きく乖離しているが、元の記録をよく見ると、4615地点の記録にはパルスノイズのような不自然な異常波形が認められたので、4615地点の記録もこの検討から省いた。震央距離100km～300kmにある4地点を追加して、各地点の2回積分による変位軌跡を図5に示す。地震前の地点位置を●印で示し、地震後の変位軌跡を曲線で示している。これをみると、多くの地点で1m以上の大きな軌跡を描いていることがわかる。また4630地点と4632地点はほとんど動いていないが、これは記録が最初のS波到達前後で終わっているためである。これらの記録から想定される断層線を実線で示した。破線はこの延長を示したものである。断層が動いたと思われる地域では、想定断層線の東側にある地点ではまず断層に直交して西側方向に変位し、次に断層に沿って北側に変位した後再び断層に直交して東側に変位している。同様に想定断層線の西側にある地点でもまず断層に直交して西側に変位し、次に断層に沿って南側に変位した後断層に直交して東側に変位している。つまり、断層がずれ動く変位と、この変位の前後に断層に直交する往復運動が明瞭に分離して現れている。断層のずれ運動は断層の両側で逆方向となるが、前後の断層に

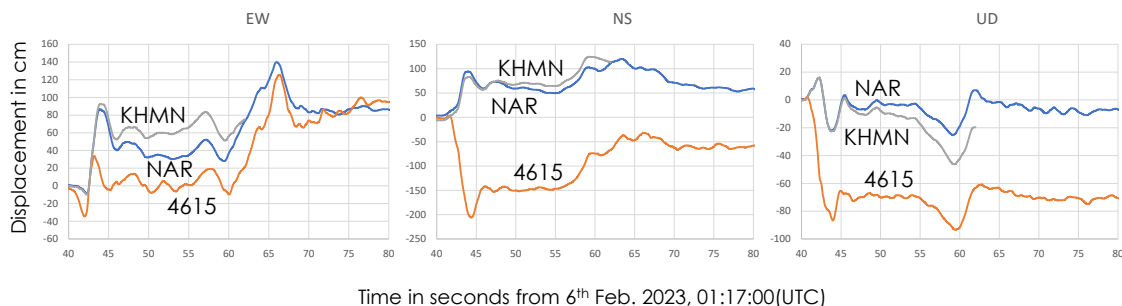


図4 震央近接3地点の積分変位波形の比較

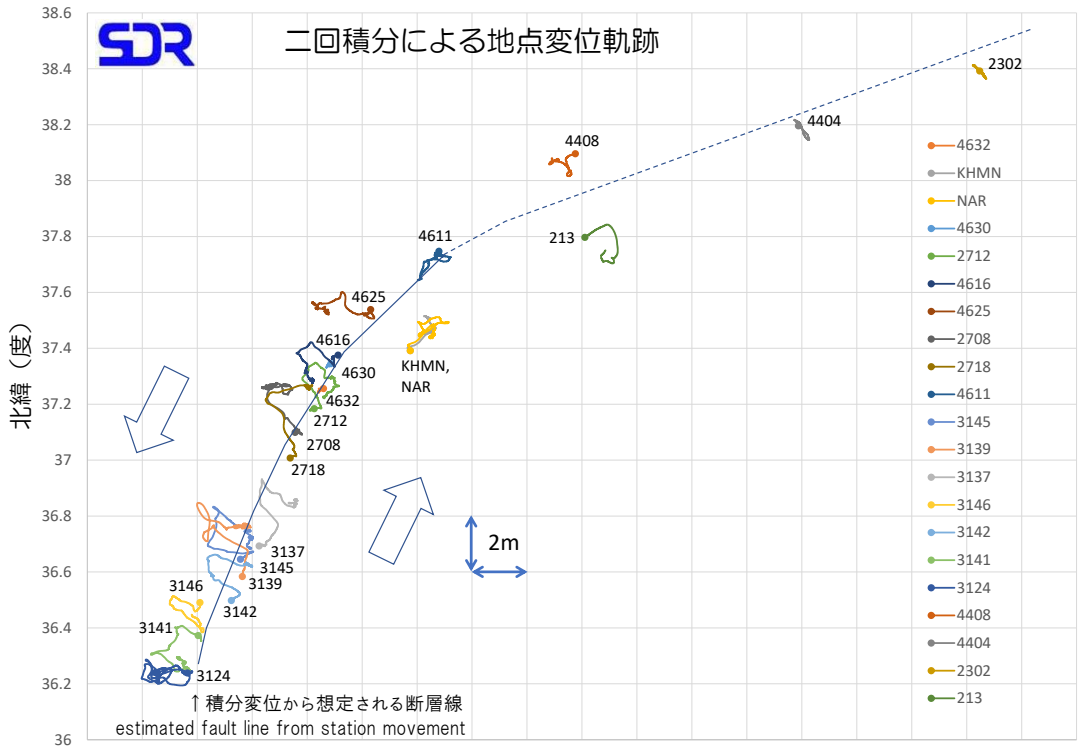
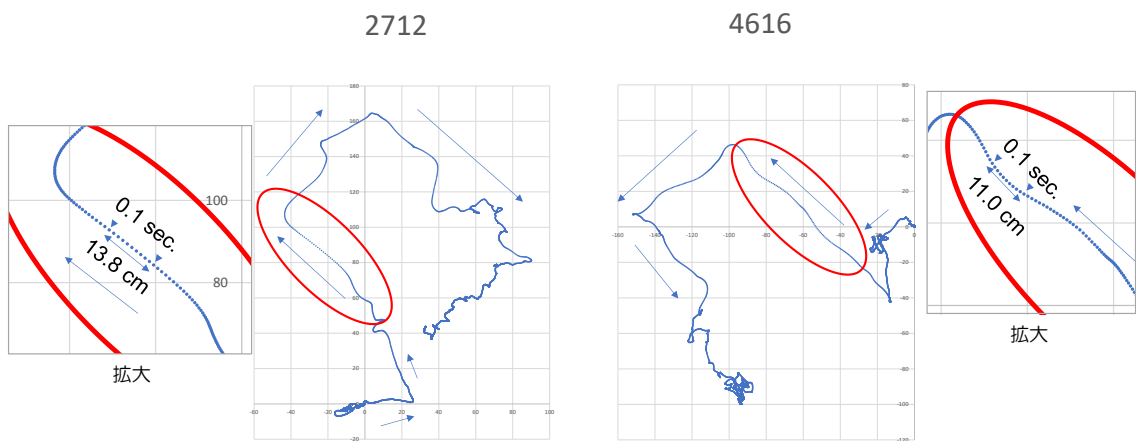


