日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.50

Oct.2023

特　集：2023 年トルコ・シリア地震

JAEE

https://www.jaee.gr.jp/

公益社団法人 日本地震工学会

Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014東京都港区芝5-26-20建築会館

Tel:03-5730-2831　Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌（第 50 号 2023 年 10 月）

Bulletin of JAEE（No.50 Oct.2023）

INDEX

巻頭言：

特集「2023年トルコ・シリア地震」にあたって／皆川　佳祐 …… 1

特集：2023年トルコ・シリア地震

2023年トルコ・シリア双子地震の破壊過程／奥脇　亮、八木　勇治 …… 2
トルコ南部における活断層分布と地震時の変位／近藤　久雄 …… 7
近地強震波形記録の特徴／長坂　陽介 …… 11
レーダー衛星による地殻変動解析から見た地震像／小林　知勝 …… 15
2023年トルコ・シリア地震被害調査／楠　浩一 …… 19
現地におけるライフラインの被害状況／小野　祐輔 …… 23
トルコにおける建築基準／安藤　尚一 …… 27
被災地における復興と課題／澤田　雅浩 …… 32

学会ニュース：

2023年2月に発生したトルコ南部の地震（M7.7，M7.6）に関する被害調査報告会（速報）の報告
／阿部　慶太 …… 36

追悼文：

太田 裕先生を偲んで／清野　純史 …… 38
亀田弘行先生を偲ぶ―PSHAの実践を通して／高田　毅士 …… 39

お知らせ：

お知らせ …… 41
本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／登録メールアドレスご確認のお願い／ JAEE Newsletter 第12巻 第3号（通算第37号）が2023年12月下旬に発刊されます／ご寄附のお願い／問い合わせ先

編集後記

◇本学会誌は、Web上でカラーでご覧いただけます（発行から1年間は会員への限定公開）。

巻頭言

特集「2023年トルコ・シリア地震」にあたって

皆川　佳祐
●会誌編集委員会 委員長／埼玉工業大学 准教授

本年度より鳥澤 一晃先生（関東学院大学）から会誌編集委員会の委員長を引き継ぎました。会誌編集委員会は、本会を反映するように地震、地盤、土木、建築、機械、情報、防災など幅広い分野のメンバー14名で構成され、年に3回発行される会誌の企画、原稿の取りまとめや確認等を行なっています。今回50号という節目を迎えましたが、これからも時代に即した話題を多様な角度から紹介し、様々なバックグラウンドを持つ本会会員間の情報や経験の共有、会員同士の交流につながるような会誌を発行していきたいと思います。

本号では、特集として今年2月6日に発生した2023年トルコ・シリア地震について、これまでに明らかになったことを各分野の著名な研究者に解説いただきます。2023年トルコ・シリア地震は、近年の内陸型地震の中でも最大規模の地震がおよそ9時間の間隔で2回発生したことから、建築物の倒壊をはじめ多くの被害が発生し、死者は5万6千人（2023年3月20日時点）を超え、東日本大震災以来、非常に多くの人的被害が発生した地震災害となりました。本特集を企画した当初は、地震から十分な時間が経過しておらず、地震やその被害の全容が明らかになっていませんでした。しかしながら、このような被害地震から学ぶことは多く、いち早く地震の発生メカニズムや強震動の生成要因、被害状況、被害要因などを共有することが重要と考え、特集として取り上げることにしました。本特集で取り扱った内容以外にも地震被害を分析する上で重要なものがあるかと思いますが、現時点でも調査、分析途中のものも多いことから、それらについては今後の会誌で取り扱っていきたいと考えています。

特集では、まず、筑波大学の奥脇亮先生、八木勇治先生には、2023年トルコ・シリア地震の複雑な震源過程や断層ネットワークなどについて解説いただきます。次に、今回の地震以前からトルコでトレンチ掘削調査等を実施している産業総合技術研究所の近藤久雄氏には、地震に伴い生じた地表地震断層や、トルコ鉱物資源開発調査総局と共同で実施した変位量分布について紹介いただきます。港湾空港技術研究所の長坂陽介氏には、各地点で観測された強震動波形の特徴について解説いただきます。国土地理院の小林知勝氏には、合成開口レーダー（SAR）衛星を用いた地殻変動観測・解析の結果を報告いただきます。日本建築学会、土木学会、地盤工学会および文部科学省科学研究費補助事業の研究グループの合同調査団団長で東京大学地震研究所の楠浩一先生には、建物や地盤の被害状況などを報告いただきます。日本地震工学会と土木学会との合同調査団として現地を調査された鳥取大学の小野祐輔先生には、道路や鉄道、電力、上下水道、ガス等のライフラインの被害状況を報告いただきます。同じく現地調査を実施された近畿大学の安藤尚一先生には、トルコの建築耐震基準や現地行政へのヒアリング結果、現地調査の結果などを説明いただきます。最後に、兵庫県立大学の澤田雅浩先生より、今回の地震の復旧、復興の参考になるものとして、1999年にトルコで発生したマルマラ地震における復旧、復興を解説いただきます。なお、現時点では統一的に使用されている地震名がなく、分野によっても異なることから、著者によって地震名などに違いがあります。

本号では、特集記事の他にも日本大学の阿部慶太先生に学会ニュースとして2023年5月29日に土木学会地震工学委員会と本会の共催で開催した被害調査報告会についても報告いただいております。また、第49号（2023年6月発行）においては、東京工業大学の山中浩明先生らに2023年トルコ・シリア地震の後にトルコで実施された臨時強震観測に関する報告をいただきましたので、そちらも合わせてご覧いただければと思います。

最後になりますが、調査や報告、事後の研究でお忙しい中にも関わらず、著者の方々には原稿依頼にご快諾いただき、執筆いただきました。特に、海外においては、構造物の特性はもちろんのこと、耐震基準、生活習慣や文化、歴史的背景、気候なども異なり、地震被害に影響を与えるものと思います。これらを踏まえてわかりやすく執筆いただいた著者の方々に深く感謝申し上げます。また、今回の地震で亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々にお見舞い申し上げます。

皆川 佳祐（みながわ けいすけ）
2007年東京電機大学にて博士（工学）の学位を取得。東京電機大学工学部助教、埼玉工業大学工学部講師を経て現職。専門分野：免震・制振装置の研究開発、機械構造物の耐震性評価、昇降機のダイナミクス及び安全性評価。

特集：2023年トルコ・シリア地震

2023年トルコ・シリア双子地震の破壊過程

奥脇　亮　　／八木　勇治
●筑波大学 助教　　●筑波大学　教授

1. はじめに

2023年2月6日、トルコ南東部にて近接する2つの内陸大地震が立て続けに発生した。双子ともいえる2つの地震による強い揺れは、トルコ及びシリアに人的・経済的に甚大な被害をもたらした。2023年トルコ・シリア双子地震の発生領域は、複数のプレートが交わり、それに伴い発達する大規模断層帯と活断層が入り組んだ複雑な地震発生場である。著者らは、2つの地震の震源過程解析を行い、破壊成長過程と複雑な断層ネットワークとの関係について調べた。本稿はOkuwaki et al.[1]の内容に基づいて、2023年トルコ・シリア双子地震の震源過程を解説する。

2. 2023年トルコ・シリア双子地震の概要

東地中海地域ではアナトリアプレートが隣接するアラビアプレートとインドプレートの衝突から逃れるように西方へ移動している。これによりアナトリアプレート南東部で左横ずれ型の東アナトリア断層帯 (EAFZ)、北部で北アナトリア断層帯が発達している (図1)。EAFZでは過去にマグニチュード7以上の大地震が複数回観測されるなど、地震活動が活発である。EAFZは段差や屈曲による複数の断層セグメントに分割でき、その周辺には複数の断層が存在しており、EAFZ周辺では幾何的に複雑な断層ネットワークが形成されている[2] (図1)。

2023年2月6日、トルコ南東部のシリア国境北部、EAFZ南西端のNurdağı-Pazarcıkセグメントにおいて2つの大地震が発生した。米国地質調査所によると、2つの地震のモーメントマグニチュード (M_W) は7.8と7.5、発生時刻の差は約9時間、震央は約90 km離れており、時空間的に近接して発生した双子地震といえる。以後、2つの地震の規模については、Okuwaki et al.[1]の解析結果を基にそれぞれM_W 7.9、M_W 7.6とする。トルコ首相府防災危機管理庁 (AFAD) により決定されたM_W 7.9の地震の震央は、EAFZから東に約15 km離れたNarlıdağ断層帯に位置している。M_W 7.6の震央は、EAFZから西へ枝分かれするSürgü断層帯 (SFZ) に位置している。再決定された余震分布[3]は主にEAFZとSFZに沿って分布している一方で、M_W 7.9の震央付近では、EAFZから鋭角に枝分かれし、北東-南西に伸びている (図1)。Global Centroid Moment Tensor (GCMT) Projectにより決定されたモーメントテンソル解によると、どちらの地震もEAFZおよびSFZに沿う節面は斜め左横ずれ型を示すが、非ダブルカップル成分がそれぞれ42 %、57 %と、どちらの地震も単純な震源過程あるいは単純な断層幾何で説明することが難しい地震であることを示唆している。

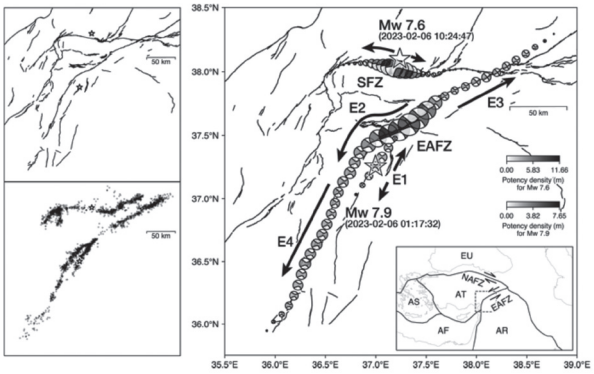


図1　2023年トルコ・シリア双子地震の震源過程の概要[1]。左上パネルは活断層分布[10]、左下パネルは再決定された余震分布[3]。震源メカニズムは下半球投影した。地図上の矢印は破壊進行方向を示す。

3. 解析手法とデータ

こうした複雑な地震発生場およびGCMTのモーメントテンソル解に含まれる非ダブルカップル成分から、2023年トルコ・シリア双子地震は、破壊成長過程および断層形状が複雑であることが予想される。一般に断層幾何の複雑性は、破壊伝播速度や破壊進行方向を制御することが知られている[4]。また、最近の研究により、断層の曲がりや段差を越える高速な超せん断破壊現象や、形状や滑り方向の異なる断層セグメントの連動的な破壊、さらには破壊進行方向が見かけ上反転する特異な現象など、破壊成長様式の隠された複雑性が次々に報告され始めている[5–7]。これらの現象は、様々なテクトニクス環境で発見され始めており、破壊成長様式の多様性を特徴づけ、地震発生物理の理解を促進させるだけでなく、強震動生成を考慮する上で重要なインプットとなる。そこで、Okuwaki et al.[1]は、最近開発されたポテンシー密度テンソルインバージョン (PDTI) 法[8,9]を用いて、2023年トルコ・シリア双子地

震の震源過程を解析した。PDTI法は、断層形状に関する仮定を必要とせず、断層形状と破壊進展を同時に推定するデータ駆動型の新手法である。解析に際して、滑りの時空間発展を表現する要素震源は、モデル断層上に配置される。このモデル断層は、あくまで要素震源の位置を規定するものであり、それぞれの要素で解かれる断層形状と滑り方向はモデル断層から独立しており、モデル断層≠断層面であることを強調したい。こうした柔軟な震源過程モデリングは、2023年トルコ・シリア双子地震のように、幾何的に複雑な断層ネットワークで発生している地震の震源過程解析に不可欠である。モデル空間の境界を決める仮想的な破壊フロントの伝播速度は、震源域周辺の*S*波速度を参考に4 km/sとし、各要素震源の仮想的な破壊継続可能時間をM_W 7.9、M_W 7.6の地震に対してそれぞれ42 s、20 sと設定した。これにより、モデル空間内における超せん断破壊や破壊進展方向の反転、サブイベント同士のトリガリングなど、起こりうる破壊進展の複雑性を柔軟に表現することができる。解析には、M_W 7.9、M_W 7.6の地震に対してそれぞれ遠地実体波P波の鉛直成分を39観測点、37観測点使用した。観測点は、破壊進展中の震源メカニズム変化を捕捉できるよう、可能な限り震源を囲むように選定した。破壊開始点は、M_W 7.9の地震に対しては再決定された震源情報[3]を用いた。M_W 7.6の地震は、再決定された震源を参考に、モデル断層上に配置した。破壊開始点の深さは、ともに15 kmとした。モデル断層上の要素震源は、M_W 7.9、M_W 7.6の地震に対して走向、傾斜方向にそれぞれ10 km × 5 km、5 km × 5 kmの間隔で配置した。モデル断層は、活断層分布[10]および再決定された余震分布を基に設定し、鉛直な非平面を採用した。EAFZに沿った非平面領域に加えて、再決定された余震分布を参考に、EAFZから鋭角に枝分かれする分岐モデル断層も取り入れた。