図5 各観測点の変位軌跡とこれから想定される断層線

直交する動きは断層の両側で同じとなっている。断層が動いたと思われる地域では、断層線に直交する往復運動による変位は後に残らず、主に断層に沿う変位（断層の両側で反対の変位）のみが残存している。断層が動いたと思われる地域以外では概ね、断層直交方向の変位軌跡が卓越し、最終的には元の位置に戻る。この図に示した想定断層線は、算定さ



2712地点と4616地点の変位軌跡図

図6 2712 地点と 4616 地点の積分変位軌跡比較

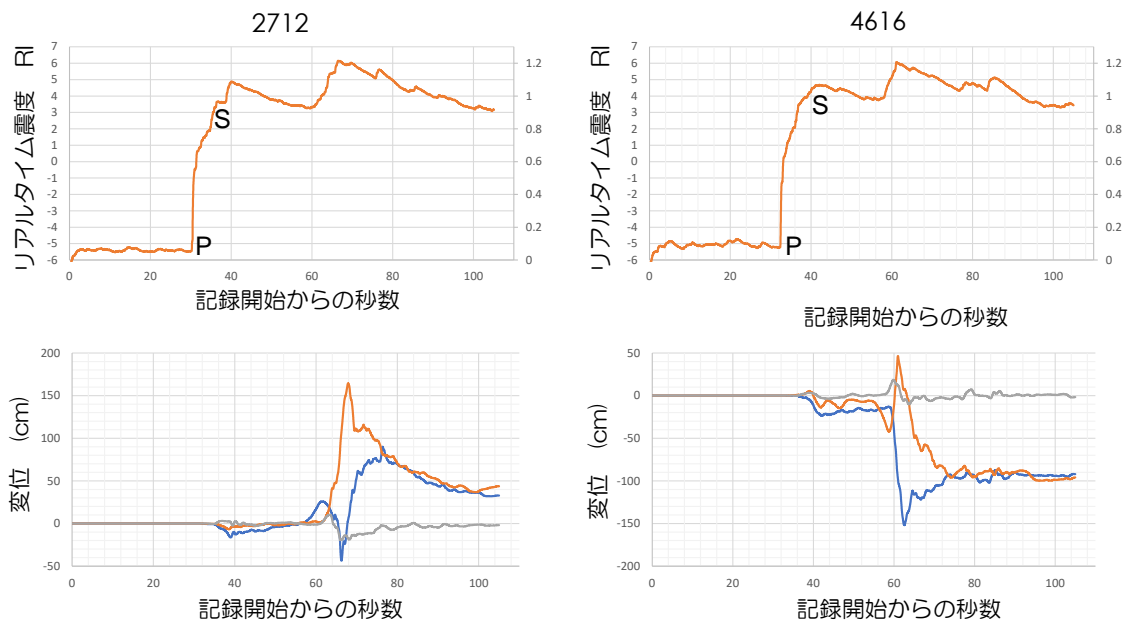


図7 2712 地点と 4616 地点のリアルタイム震度と 3 成分変位波形

れた各地の変位軌跡から上述の断層運動の特徴を踏まえて引いたものである。

次に、比較的近接した 2 地点の軌跡図などを詳細に検討して、地震動の破壊力について考察する。想定断層線の左側にある 4616 地点と右側にある 2712 地点の変位軌跡図を図 6 に示す。また、これらの地点での 3 成分積分変位波形やリアルタイム震度変化図を図 7 に示す。図 6 は 1/100 秒間隔の点群で軌跡を描いている。ほとんどの区間で点群は重なり合い点群として認識できないが、断層がずれ始める前の断層に直交して動く赤丸で囲った部分では点群が分離している。すなわちこの区間ですばやく変位していることを示している。この部分を左右に拡大して示した。このすばやく動いている部分の移動変位と移動時間を読み取ると、2712 地点で 1.38m/s、4616 地点で 1.1m/s といずれも 1m/s 以上の速度で動いていることがわかる。また、すばやく動いている時点を変位波形やリアルタイム震度の変化で確認すると、これらの地点のリアルタイム震度の最大値は断層に直交する変位運動によって生じていることがわかる。両地点でのこれらの時間差は 7 秒から 8 秒であるが、両地点の断層に沿う距離は 20 数 km であり、この間の破壊伝播速度は 3km/s 程度と推測され、概ね妥当な値となっている。両地点での最初のリアルタイム震度のピークは 5 弱程度であり、断層に直交する変位運動によるリアルタイム震度は 6 強であることから、少なくとも両地点周辺の大きな被害はリアルタイム震度が最大値の 6 強となる時刻付近で発生している可能性が高い。