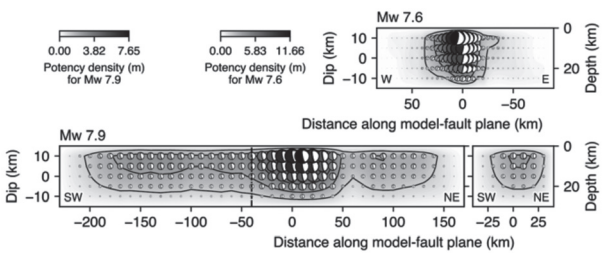


図２　震源過程モデルの空間分布の断面図[1]。点線は分岐断層とEAFZの交差点を示す。震源メカニズムはM_W 7.9、M_W 7.6のモデルそれぞれに対して{走向、傾斜}、{54°、90°}、{278°、90°}の面へ下半球投影した。

4. M_W 7.9 Nurdağı-Pazarcık地震の震源過程

最初に発生したM_W 7.9の地震は、震源過程モデルから地震モーメント 9.6×10^{20} N m (M_W 7.9) と求まり、断層のカーブや枝分かれに沿って、長さ350 kmに渡る破壊が生じた (図2)。解析により得られた各要素震源における断層形状は、分岐断層を含めた非平面モデル断層の形状と概ね一致する。M_W 7.9の震源過程は主に4つの破壊エピソードにより構成される (図3)。以下、時間を追ってそれぞれのエピソードを解説する。

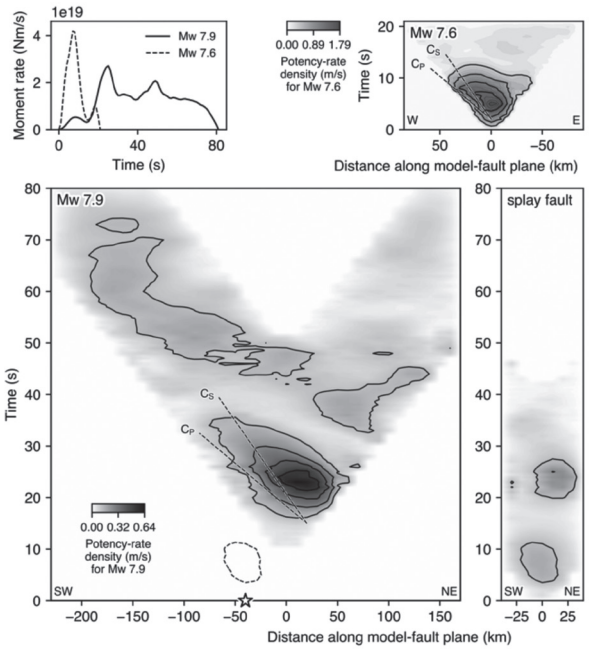


図３　震源過程モデルの時空間分布[1]。ポテンシーレート密度テンソル分布をモデル断層に投影し、モデル断層の走向方向の時間発展を示す。

4.1 破壊エピソード1 (E1：初期破壊)

破壊開始後最初の10秒間、破壊は北東-南西へバイラテラルに進展し、分岐断層に沿って長さ約50 kmの領域を破壊した。E1により解放された地震モーメントは全体の3 %である (M_W 6.9)。得られたポテンシーレート密度テンソルから推定される断層形状 (E1におけるポテンシーレートピーク時のもの) は、左横ずれ型の節面が走向36°を示しており、予め設定した分岐モデル断層の走向と整合的である。

4.2 破壊エピソード2 (E2：主破壊)

E1終了後、5秒ほど間をおいて、破壊開始15秒後からE2が開始した。E2はEAFZ上で進行し、20秒間にわたって長さ120 kmの領域を破壊した。開放された地震モーメントは全体の35 %を占める (M_W 7.6)。E2は非対称なバイラテラル破壊をもち、とくに南西への強い指向性をもつことがわかった。特筆すべき点として、E2は、分岐断層とEAFZの交差点より北東で開始

しており (つまりE1破壊域北東端とE2破壊開始点には空間的なギャップが存在する)、その後、時間をおいて南西への強い破壊指向性をもつことがわかった。南西への強い破壊指向により、見かけ上、E1からE2にかけて、破壊進行方向が震央方向へと反転する逆伝播過程を示している。さらに、この南西への破壊は*S*波速度を超えて進行したこともわかった。推定されたポテンシーレート密度テンソルは、ほぼ鉛直な横ずれ型のメカニズムを示しており、E2におけるポテンシーレートピーク時における左横ずれ型の節面は55°の走向をもつ。これは、E2領域におけるEAFZの走向と整合的である。

4.3 破壊エピソード3 (E3)

E3は、E2破壊域北東端において破壊開始35秒後に開始した。トータルの地震モーメントは、全体の15 %を占める (M_w 7.4)。はじめに南西方向へと進展した後、北東方向の破壊が支配的となる非対称のバイラテラル破壊がみられた。EAFZに沿って長さ100 kmの領域を破壊した後、モデル断層北東端にて破壊開始45秒で収束する。ポテンシーレート密度テンソルは、EAFZと整合的な断層形状を推定している。

4.4 破壊エピソード4 (E4)

E4は、破壊開始45秒後、モデル断層の南西部で発生している。E2の破壊域南西端付近で開始し、最初の5秒間は*S*波速度を超えて南西方向に進行した。しかし、その後破壊進行速度は減速し、破壊開始75秒後に、モデル断層南西端で停止する。ポテンシーレート密度テンソルから推定される左横ずれ型の節面は、E4におけるポテンシーレートピーク時に走向54°を示している。トータルの地震モーメントは全体の43 %を占めており (M_w 7.7)、とくに破壊減速時の非ダブルカップル成分は24 %を占めている。

5. M_w 7.6 Ekinözü地震の震源過程

2つ目のM_w 7.6の地震は、長さ 80 km × 幅20 kmの領域を破壊し、地震モーメントは3.2×10^{20} N m (M_w 7.6)である (図2)。破壊進展は非対称なバイラテラル破壊で特徴づけられ、西方への強い指向性をもつ。破壊開始6〜10秒の間に一つのピークをもつモーメントレート解放で特徴づけられ、西方への破壊進展は、*S*波速度を超える高速破壊であった (図3)。破壊開始15秒後に、モデル領域西部で破壊が急停止している。推定された断層形状は、東西に伸びるカーブをもった走向の変化を示しており、モデル断層の形状とよく一致する。傾斜角は深さ方向にバリエーションをもち、浅部から深部にかけて76°から61°に変化する特徴をもつ。破壊停止付近では縦滑り成分が卓越し、走向はほぼ南北に向いている。

6. 議論

6.1 初期破壊は分岐断層で開始した

E1におけるポテンシーレートピーク時の走向は36°であり、E2の走向55°、つまりEAFZの走向と異なる。再決定された余震解析によると、震央周辺では北東-南西に伸びる余震が分布しており、これはEAFZから鋭角に分岐している。分岐断層に沿った余震分布の走向は、震源過程モデルにより推定されたE1の断層形状と整合的である[3]。地震直後の衛星画像解析や現地調査[11]によって、震央付近には北東方向に伸びる地表断層の出現が確認されている。したがって、初期破壊はEAFZではなく、EAFZから鋭角に枝分かれした分岐断層において発生したと考えられる。E1において、分岐断層と主断層の交差点付近においては目立ったモーメント解放がみられず、分岐断層と主断層が物理的に接続しているかどうかは不明である。

6.2 断層幾何と階層的な破壊がもたらす逆伝播破壊

M_w 7.9地震の震源過程において特筆すべきは、E2における非対称なバイラテラル破壊中に南西に指向性をもつ破壊が卓越し、破壊進行方向がE1のそれと、見かけ上反転する現象がみられたことである (図1、3)。このようなブーメラン破壊ともいうべき破壊進行方向の見かけ上の反転は、他の地震においても最近観測され始めている[6,7]。しかしながら、これら既往研究においては、破壊が深部におよんでいたり、海域の地表変動を直接観測できない地震発生場であることから、逆伝播破壊のメカニズムの特定には至っていない。今回の地震では、2つの幾何の異なる断層でE1とE2が発生していることから、逆伝播破壊のメカニズムについてより明確に説明できる可能性がある。

例えば、Okuwaki et al.[1]はE1からE2に至る階層的な破壊サイズのスケールアップの結果として、逆伝播破壊が生じた可能性を議論している。つまり、見かけ上の逆伝播様式は、主要断層 (EAFZ) から枝分かれした小断層における小さな破壊が、その後の主要断層における大きな破壊へと階層的にスケールアップ[12,13]した過程でもたらされた可能性を指摘している。E2を擁するEAFZでは、地震前の歪み蓄積により、E2の破壊域は分岐断層におけるE1の破壊を十分な起爆剤として、いつでも破壊しうる状態だった可能性がある。

E1の破壊端とE2の破壊開始点の間には、時空間的なギャップがある (図1、3)。このギャップは、初期破壊から主破壊への階層的な破壊スケールアップを理解

する上で重要である。EAFZにおいて、EAFZと分岐断層の交差点より西側は、左横ずれ型のE1によって引張場となり、同じく左横ずれ型のE2にとってストレスシャドウの領域を生む。E1により生じたストレスシャドウは、EAFZで破壊がトリガされたとしても、その後の破壊進展を阻害する役割をもつはずである。実際、南西方向への逆伝播はE2開始後直ちに生じず、5秒程のインターバルを経て、その後の南西方向への高速な超せん断破壊へと成長している。この結果は、E2の破壊が、十分な破壊エネルギーと十分に広い幅を持つ破壊パルスをもっていたことで、ストレスシャドウに影響された領域を乗り越え、E1からE2への階層的な破壊のスケールアップが達成されたことを示唆する。複雑な断層ネットワークをもつ地震発生場においては、断層の配置によって、こうした階層的な破壊成長が駆動され、破壊進行方向の反転や、地震の巨大化が駆動されてしまう可能性をもつことを示唆している。

6.3 EAFZ南西端における複数断層破壊の可能性

南西への強い破壊指向性をもつE2は、次のエピソードへとさらに階層的にスケールアップし、最終的にはEAFZ南西端までを破壊するに至った。E4の特徴は、55秒後付近において急激に破壊進展が減速することである。この領域におけるポテンシーレート密度テンソルから推定される走向は、この付近におけるEAFZの全体的な幾何と一致しない。また、ポテンシーレート密度テンソルから推定される非ダブルカップル成分が24%を占める。再決定された余震分布も、この付近においては線状にまとまらず拡散しており、その構造を見出すのが難しい。地震前の地質調査[2,10]や、地震直後の現地調査[11]によって、この付近では、形状の異なる複数の活断層がジグザグと存在することが確認されている。これらの特徴から、破壊終端においては、複数の異なる断層における破壊が生じ、そのために破壊進行の遅れと、破壊の収束に寄与した可能性がある。

6.4 断層カーブとコンパクトな破壊過程

2つ目のM_w 7.6の地震は、破壊領域が狭く、破壊継続時間の短いコンパクトな震源過程といえる。ポテンシーレート密度テンソルから推定される走向は東西にカーブする様子を描いており、とくに震央から西にかけて、この破壊を擁したSFZと整合的な、反時計回りの回転がみられるなど、断層形状の複雑性をもつ。この回転は、背景の水平応力の最適な面に対応することになり、震央から西方への破壊進展を助長する傾向をもつ。破壊にとって好ましい断層の曲がりは、超せん断破壊を促進する場合があることが、数値シミュレーションにより予想されており[14]、震源過程モデルにより推定された超せん断破壊は、こうした断層のカーブにより説明することができる。さらに、東西の破壊終端においては、既知の活断層と震源過程モデルの両方において、滑りセンスと断層形状の変化が顕著である。例えば西端においては縦ずれ滑りが卓越し、その走向はほとんど南北に向いている。破壊域の西端ではGöksun-Savrun断層、東端ではNurhak断層複合体など、複雑な断層ネットワークを形成していることが知られている[2,10]。こうした断層幾何の特徴が、急激な破壊停止をもたらし、結果的にコンパクトな震源過程をもたらしたと考えられる。

近接する双子地震は、その発生間隔がわずか9時間であり、1つ目の地震発生が2つ目の地震発生を誘発した可能性について議論されている。こうした双子地震の発生については過去にも異なるテクトニクス環境で観測例がある。震源過程モデルを用いて、1つ目の地震によるクーロン応力変化を計算すると、2つ目の地震発生領域に対して、およそ0.4 barの正の静的応力変化をもたらすことがわかった[1]。こうした応力変化が、2つ目の地震の発生を促した可能性がある。

7. まとめ

2023年トルコ・シリア双子地震において、断層の曲がりや段差、枝分かれを含むセグメント化された断層ネットワークが、極めて複雑な破壊過程を駆動したことが分かった。とくに一つ目の地震に見られる、見かけ上の逆伝播様式は、主要断層から枝分かれした小断層における小さな破壊が、その後の主要断層における大きな破壊へと階層的にスケールアップした過程でもたらされたユニークな破壊様式といえる。また、二つ目の地震においては、断層の曲がりが、破壊の成長と停止の両面をコントロールし、結果的にコンパクトな高速破壊をもたらした可能性がある。幾何的に複雑な断層ネットワークで地震が発生した場合、こうした階層的な破壊進展と、それに伴う破壊進行方向の反転や高速破壊が生じうる。こうした観測事例は、地震発生物理の理解に有用であるだけでなく、断層幾何に影響を受ける特徴的な地震シナリオによって生じる強震動を考慮する上で重要である。

謝辞

本解説記事の執筆のきっかけを頂いた久保久彦博士および編集委員の皆さまに感謝いたします。

参考文献

1) Okuwaki, R., et al. : Multi-Scale Rupture Growth With Alternating Directions in a Complex Fault Network During the 2023 South-Eastern Türkiye and Syria Earthquake Doublet, Geophysical Research Letters, Vol. 50, No. 12, e2023GL103480, 2023.

2) Duman, T. Y., & Emre, Öm. : The East Anatolian Fault : Geometry, Segmentation and Jog Characteristics, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 372, No. 1, pp. 495–529, 2013.

3) Melgar, D., et al. : Sub- and Super-shear Ruptures During the 2023 M_W 7.8 and M_W 7.6 Earthquake Doublet in SE Türkiye, Seismica, Vol. 2, No. 3, pp. 1–14, 2023.

4) Kase, Y., & Day, S. M. : Spontaneous Rupture Processes on a Bending Fault, Geophysical Research Letters, Vol. 33, No. 10, L10302, 2006.

5) Okuwaki, R., et al. : Inchworm-like Source Evolution Through a Geometrically Complex Fault Fueled Persistent Supershear Rupture During the 2018 Palu Indonesia Earthquake, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 547, 116449, 2020.

6) Hicks, S. P., et al. : Back-propagating Supershear Rupture in the 2016 MW 7.1 Romanche Transform Fault Earthquake, Nature Geoscience, Vol. 13, No. 9, pp. 647–653, 2020.

7) Yagi, Y., et al. : Irregular Rupture Process of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake Sequence, Scientific Reports, Vol. 13, No. 1, 1107, 2023.

8) Shimizu, K., et al. : Development of an Inversion Method to Extract Information on Fault Geometry from Teleseismic Data, Geophysical Journal International, Vol. 220, No. 2, pp. 1055–1065, 2020.

9) Yamashita, S., et al. : Potency Density Tensor Inversion of Complex Body Waveforms with Time-adaptive Smoothing Constraint, Geophysical Journal International, Vol. 231, No. 1, pp. 91–107, 2022.

10) Emre, Ö., et al. : Active Fault Database of Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 3229–3275, 2018.

11) Reitman, N. G., et al. : Fault rupture mapping of the 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence from satellite data, USGS, 2023, https://doi.org/10.5066/P985I7U2.

12) Ide, S., & Aochi, H. : Earthquakes as Multiscale Dynamic Ruptures with Heterogeneous Fracture Surface Energy, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 110, No. B11, B11303, 2005.

13) Otsuki, K., & Dilov, T. : Evolution of Hierarchical Selfsimilar Geometry of Experimental Fault Zones: Implications for Seismic Nucleation and Earthquake Size, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 110, No. B3, B03303, 2005.

14) Bruhat, L., et al. : Rupture Complexity and the Supershear Transition on Rough Faults, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 121, No. 1, pp. 210–224, 2016.

奥脇 亮（おくわき りょう）

2019年に筑波大学大学院生命環境科学研究科で博士（理学）を取得。2019年、日本学術振興会特別研究員として産業技術総合研究所地質調査総合研究センターにて勤務。その後、2019年6月に筑波大学に助教として着任、フロリダ州立大学、リーズ大学、カルフォルニア大学サンディエゴ校での在外研究を経て現職。

八木 勇治（やぎ ゆうじ）

2002年に東京大学大学院理学系研究科で博士（理学）を取得。2002年～2005年、研究員として建築研究所国際地震工学センターにて勤務。その後、2005年4月に筑波大学に助教授として着任。2018年より同・教授。

トルコ南部における活断層分布と地震時の変位

近藤　久雄
●国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター 主任研究員

1. はじめに

2023年2月6日にトルコ南部で生じた2つの大地震（以降、2023年地震）は、トルコ南東部からシリアにかけて甚大な被害をもたらした（図１）。産業技術総合研究所地質調査総合センター（GSJ）とトルコ鉱物資源開発調査総局（MTA）は1980年代、継続的に国際共同研究を実施してきた。1999年イズミット地震以降、2013年までは北アナトリア断層系を対象に20世紀の大地震に伴う地表地震断層と変位量分布の再検討、トレンチ掘削調査等を実施した。2014年以降は、東アナトリア断層系の南西区間に調査対象を移行し、2014年には今回の主要な被害地の１つであるカフラマンマラシュ東方でトレンチ掘削調査を実施していた。その主な理由は、最後の大地震である1513年から当時までの経過時間500年が、さらに先行する1114年の地震から算出される地震発生間隔400年を超過しており、近い将来の地震発生可能性が指摘されていたことによる[1), 2)]。

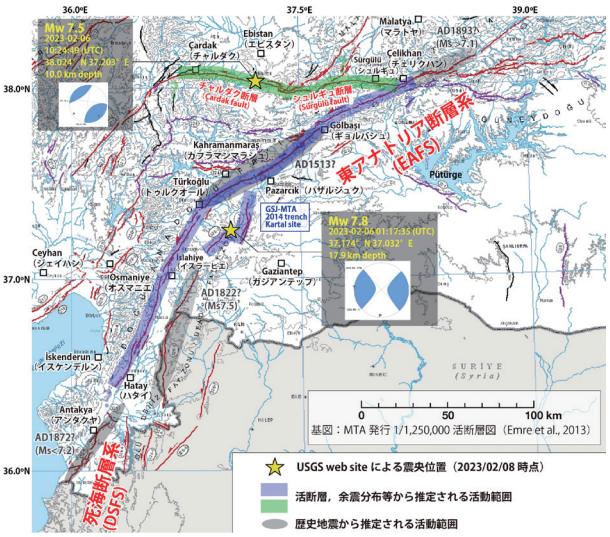


図１　2023年地震の震央と余震分布、既知の活断層との対応。基図はMTA(トルコ鉱物資源調査開発総局)発行の活断層図。文献[4), 5)]を加筆修正。

近年は、COVID-19感染拡大の影響等により共同研究が一時中断していたが、2022年10月に現地調査を再開し、2023年秋頃には2014年トレンチの再掘削調査を予定していたところであった。2023年２月の大地震は、その矢先で生じた大地震であり、Mw7.8の大地震はまさに2014年に調査していたトレンチ・断層区間を含む東アナトリア断層系で生じたものである。

本稿では、２つの大地震の震源となった活断層とテクトニクスについて概説し、地震に伴い生じた地表地震断層と変位量分布の概要を紹介する。前者の活断層分布については、主にMTAが発行する1/10万活断層図[2), 3)]、後者の地表地震断層と変位量分布については、GSJとMTAが共同で地震直後から緊急的に実施した地表地震断層分布と変位量の速報[4)-7)]を抜粋する。なお、地表地震断層分布と変位量計測については、トルコ地図総局（HGM）が地震直後に公開した高解像度衛星写真と空中写真を基に判読・計測したものである[8)]。地震の規模と本震の震源位置については、米国地質調査所（USGS）を用いる[9)]。

2. 2023年地震震源域周辺の活断層

Mw7.8及びMw7.5の大地震は、トルコ南東部を南西方向に延びる東アナトリア断層系を震源として生じた。東アナトリア断層系は、主にアラビア・プレートとアナトリア・プレートを境する、左横ずれのトランスフォーム型プレート境界断層である。その相対速度は、GNSSによる相対速度、地質学的な平均変位速度ともに約10 mm/yr前後とされている[10), 11)]。東アナトリア断層系の北東端は、カルリオヴァ付近で東西走向の北アナトリア断層系と接合するトリプルジャンクションに位置し、南西方向へ死海断層系ないし地中海に至る600km以上の長さで延びる[3)]。南西端の位置は、様々な議論があるが、最近のMTAの活断層図やテクトニクスの解釈をもとにすれば、カフラマンマラシュ南西のトゥルクオール付近で南北から北北東走向に延びる死海断層系とほぼ連続する[2), 3)]。死海断層系は、アラビア・プレートとアフリカ・プレートを境する、左横ずれのトランスフォーム型プレート境界断層である。東アナトリア断層系と死海断層系はいずれもプレート境界断層であり、本来連続して分布するとみられるため、両者の境界を定義することは便宜的なものであるが、ここではアンタクヤ付近を両プレート境界断層の境界として扱う。

Mw7.8の大地震の震源は、カフラマンマラシュ南方で東アナトリア断層系本体から派生するナール断層から生じ、東アナトリア断層系本体へ破壊が進展して北

東及び南西の双方向へ破壊が進展した[4)-7)]。震源断層全体は、北東端はチェリクハン付近から南端はアンタクヤ付近まで至る。一方、Mw7.5の大地震はMw7.8地震から約50km離れた、東アナトリア断層系の分岐断層のチャルダック断層とシュリュギュ断層の西端を主な震源として生じた。後述するように、チャルダック断層の東端付近から北北東へ分岐する、ドアンシェヒル付近の活断層においても地表地震断層が確認された。

このように、2023年の２つの大地震は、東アナトリア断層系と分岐断層が形成する、複雑に活断層が分布する地域で生じたものである。Mw7.8及びMw7.5の両地震ともに、それぞれ複数の断層ないし断層区間で構成されるため、両者ともに複数の区間の同時活動による連動型地震であったと考えられる。

3. 2023年地震に伴う地表地震断層と変位量

2023年地震に伴う地表地震断層の変位量の分布は、地震直後から順次公開されたHGMの衛星画像・空中写真を用いて実施した。写真の解像度は、衛星画像がGöktürk-1の50 cm、空中写真が30 cmである。地表地震断層の分布は、地震後の写真を仔細に判読し、地表地震断層が視認された位置をGoogle Earth上にプロットして位置情報を取得した。一部では、雲、森林、雪などに被覆され、地表地震断層が視認できなかった区間もある。Mw7.8及びMw7.5の地表地震断層で取得した位置情報は、それぞれ1937地点と998地点である。

また、変位量の計測は、HGMのウェブサイト上で水平距離を計測することが可能であり、断層の走向方向に左横ずれ変位量を計測した。Mw7.8及びMw7.5の変位計測地点数は、それぞれ359地点と83地点である。なお、上下変位量や短縮変位量は未計測であるが、局所的な上下・短縮変位を除き、東アナトリア断層系の主成分はほぼ純粋な横ずれ変位であるため、ここで紹介する変位量分布は一次近似としては妥当なものと考えられる。Mw7.8及びMw7.5の地震に伴う地表地震断層を図２、変位量分布を図３に示す。