つまり地震検知から被災までには 30 秒近くの時間がある。震源近傍では、警報から数秒程度の時間で破壊的地震動に見舞われたと推測されるが、それ以外では、地震感知から被災までには意外に多くの時間があった可能性がある。地震発生から最大動までなぜこんな時間差が生じているのかについては、ひとつの地震ではなく、最初の地震(断層ずれが 10cm から 20cm 程度の地震か)の後により大きな地震が発生しているものと推測される。い

ずれにせよ、地震検知から破壊的な地震動到来までの短い時間で何をなすべきか、リアルタイム地震防災の大きな課題である。

#### 4. おわりに

今回のトルコの地震は、比較的小さな地震が引き金となって次々と大きな地震を引き起こした2011年の東北地方太平洋沖地震（いわゆる311地震）を想起させる。また、断層が市街地近傍で活動した点では、1995年の阪神淡路大震災や2016年の熊本地震群の状況とも重なる。ただ被害の程度と範囲が一層大きくなっている。壊滅的な状況が広い地域で続いているが、できるだけ早く静穏な日常が戻ることを祈る。トルコは1999年の地震でも大きな被害を受けている。この地震被害を調査したことがあるが、印象に残っているのは、地表に断層が現れた地域で造成中の大団地の様子である。建設中のRC骨組にレンガ充填壁からなる6階建てくらいの集合住宅群がパンケーキ状に崩落している中でほぼ原形をとどめた一棟があったのである。この建物をみると、1階部分は損壊しているにもかかわらず、2階以上はほぼ原形をとどめていた。1階部分に木製型枠などの建築資材が天井まで積み上げられており、1階部分が大きく損壊したにもかかわらず上階の急激な落下をこれらの建築資材が柔軟に受け止めて上階の崩落を防いでいる状況だったことが記憶に残っている。期せずして免震構造の耐震有効性を見た思いだった。こうした事実を今後の災害防止に活かせればと思う。新築建物の耐震化は言うまでもない。既存建物についても耐震補強を基本とするものの、コスト的に対応できない場合などが少なくないと思われる。緊急避難的な対策として、コスト的に実現可能な免震化や崩壊時の生存空間確保策など、今回の苦い経験を活かした実施可能な方策が数多く開発され実用化されることを切に願う。

以上