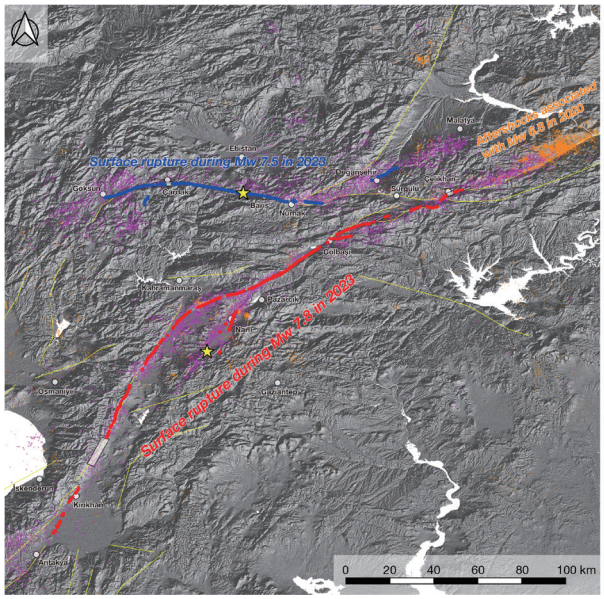


図２　Mw7.8およびMw7.5の地震に伴う地表地震断層の分布。文献[6), 7)]を引用。

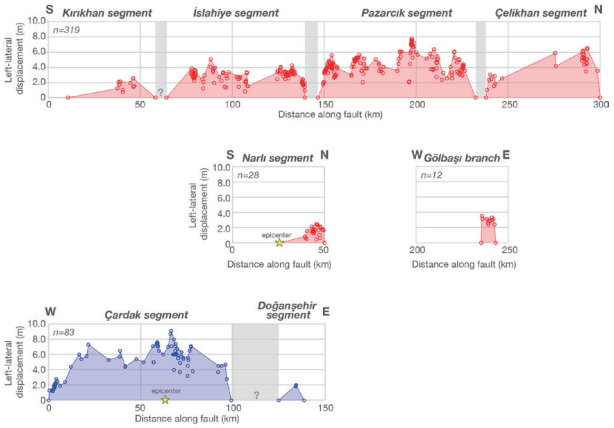


図３　Mw7.8およびMw7.5の地震に伴う左横ずれ変位量の分布。上段、中段がMw7.8、下段がMw7.5に伴う変位量。文献[6), 7)]を引用。

Mw7.8の地表地震断層は、総延長の長さは322 kmに及ぶことが判明した。これは、陸上の横ずれ活断層で生じた地表地震断層の長さとして、19世紀以降で世界で４番目の長さであり、長大な活断層で生じた大規模な地震であったことがわかる。また、計測された中で最大変位は、左横ずれ８m程度に達する。この横ずれ変位量も、これまでに知られる19世紀以降に生じた変位量の中で世界で５番目に大きい。Mw7.8の地震がいかに大規模であり、地表に大きなずれを生じたかを示している。今回の地震に伴って地表地震断層が構造物等にずれ被害を生じた特徴的な事例を図４に示す。

Mw7.5の地表地震断層は、総延長の長さは139 kmにわたる。ただし、主要な震源断層であるチャルダック断層と北東延長のドアンシェヒル付近の活断層との間に、地表地震断層が確認できなかった長さ26 kmのギャップがある。最大変位量は、震央付近で計測された９mの左横ずれ変位である。これらの特徴として、地表地震断層の長さに比して、最大変位量が大きい点が挙げられる。一般に横ずれ断層の場合、震源断層の幅が15～20kmで概ね一定であるため、震源断層長が長いほど地表の変位量が大きく、地震規模も大きいことが知られる[12), 13)]。しかし、Mw7.5とMw7.8の長さと変位量の関係を比較すると、Mw7.5の長さが半分弱と短いわりに変位量が大きく、逆の関係になっている。

図４　Mw7.8の地震に伴う地表地震断層と被害状況。A、B、Dの写真はHGMが公開する地震後の衛星画像[8]、CはGoogle Earthによる地震前の衛星画像。(A) アダナーシャンルウルファ高速道路を斜行する地表地震断層。(B) アルトゥヌズム市街地で個人住宅を切断する地表地震断層。(C) ギョルバシュ湖北岸における地震前の活断層位置（ピン）。(D) ギョルバシュ湖北岸における地震時の正断層成分により水没した土地・建物。

その理由として、今後の現地計測等も踏まえて再検討する余地もあるが、1）Mw7.8では震源断層の長さに対して最大変位量が飽和している点、2）Mw7.5の震源断層は分岐断層の一部であり、Mw7.8の震源となった東アナトリア断層系本体に比較して活動性が低く、活動間隔が長い可能性、3）震源断層面上のすべりの極大が相対的に浅かった可能性などが考えられる。同一の震源断層で活動繰り返しの時間間隔が長い地震では、相対的に高い応力降下量になることが古くから知られているため[14), 15)]、同じ断層面積の地震で比較した場合、活動間隔が長い地震ほど変位量が相対的に大きくなる。Mw7.8地震は東アナトリア断層系本体のプレート境界断層、Mw7.5の地震は内陸の活断層に特性が近いとみられる。このような、活断層の地震時変位と活動間隔の関係は、日本の内陸活断層についても該当する可能性が高く、今後、直接計測できる地表の地震時変位量や活動間隔、地震学的なすべり分布の推定結果等をもとに、広く検討すべき課題とみられる。

4. おわりに

本稿では、2023年トルコ南部で生じた２つの大地震を対象に、震源断層となった東アナトリア断層系や周辺の活断層分布、速報として明らかにした地表地震断層分布と変位量について紹介した。大規模な活断層地震に伴い生じた地表変位については、アラスカで発生した2002年デナリ地震においてパイプラインの損傷を免れた事例などを除き、被害低減の実例はまだ少ない。日本の内陸活断層の場合、世界的にみても極めて稠密であり、分布する絶対数が多い。そのため、全ての活断層に対して事前の対策を講じることは費用対効果等の観点から極めて困難とみられる。ただし、メートルオーダーの地表変位を伴う大規模な活断層のうち、少なくとも近い将来に地震発生の可能性が高いとされる断層について、例えば糸魚川―静岡構造線断層帯など[16)]では、優先的にずれ被害の低減へ向けた対策を講じることが必要である。また、対象断層帯や区間の選定後、より詳細なスケールでは、学校、病院、公共施設、

大規模集客施設等の構造物毎に個別の対策や検討を進めることが、現実的に被害低減を進める上で効率的・効果的と考えられる。

謝辞

本稿は、GSJ-MTA国際共同研究「東アナトリア断層系の古地震学的調査研究」の一環として実施した成果の一部である。MTA・Selim Özalp氏、東京大学・安藤亮輔氏、産業技術総合研究所・加瀬祐子氏、今西俊和氏には、活断層分布や連動型地震の破壊過程、テクトニクスについて議論いただいた。東京大学・三宅弘恵氏、東京工業大学・山中浩明氏には、地震発生直後から強震観測状況や貴重な情報共有をいただいた。記して、皆様に御礼申し上げます。

参考文献

1) Ambraseys, N.N.: Temporary seismic quiescence: SE Turkey, Geophysical Journal International, Vol. 96, No. 2, pp. 311–331, 1989.
2) Duman, T.Y. and Emre, Ö.: The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics, Geological Society of London Special Publication, Vol. 372, No. 1, pp. 495–529, 2013.
3) Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. and Şaroğlu, F.,: Active Fault Map of Turkey with and Explanatory Text, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series-30. Ankara-Turkey, 2013.
4) Kondo, H. and Imanishi, K.: First report 'Destructive earthquakes in southern Turkey on 6th February 2023 (Mw7.8 and Mw7.5): Mapped active faults and the estimated rupture sections', Geological Survey of Japan web site, https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/turkey2023/index.html（参照2023-09-05）
5) Kondo, H. and Özalp, S.: Second report 'Preliminary report on surface ruptures associated with Mw7.8 and Mw7.5 earthquakes in southern Turkey', Geological Survey of Japan web site, https://www.gsj.jp/en/hazards/earthquake-hazards/turkey20230222.html（参照2023-09-05）
6) Kondo, H., Özalp, S. and Imanishi, K.: Fifth report 'Primary surface rupture and slip distribution associated with Mw7.8 earthquake in southern Turkey', Geological Survey of Japan web site, https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/turkey2023/turkey20230309.html（参照2023-09-05）
7) Kondo, H., Özalp, S. and Imanishi, K.: Sixth report 'Primary surface rupture and slip distribution associated with Mw7.8 and Mw7.5 earthquakes in southern Turkey', Geological Survey of Japan web site, https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/turkey2023/turkey20230317.html（参照2023-09-05）
8) HGM website, https://www.harita.gov.tr（参照2023-09-05）
9) USGS web site, https://www.usgs.gov/news/featured-story/m78-and-m75-kahramanmaras-earthquake-sequence-near-nurdagi-turkey-turkiye（参照2023-09-05）
10) Aktuğ, B., Özener, H., Doğru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halıcıoğlu, K., Yılmaz, O., Havazli, E.: Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field, Journal of Geodynamics, Vol. 94, No. 95, pp. 1-12, 2016.
11) Herece, E.: Dogu Anadolu Fayı (DAF) Atlası, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publications, Ankara, Serial Number, 13., pp. 359, 2008.
12) 松田時彦、山崎晴雄、中田　高、今泉俊文：1896年陸羽地震の地震断層、東京大学地震研究所彙報、Vol. 55、795-895、1980.
13) Wesnousky, S.G.: Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 4, pp. 1609-1632, 2008. doi: https://doi.org/10.1785/0120070111
14) Kanamori, H., and Allen, C.R.: Earthquake repeat times and average stress drop, S. Das, J. Boatwright, C.H. Scholz (Eds.), Earthquake Source Mechanics, Geophys. Monogr., Vol. 37, Am. Geophys. Union, Washington, DC, pp. 227-235, 1986.
15) 松田時彦：起震断層と地震に関する２つの仮説（紹介）－活動間隔と断層の長さおよび断層線形態と累積変位量－、活断層研究、Vol. 9、pp. 6-10、1991.
16) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「糸魚川－静岡構造線断層帯の長期評価(第二版)」、60p、2015.

近藤 久雄（こんどう ひさお）

大学院博士課程後期からトルコ・北アナトリア断層系の調査研究に従事し、現在、東アナトリア断層系の古地震調査研究の日本側研究代表者。地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会活断層分会専門委員、全国地震動予測地図高度化WG専門委員など。

近地強震波形記録の特徴

長坂　陽介
●港湾空港技術研究所 主任研究官

1. はじめに

2023年2月6日1時17分(UTC)にトルコ南東部で発生したM_w 7.7 (AFAD)の地震では断層近傍で多くの強震動が観測された。過去の大地震と比べても多くの断層近傍記録が得られている。これらの記録の特徴を調べることは被害の分析に加えて震源過程の解明や今後の強震動予測に資するものと考えられる。本稿では地表地震断層からおよそ数km程度以内の観測点と大きな被害が発生したAntakyaでの強震動について、その特徴を紹介する。

2. トルコにおける強震観測記録

トルコの強震観測記録はDisaster and Emergency Management Authority (AFAD)により運営されているTurkey Accelerometric Database and Analysis System (TADAS)のウェブサイト[1)]から入手できる。TADASから入手できる記録の多くはAFADにより運営されているTurkish National Strong Motion Networkによるものである。また、一部の強震記録はEngineering Strong Motion (ESM) database[2)]から入手できる。大きな振幅を観測した2718や3138の強震記録は2023年8月時点ではTADASからは入手できないがESM databaseから入手できることを確認している。地点情報については、一部の地点に限られるもののレポートが公開されている[1)]。常時微動観測等の探査結果やVs_{30}の推定、サイトクラスの分類を行っているがボーリングのデータや土質柱状図は含まれてない。

得られた強震記録をよく調べると時刻や方位が正確ではないと思われる地点がある。また、特定の周波数が卓越する記録、途切れている記録も見られる。時刻については数秒程度の微妙なずれと思われる地点もある。例えば、3137地点は3145地点より震源から近いにもかかわらずP波初動の到達は約1秒遅い。周辺地点も合わせて考えると3137の時刻が遅れている可能性が高い。さらに、3137は方位についても約20°反時計回りに回転することで周辺地点と整合する方位となる。時刻や方位が重要となる解析においては留意する必要があると同時に、これらについて考慮していない文献についても注意が必要である。本記事で示す波形は時刻の補正は行っておらず、数秒の誤差を含む可能性がある。方位については3137に加えて3125、3126をそれぞれ反時計回りに20°、25°回転させた波形を示している。

3. 震源過程の概要

震源過程は断層近傍の強震動と密接に関係するため、概要を述べる[3),4)]。M_w 7.7の地震について、本稿で対象とする範囲を図1に示した。断層メカニズムは主に鉛直に近い面で左横ずれ主体のすべりが発生したとされる。破壊は東アナトリア断層から南側に外れた地点で始まり、Narli segment上を北東に進み東アナトリア断層のPazarcik segmentに合流した後、東アナトリア断層上を北東、南西方向にバイラテラルに進行した。北東側はErkenek segment上を進み（図1範囲外）、南西側はPazarcik segment、Amanos segmentに沿って南南西に進行した後、Antakya付近で停止した。断層長さが約300kmにわたり、また強震計が東アナトリア断層に沿って重点的に配置されていることもあり断層近傍で多数の強震記録が得られている。しかし、震源北東側は山間部で強震計が少なく、さらに途切れている記録も多いため断層近傍の記録は実質的に得られていない。南西側は断層沿いに多くの町が存在しており、強震記録も多く得られている。M_w 7.7の地震から約9時間後に発生したM_w 7.6の地震は北方の別の断層で発生したが、得られた断層近傍強震動は破壊域の西端に近い1地点のみである。本稿ではM_w 7.7の地震のみを対象とする。

4. 2023/2/6 1:17 M_w 7.7の地震の強震記録

4.1 全体的な特徴

断層近傍で多くの強震動が記録されたが、まずはこれらの多くに共通する特徴を示すため、Amanos segment沿いの4地点について変位波形を図2に示した。本稿の時刻歴波形は特に断りがない限り、加速度データにフィルターをかけずに時間領域で数値積分したものである。また、時刻0秒は発震時刻である。上下成分については支配的ではないため省略した。低周波数のノイズが波形に影響を与える可能性があるが、図2は定性的な傾向を示すことを目的としている。

まず断層直交成分を見ると、すべての地点で負の方向（ほぼ西向き）にパルス状の波形が見られるが、これ

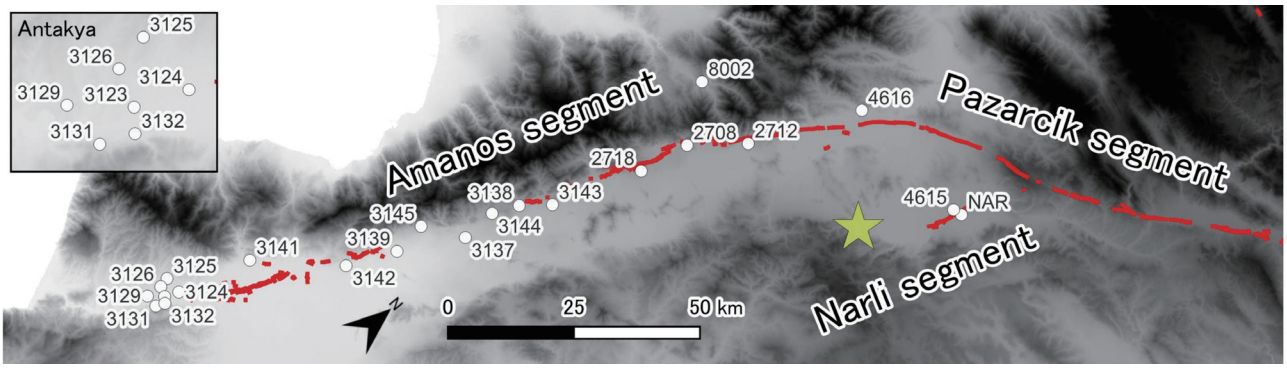


図１　対象地点と地表地震断層分布[5)]

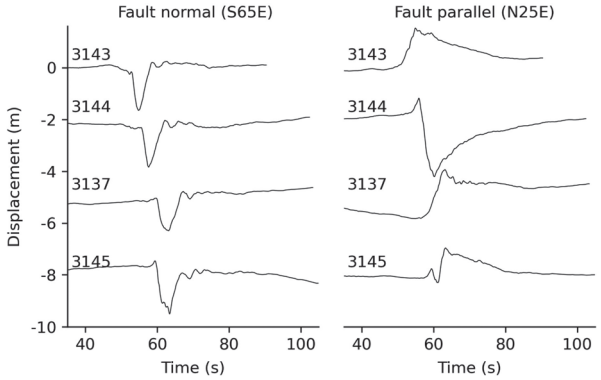
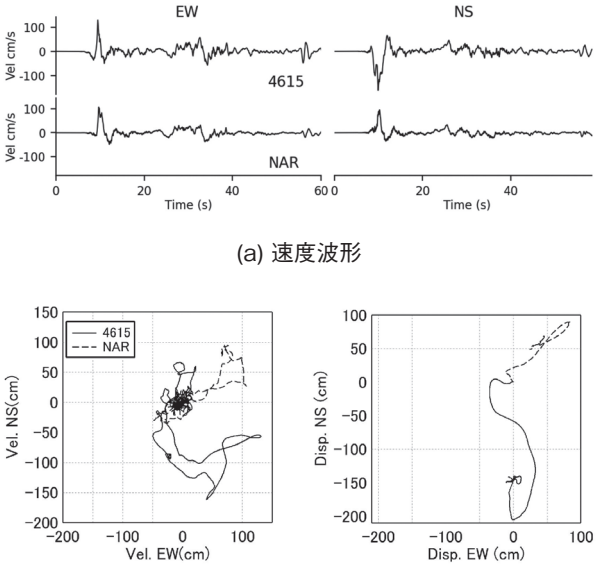


図２　Amanos segmentにおける変位波形



(a) 速度波形

(b) 左：速度軌跡、右：変位軌跡（0～20 sを使用）

図３　Narli segment周辺での強震観測記録

は南南西に進む左横ずれすべりによるディレクティビティの特徴が表れたものである。一方、断層平行成分は永久変位を伴う波形となっており、その形状からフリングステップ[6)]と呼ばれる特徴が見られる。これは速度波形では片揺れのパルスとなり、地表地震断層の近傍に現れる特徴であるが、2016年熊本地震の西原村小森の断層平行成分にも見られたものである。図2では3144のみが断層の西側、他3地点は断層の東側に位置しており、左横ずれ断層のすべりの向きに変位が生じていることが分かる。

これらの特徴は他の地点にも見られるが、セグメントごとに波形の形や振幅が少しずつ異なる。また、Antakyaは破壊の終端部にあり、異なる特徴を示す。Pazarcik segmentは本地震ですべりが最大であった領域や大きな被害が見られたKahramanmaraş等重要な領域を含むが、断層ごく近傍では強震記録が得られていない。そのため、本稿では図1に示すようにNarli segmentとAmanos segment、Antakya周辺の観測記録のみを対象とする。

4.2 Narli segment

ここでのNarli segment周辺は震源から東アナトリア断層を結ぶ破壊を指す。なお、トルコの活断層地図[7)]によるとNarli segmentはDead Sea Fault Zoneの一部とされる。Narli segment周辺では4615、NARの2地点で強震記録が得られている。両地点の速度波形と速度、変位の粒子軌跡を図3に示す。両地点の間にはほぼ南北走向の地表地震断層が表れており、4615が断層の西側、NARが断層の東側に位置している。この2地点はともに地表地震断層から1km以内であり、地表付近の断層すべりを強く反映した記録であると考えられるが、図3を見ると確かに両地点が南北逆方向に動いていることが分かる。ただし、完全に対称というわけではなく、純粋な横ずれ断層ではなかった可能性を示唆している。時刻歴波形の20 ～ 40秒には振幅は小さいが東アナトリア断層上のすべりによる揺れが記録されている。

4.3 Amanos segment

Pazarcik segmentを南西に進んだ破壊は南南西に向きを変え、Amanos segment上を進行した。Amanos

segmentでは約120kmにわたって破壊が生じたが、ここでは便宜的に2つに分けて特徴を示す。まずAmanos segment北部で得られた速度波形を図4に示す。4616は本稿ではAmanos segment北部に含めている。この区間では、4.1に示した全体的な特徴に加えて、2712や2708で断層直交方向により周期の短いパルス状の波形が見られる。多くの構造物にとってより厳しい揺れとなっている可能性がある。8002は断層から10kmほど離れた地点であり比較のために示しているが、8002には2712に見られるような鋭いパルスは見られない。

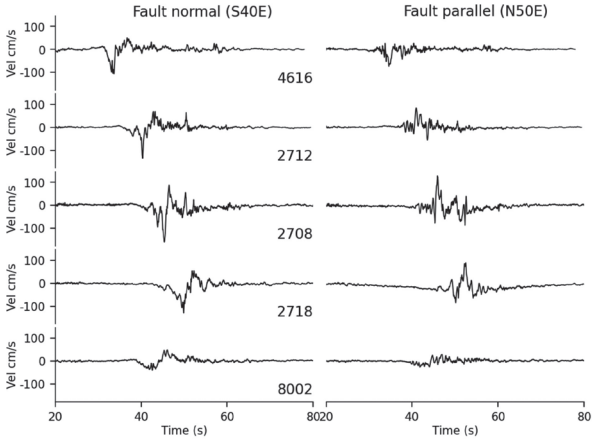


図４　Amanos segment北部での速度波形

次に、3143からAntakya手前の3141までの速度波形を図5に示した。これら地点の強震動の特徴もほぼ4.1に示した通りであるが、3143や3138等の断層直交成分はより片側（西向き）に鋭いピークが見られ、非対称なパルス形状となっている。最大速度(PGV)は特に3138が大きく、本地震で得られた強震動の中ではPGVが最も大きい地点である。しかし、近隣の3143、3144のPGVは3138と比べると明らかに小さい。また、断層平行成分にも地点ごとに大小が見られ、不均質なすべり分布やサイト特性の影響が示唆される。

3145、3139は他地点と比べると断層直交成分の波形がより複雑である。大きな1つのパルス状の波形にさらに短周期成分が重なるようなものとなっている。図1では3145は断層西側に位置するようにも見えるが、南方ではなく北方に変位しており、実際には3145が断層の東側に位置することを示している。この理由は3137と3145の間にステップオーバーが存在し、ここで断層トレースが西にずれているためであると考えられる。3145と3139での揺れもこの付近の断層の複雑さが影響している可能性がある。3141、3142は断層平行成分が小さく、付近のすべりが小さかったことを示しているが、断層直交成分は3141で100 cm/sを超えており、また次節に示すAntakyaでも大きな揺れが観測されている。

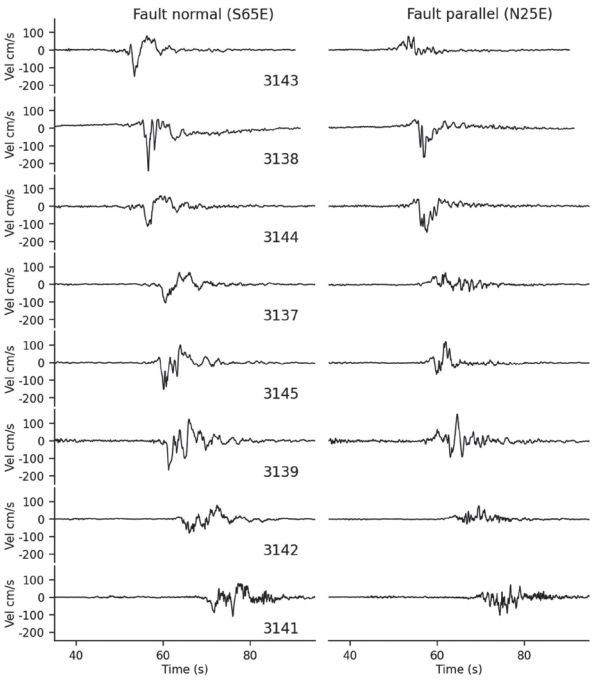


図５　Amanos segment中部～南部での速度波形

4.4 Antakya

Antakya市街では7地点で強震記録が得られている。得られた速度波形を図6に示す。Antakyaは本地震の南西側の破壊のほぼ終端部と考えられ、断層平行成分にはAmanos segmentに見られたような永久変位を伴う片揺れの速度パルスは見られず、3123や3129の南北方向の鋭いパルスが特徴的である。この南北方向のパルスは永久変位をほとんど伴わないため地表地震断層との関係は明確ではない。また、ディレクティビティ効果により期待される方位とも異なる。3131、3132のように他地点に比べて揺れが小さい地点もあることから、これらの記録にはサイト特性も大きく影響していると考えられる。

5. PGA, PGVと加速度応答スペクトル

最後に、波形以外の指標としてPGAとPGVの分布図を図7に、加速度応答スペクトル（減衰5%）を図8に示す。比較のため1995年兵庫県南部地震のJR鷹取を示している。本地震における断層近傍記録の多くはPGV 100~200 cm/s、PGA 600~1000 cm/s/sの範囲にあるが、一部にPGVまたはPGAが大きい地点が見られる。また、Antakyaはエリアとしては狭い範囲ながらも、PGVとPGAは広い範囲に分布していることが読み取れる。応答スペクトルは周期1秒前後で大きな地点を選んで示

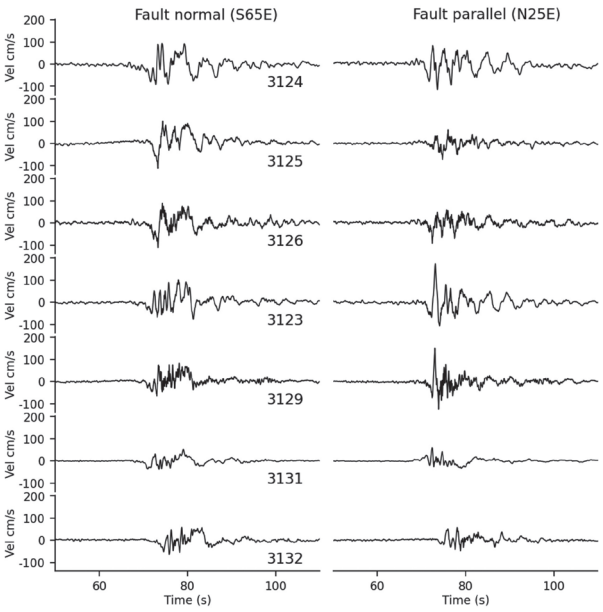


図６　Antakyaでの速度波形

した。周期1秒を超えたところでは鷹取が最も大きいが、3123などは鷹取に近い応答加速度を示している。断層ごく近傍の地点はこれらと比べると応答スペクトルは小さいが、これは比較的周期の長い単発のパルスが卓越したことが原因であると考えられる。

6. まとめ

2023年トルコ地震によって断層近傍で観測された強震動の特徴を簡単に紹介した。今後は震源過程やサイト特性、被害等との関連を解明することが望まれる。

謝辞

AFADによる強震記録、JR西日本による強震記録を使用しました。港湾空港技術研究所の野津厚氏より助言をいただきました。

参考文献

1) Turkey Accelerometric Database and Analysis System, https://tadas.afad.gov.tr/list-waveform (参照2023-08-25).
2) Engineering strong motion database, https://esm-db.eu (参照2023-08-25).
3) Okuwaki, R., Yagi, Y., Taymaz, T. and Hicks, S. P.: Multi-scale rupture growth with alternating directions in a complex fault network during the 2023 South-Eastern Turkiye and Syria earthquake doublet, Geophys. Res. Lett., 50, E2023GL103480, 2023.
4) USGS, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/finite-fault (参照2023-08-25).

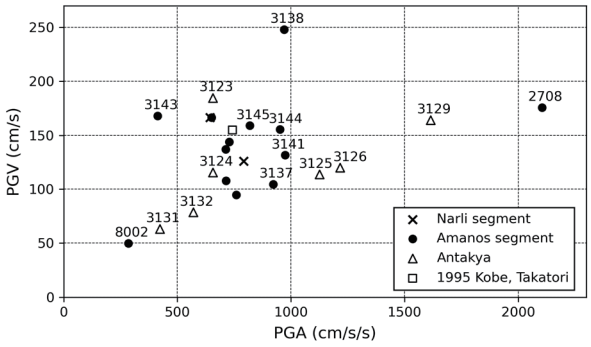


図７　PGAとPGVの分布

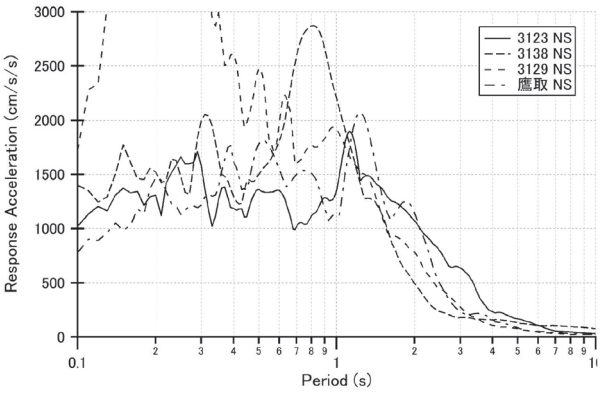


図８　加速度応答スペクトル

5) Reitman, N. G., Briggs, R. W., Barnhart, W. D., Thompson Jobe, J. A., DuRoss, C. B., Hatem, A. E., Gold, R. D., Mejstrik, J. D. and Akçiz, S.: Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye Earthquakes, doi: 10.5066/P985I7U2.
6) Hisada, Y. and Tanaka, S.: What is fling step? Its theory, simulation method, and applications to strong ground motion near surface fault ruptures, Bull. Seismol. Soc. Am., 111, 2486-2506, 2021.
7) Emre, Ö., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Elmacı, H. and Özalp, S., 2012, 1:250,000 Scale Active Fault Map Series of Turkey, Gaziantep (NJ 37-9) Quadrangle. Serial number: 38, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara-Turkey, https://www.mta.gov.tr/en/maps/active-fault-250000 (参照2023-08-25).

長坂 陽介（ながさか ようすけ）

2013年東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修了、港湾空港技術研究所主任研究官、専門分野：強震動予測

レーダー衛星による地殻変動解析から見た地震像

小林　知勝
●国土地理院 宇宙測地研究室長

1. はじめに

地下で断層がずれ動くと、永久変位として地殻変動が生じる。この地面の動きは、地下の断層がどこでどのようにずれ動いたのかを直接的もしくは間接的に伝え、我々が直に視ることのできない地下の動きを知る重要な手がかりとなる。それ故、地殻変動をどれだけ詳しく調べられるかは、地下の地震像をどれだけ詳しく理解できるかということと直結する。

大規模な地震が発生すると、断層破壊は時に数百kmにも及ぶ。このような時、全体像の把握のため衛星によるリモートセンシング観測は有効である。陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（以下「だいち2号」という。）は「だいち」の後継機として（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した合成開口レーダー（SAR）衛星で、2014年5月に打ち上げられた。日本国内の観測では、高分解能モードと呼ばれる50kmの観測幅で主に撮像が行われる。一方、これとは別に、空間分解能を犠牲にする代わりに350km幅を一度に観測可能な広域観測モードも搭載する。だいち2号では、後述する干渉SAR処理が広域観測モードでも標準的に可能になった。2023年2月6日にトルコ共和国南部およびその周辺で発生した地震（以下「2023年トルコ・シリア地震」という。）では、この広域観測モードでの緊急観測が実施されたことにより、本地震に関与した断層の破壊位置や様式の網羅的な把握が可能となった。

2. SARによる地殻変動観測・解析

干渉SARとは、人工衛星などに搭載したSARを用いて、ある地域を2回以上観測し、地上から反射してきた電波の位相差を計算することによって、衛星と地表間の距離変化を数cmの精度で計測することができる宇宙測地技術である（図1）。衛星の特長である広域観測と合成開口技術によって実現される高空間分解能により、だいち2号データの干渉SAR解析から広域の地殻変動を十数mの分解能で網羅的に捉えることができる（なお、本研究では約100mの分解能）。

一方、干渉SARには幾つかの短所もある。その1つが、大規模な変動（大きな変位勾配を持つ変動や地表状態を大きく変える変動）を計測できないことである。このことは地震観測において、断層近傍の変位計測が困難になることを意味する。実際、2023年トルコ・シリア地震においても断層近傍の変位を捉えることができなかった。そこで本地震においては、干渉SAR解析に加えて、振幅画像を利用して大規模変位を計測するピクセルオフセット法を適用した[1),2)]（図2）。

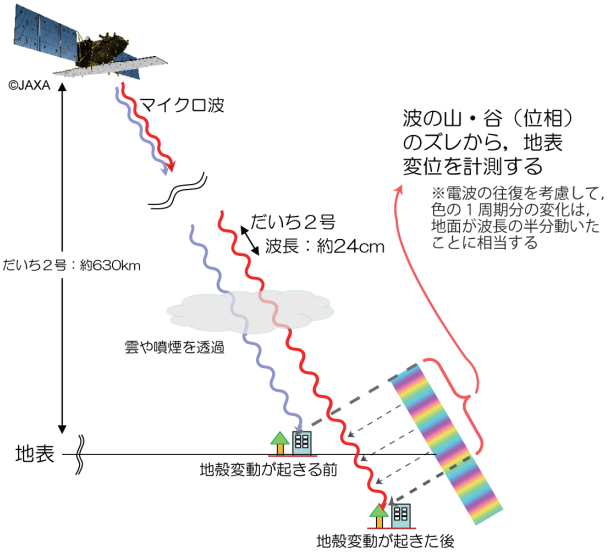


図１　干渉SARの原理

図２　ピクセルオフセット法の原理

本手法は、計測精度や空間分解能は干渉SARより劣るものの、衛星視線方向および衛星進行方向の直交2成分の変位が得られることから、東側および西側上空からの両観測データを用いることで、東西・南北・上下の3成分変位を推定することができる。今回、震源領域をカバーする画像（観測日：2023年2月17日及び同年同月20日）から4方向の変位が計測され[3]、これらを統合的に解析することにより、面的な3次元変動場を獲得することができた。

3. 地殻変動の特徴と断層セグメントとの関係

SAR解析の結果、東アナトリア断層帯に沿って、広域の地殻変動が検出された。地殻変動は水平成分が卓越しており、大きな上下変動は発生していない。本稿では、変動の水平成分を示しながら、断層との関係を分析する。東アナトリア断層帯の西部は、Çelikhan付近から南側及び北側に断層帯が分岐しているが[4), 5)]、Mw7.7及びMw7.6の地震[6)]に伴う地殻変動は、南側及び北側の分岐断層帯に沿ってそれぞれ分布する（図3）。南側の分岐断層沿いには、断層運動に相当するとみられる変位の不連続が約350kmの長さにわたり確認できる。不連続は、震央付近から東側では走向約N60°Eの方向に約200km延びる一方、西側ではTürkoğlu付近でその走向を南西方向に変えて約150kmの長さにわたり延びている（図4）。

この分岐断層帯は幾つかの断層セグメントで構成されていることが知られているが、変位不連続の位置から、Erkenekセグメント、Pazarcıkセグメント、Amanosセグメントが破壊されたと推察される。これらセグメントの全てで水平変位が卓越しており、左横ずれ運動を示す。最大約5mの変位が確認された。変位の不連続は、既知の断層線にほぼ重なっており、歴史的に繰り返されてきた断層運動と同じ場所で本地震も発生したことが示唆される。

これらセグメント沿いの変動とは別に、震央の北側には、断層運動に対応すると考えられる、ほぼ南北方向にリニアに延びる変位の急変帯が認められる（図4の白点線）。近傍にはNarlıセグメントがある。震央との位置関係から、破壊が北側に進展し、東アナトリア断層帯本体（Pazarcıkセグメント）に到達するまでの過程に伴う断層運動を反映した地殻変動と推察される。

得られた地殻変動は、断層破壊の末端の位置を詳細に示している。南側の分岐断層帯に分布する地殻変動においては、西側では、Antakyaの北約20kmで断層破壊がほぼ終了していることが示唆される（図4）。一方、東側では、Erkenekセグメントの東端でほぼ破壊が終

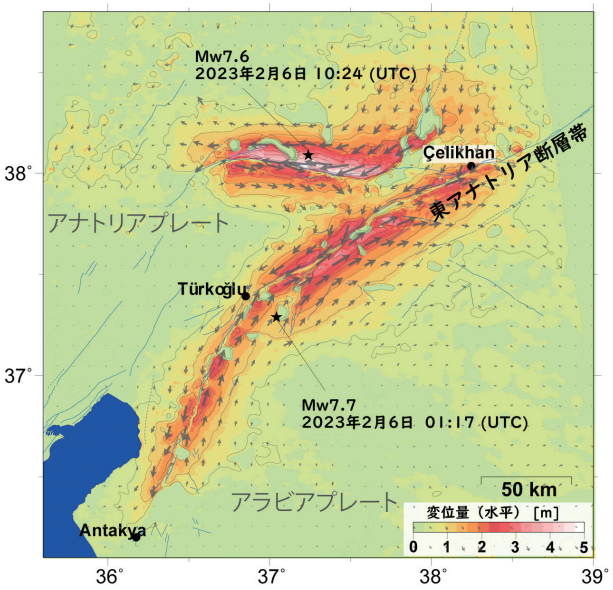


図３　SARにより捉えられた地殻変動分布図（水平成分）。等値線は0.5m間隔。矢印は水平変位の向きと大きさを示す。灰色線（カラーでは青線）は活断層を示す[5)]。★印は震央を示し、南側は2023年2月6日1時17分（UTC）に発生したMw7.7[6)]の地震、北側はその約9時間後に発生したMw7.6[6)]の地震を示す。

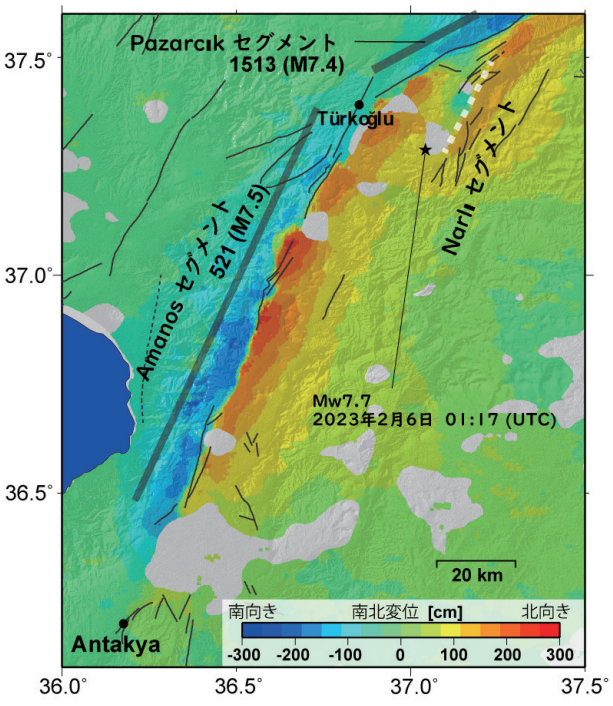


図４　SARにより捉えられたAmanosセグメント周辺の地殻変動分布図（南北成分）。黒線は活断層を示す[5)]。★印は震央を示す。

了していることが示唆される（図5）。Erkenekセグメントの東隣には、Püttürgeセグメントが存在するが、このセグメントの周辺に大きな地殻変動は観測されておらず、断層破壊がErkenekセグメントより東には進展していないことがわかる。

一方、Mw7.6の地震を引き起こしたと推定される北側の分岐断層帯では、東西約150kmにわたり変位の不連続が確認できる。南側の断層帯と同様、左横ずれ運動を示す（図6）。最大約6mの変位が確認された。この変位不連続は、主にÇardakセグメントに沿ってほぼ一直線上に見られる（図3、図6）。ただし、その両端では、その直線性が失われる。西側では、変位不連続の走向は南西方向に変わる。変位の不連続は、既知の断層線にほぼ重なっており、Çardakセグメントの西端で終了する。Çardakセグメントの南西延長上には、Savrunセグメントが存在するが、このセグメントの周辺に大きな地殻変動は観測されておらず、断層破壊が進展していないことが分かる。一方、東端でも、変位不連続の走向は変わる（図5）。Çardakセグメントの東延長部にはSürgüセグメントがErkenekセグメントまで延びていることが知られているが、変位不連続はSürgüセグメントの西側の一部と重なるものの、途中で北東にその向きを大きく変える。Sürgüセグメント周辺には大きな地殻変動は観測されておらず、断層破壊が進展していないことが分かる。北東方向に向きを変える前の変位不連続は、既知の断層線にほぼ重なっており、歴史的に繰り返されてきた断層運動と同じ場所でMw7.6の地震も発生したことが示唆される。しかしながら、北東方向に向きを変えた後は、既知の断層線と重なることなく変位不連続は約50km延びて終わる。近傍には北東方向に延びるMalatya断層やDoğansehır断層帯の存在が知られているが、これらの断層上には不連続は認められない。

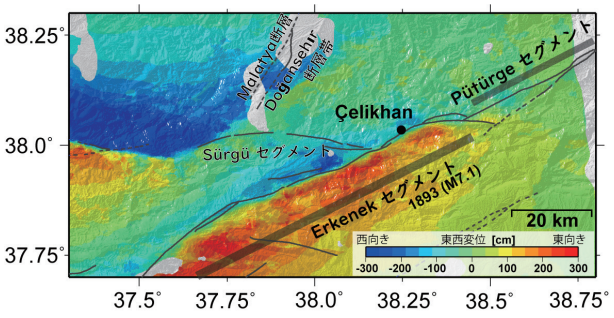


図５　SARにより捉えられたErkenekセグメント周辺の地殻変動分布図（東西成分）。黒線は活断層を示す[5]。

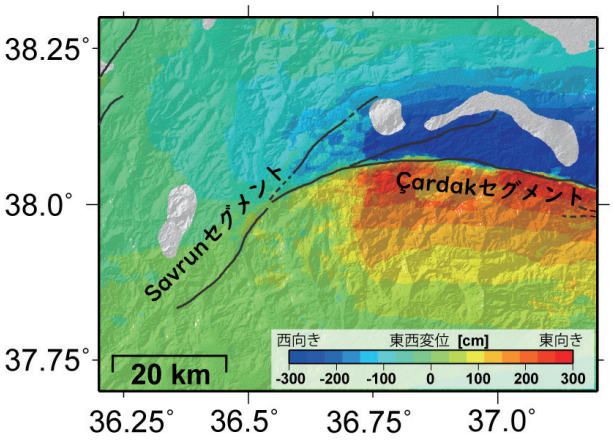


図６　SARにより捉えられたÇardakセグメント周辺の地殻変動分布図（東西成分）。黒線は活断層を示す[5]。

4. 歴史地震との比較

東アナトリア断層帯沿いにおける歪み蓄積については、西側に行くほど小さくなることが知られている。測地学的に推定されたすべり蓄積速度は、Amanosセグメント、Pazarcıkセグメント、Erkenekセグメントでそれぞれ3、4、6.5 mm/年であり[7]、地質学的・地形学的研究[4]から推定されている平均変位速度と概ね一致しているとされる。各断層セグメントにおける前回の大地震については、いまだ議論が続いており、不明確なところもあるようだが、ここではDuman and Emre (2013) [4]に従い議論を進める。Amanosセグメントの最後の大地震は、521年とされている。すべり蓄積速度3mm/年を考慮すると、521年以降に蓄積されたすべり量は4.5mとなる。Amanos断層では最大約5mの地表変位が地殻変動から得られているが、これと整合的である。このことから、この断層区間では2023年までに、観測された断層すべりを発生させるポテンシャルをすでに獲得していた可能性がある。一方、Pazarcıkセグメントと Erkenek セグメントでは、累積すべり量と2023 年のすべり量には不整合がみられる。Pazarcıkセグメントでは、前回の大地震は1513年（M7.4）に発生したと考えられている[8]。この区間のすべり蓄積速度（4mm/年）を用いると、1513年の地震以降に蓄積されたすべり量は約2mと見積もられるが、この区間では地表でも約5m近いすべりが観測されており両者は整合しない。さらに、Erkenek セグメントについては、1893 年にM 7.1の地震が発生したとされており[8), 9)]、それ以降に蓄積されたすべり量は約 0.8 m と見積もられる。しかし、この区間で観測された地表のすべりも5m近くに達しており、エネルギー収支の点で不整合を生じている。 蓄積されたエネルギーと放出されたエネ

ルギーは明らかに不均衡であり、2023年の地震で解放されたエネルギーは、これら既知の歴史地震よりも前に蓄積されていたことを示唆しているのかもしれない。このことは、同じようなマグニチュードの地震が一定の間隔で繰り返されるという、いわゆる固有地震モデルでは説明がつかないことを示している。ただし、より精緻な議論には、正確な歴史地震の年代が必要である。前回の大地震がいつ起きたのかについては、論文によりばらつきがみられることから、まだ議論の余地があるようである。東アナトリア断層帯沿いの地震の理解をより進めるため、当該分野の研究が今後進むことが望まれる。

5. おわりに

本稿では、2023年トルコ・シリア地震に伴う地殻変動の概要と、それらから推定される断層破壊と既知の断層セグメントとの関係について述べた。本地震におけるだいち２号の活躍は、SAR衛星が、数cmから数mまでの広いダイナミックレンジで、広域の地殻変動の詳細を網羅的に把握する強力なツールであることを我々に再認識させるものであった。地震現象の理解の進展のために、今やSAR衛星はなくてはならないものになりつつある。一方､だいち2号の運用期間は、設計寿命の5年を既に超えており、空白期間なく観測を継続するためにも、遅滞なく次の衛星が打ち上げられることが切望される。前号機だいちの運用停止からだいち2号の打ち上げまでには3年を費やした。現在、だいち2号の後継機にあたる「先進レーダ衛星（だいち4号）」の打ち上げが予定されている。SAR衛星が今後も打ち上がるためにも、SAR衛星観測の有効性と必要性の声を地震研究のコミュニティからも強く発信していくことが必要であろう。

謝辞

本研究で使用しただいち2号のデータは、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ（地震WG）から提供されました。だいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。

参考文献

1) Kobayashi, T., Takada, Y., Furuya, M., Murakami, M.: Locations and types of ruptures involved in the 2008 Sichuan Earthquake inferred from SAR image matching, Geophys. Res. Lett. 36, L07302, doi:10.1029/2008GL036907, 2009.
2) 小林知勝、飛田幹男、村上亮：局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析、測地学会誌、Vol. 57、pp. 71-81、doi.org/10.11366/sokuchi.57.71、2011.
3) 国土地理院：2023年2月6日トルコ共和国の地震に伴う地殻変動、2023、https://www.gsi.go.jp/cais/topic20230206_Turkey.html (参照2023-07-10)
4) Duman, T.Y., and Emre, Ö.: The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 372, pp. 495–529. doi:10.1144/SP372.14, 2013.
5) Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., and Şaroğlu, F.: Active fault map of Turkey, Special Publication, Series 30, General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara, Turkey, 2013.
6) Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).: Earthquake Catalog, 2023, retrieved from https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog (Accessed 2023-07-10).
7) Reilinger, R. et al.: GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, J. Geophys. Res., Vol. 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051, 2006.
8) Ambraseys, N. N.: Temporary seismic quiescence: SE Turkey, Geophys. J. Int., Vol. 96, pp. 311–331. doi:10.1111/j.1365-246X.1989.tb04453.x, 1989.
9) Ambraseys, N. N., and Jackson, J. A.: Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region, Geophys. J. Int., Vol. 133, pp. 390–406, doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x, 1998.

小林 知勝（こばやし ともかつ）

2004年東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士（理学）、現在、国土地理院地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室長、専門：地震・火山活動に伴う地殻変動、SARによる地殻変動解析技術の開発・高度化等

2023年トルコ・シリア地震被害調査

楠　浩一
●東京大学地震研究所 教授

1. はじめに

2023年2月6日、現地時間の午前4:17頃、トルコ南部の東アナトリア断層沿いのGaziantep県とKahramanmaraş県の境界付近のNurdağıを震源とするMw7.8の地震が発生した。その後、同日の13:24（現地時間）には、今度は先の地震からやや離れた北側の別の断層付近でMw7.5の地震が発生し、被害が拡大した。世界保健機構によると、2023年3月20日現在、トルコとシリアを合わせ56,000人以上が犠牲となり、最大2,300万人が被災したとみられている。この地震を受けて、日本建築学会災害委員会では、地震発生翌日から同学会会員に対して情報収集の呼びかけを始め、2月13日に拡大災害委員会を開催した。当該委員会において、正式に日本建築学会災害調査団の派遣を決定し、派遣検討WGの主査として楠（東京大学地震研究所）を指名した。その後、WGでは土木学会、地盤工学会、および文部科学省科学研究費補助事業（特別研究推進費）の「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」研究グループ（以下、特別研究推進グループ）と相談し、4団体合同で調査団を派遣することとした。また、調査日程を3月28日～4月4日とし、調査団団長を楠とすることとした。

調査の目的は、イスタンブール工科大学（Istanbul Technical University, 以下ITU）のAlper Ilki教授との情報交換を踏まえて、主として次の6点とした。

1. 強震観測点周辺の被害状況調査
2. RC造建物、鋼構造建物、組積造建物、免震・制振建物の被害概要調査
3. 病院・工場の事業継続に関する調査
4. 歴史建造物の被害調査
5. 地盤被害調査
6. トルコの建築関係の法令とその実態、および復興計画調査

2. 調査メンバー

調査団は、団長を楠、幹事を真田（大阪大学）、日比野（名古屋大学）、毎田（東京大学）がつとめ、総勢27名である。調査員名簿を表１に示す。調査では、調査対象に従って表１の「調査対象」に示す6つのグループに分かれて実施した。

表１　調査団メンバー

	氏名	所属	調査対象
1	楠　浩一[*1]	東京大学	RC 造
2	日比野　陽[*1]	名古屋大学	RC 造
3	毎田　悠承[*1]	東京大学	観測点・組積造
4	長江　拓也	名古屋大学	免制振・継続性
5	安藤　尚一	近畿大学	制度・非工学建築
6	中村　聡宏	建築研究所	RC 造
7	大西　直毅[*1]	東京大学	RC 造
8	倉田　真宏	京都大学	免制振・継続性
9	田尻 清太郎	東京大学	RC 詳細調査
10	カストロ ホワン ホセ	琉球大学	観測点・組積造
11	真田　靖士	大阪大学	観測点・組積造
12	Aleksey Shegay[*1]	東京工業大学	RC 詳細調査
13	杉本　訓祥	横浜国立大学	RC 詳細調査
14	鳥巣　セダ[*2]	大林組	地盤工学
15	Mohammad Mahdi Raouffard	大成建設	RC 詳細調査
16	浅井　竜也[*1]	東京大学	RC 詳細調査
17	福井　弘久	防災科学技術研究所	振動制御 ・免震
18	清田　　隆[*2]	東京大学	地盤工学
19	飛田　哲男[*2]	関西大学	地盤工学
20	尹　ロク現	大阪大学	RC 造
21	Jonathan Monical	東北大学	RC 詳細調査
22	久田　嘉章[*1]	工学院大学	免制振・継続性
23	小林　裕明	梓設計	免制振・継続性
24	丸谷　　聡	日本建築センター	制度・非工学建築
25	前田　匡樹	東北大学	RC 詳細調査
26	劉　虹[*1]	東京理科大学	RC 詳細調査
27	森脇　義則	安藤・間	RC 造

*1 特別研究推進グループ、*2 土木学会・地盤工学会

RC造のグループは、被災地域全般にわたって、被災建物の被害の概要を調査した。観測点・組積造のグループは大きな地震動が観測された観測点の状況とその観測点周りの被害状況を調査するとともに、歴史建造物や新しい建物を含む組積造建物の調査を実施した。免制振・継続性のグループは、免制振建物の被害状況および病院、工場などの継続使用性、さらに鋼構造の被害に関する調査を実施した。制度・非工学建築のグループは、トルコの建築に関する法制度や建物の確認検査の仕組みとその実態を調査するとともに、非工学（ノンエンジニアード）建築の被害状況を調査した。

RC詳細調査グループは、建物の構造部材の配置と寸法を記録し、日本[1)]とトルコのそれぞれの方法に基づいた被災度区分判定を実施した。最後に、地盤工学グループは、地盤工学会・土木学会との共同調査として地盤被害の調査を実施した。

トルコ側は日本側の調査対象範囲を鑑み、22名の研究者が参加した。研究者は、ITU、ボガチッチ大学、イズミール工科大学、ハラン大学、MEF大学、ミマール・シナン芸術大学、イスタンブール・キュルテュール大学、イルディス工業大学、およびイスタンブール市職員である。調査対象都市を図１に示す。

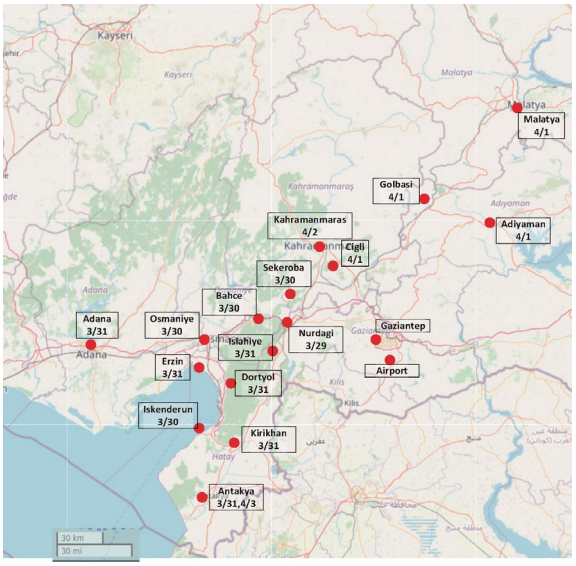


図１　調査対象都市

3. RC造建物の詳細調査

建物被害が多く見られた5県において、25棟のRC造建物を対象に、寸法計測や被災度区分判定等の詳細調査を実施した（大破10棟、中破6棟、小破3棟、軽微4棟、無被害1棟、精査中1棟）。

一例としてAntakyaで建設中であった4棟の集合住宅の例を示す。4棟とも平面計画は同じで、構造部材の寸法・配筋も同じと思われる。A棟はBF1＋11階建てで、脚部から転倒倒壊した。B棟はBF1＋12階建てで、1層が層崩壊した。C棟は13階建てで、その被害状況から全体崩壊形を形成したものの、南側に大きく傾斜し、残留変形角は最大で6%近くに及んでいる。D棟は8階建てで、被災度区分判定の結果、中破となった。

写真１に倒壊したA棟、写真２にC棟の建物全景と、一例として梁の被害を示す。梁は曲げ降伏後のせん断破壊とみられる被害が多数みられ、非常に大きな変形を経験したと考えられる。図２に各部材の被災度を示す。図には、1階のY4軸上の柱で計測した残留変形角も示している。X4-Y4柱で、南側に6.2%の残留変形角を生じていた。図からもわかるとおり、梁の被災状況が激しく、建物の被災度区分は大破となった。

写真１　13階建て集合住宅A棟（Antakya）

写真２　13階建て集合住宅C棟（Antakya）

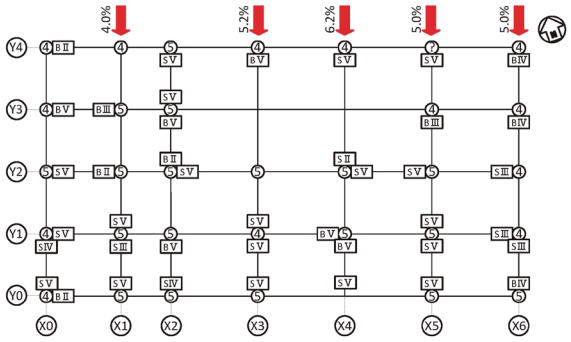


図２　被災度判定結果（○は柱の被災度で曲げ、□は梁の被災度でB：曲げ、S:せん断）

4. 免震建物の被害と工場・病院の事業継続性調査

ここでは、免震構造の病院とプレキャスト工場の被害について紹介する。

写真３はMalatyaに位置する、地下2階、地上7階建てRC造病院建物（2022年竣工）である。地下2階の柱頭に写真７のように転がり免震装置が配置されている。周辺地盤等とのクリアランスはおよそ1mであった。一方、転がり免震に残ったケガキ傷から推定すると、全振幅で18cm程変形したと推察される。被害は

クリアランス部のカバーなど、非構造材に若干生じたが、既に修復済みであった。

写真５はKahramanmaraşにある、建設中の工場建物で、プレキャスト構造である。図３に示すように、プレキャスト梁はコーベル上に設置され貫通ボルトで緊結されていた。一部ロングスパン部分では、梁にプレストレスが導入されていた。地震により、一部のプレキャスト梁が落下していた。

写真３　免震建物（Malatya）

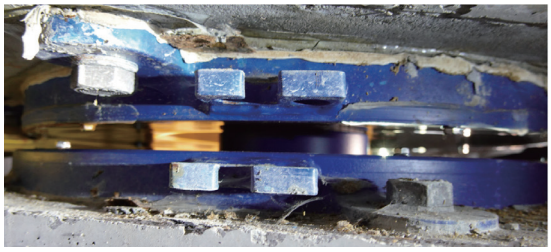


写真４　転がり免震装置（Malatya）

写真５　建設中の工場建物（Kahramanmaraş）

5. 積造建物の被害調査

主としてGaziantep内の組積造建造物の被害状況を調査した。Gaziantepには、歴史建造物としての組積造だけではなく、比較的新しい組積造建物も存在する。古い組積造建物でも写真６に示すように無被害であったものも見受けられた。一方、写真７に示すように、比較的新しい組積造建物であっても、被害を受けたものも存在する。この被害要因については、再度、現地調査を実施する予定にしている。

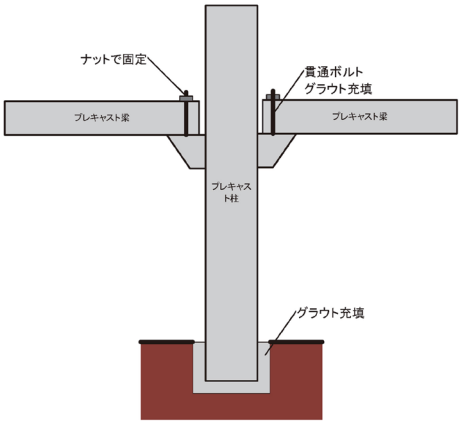


図３　プレキャスト部材の接合方法

写真６　古い組積造建物（Gaziantep：無被害）

写真７　新しい組積造建物（Gaziantep：被災）

6. 地盤被害調査

今回の調査は、土木学会・地盤工学会との合同調査であり、地盤被害および地盤変状に起因する被害も調査対象とした。ここでは、その一部を紹介する。

Çiğliでは、地表面に出た北東→南西の方向へ延びる断層が確認された（写真８）。鉛直方向におよそ1.3m、水平方向におよそ4mのずれが生じていた。周辺には2･3階建ての建物が複数あったが、甚大な被害を受けてすべて撤去された。

GölbaşıはGölbaşı湖に面する都市である。このあたりの建物は基本的にべた基礎である。地下水位は1.2m～1.5mで、水位が見えるまで掘削して基礎を造成するとのことであった。その為、きわめて多くの建物が写真９に示すように液状化により大きく傾斜していた。

写真８　地表面の断層（Çiğli）

写真９　液状化により傾斜した建物（Gölbası）

7. 法制度と復興・復旧調査

現地で関係する行政機関等を訪問し、ヒアリング調査を実施した。また、可能な限り設計・確認・施工の現状把握を試みた。住宅復興についても、ヒアリング調査を行った。写真10および写真11は、被災者用に展開されているテントおよびコンテナハウスである。ヒアリングの結果、Gaziantepのような大都市で古い建築物が多くても耐震診断や耐震改修は少ないことが分かった。

8.まとめ

2023年トルコ・シリア地震により被害を受けた地域の災害調査を実施した。その結果、以下の知見を得た。

1. トルコとの共同調査を有効に実施することができた。
2. Gölbaşıの軟弱地盤では液状化が発生した。
3. Gaziantepのような大都市で古い建築物が多くても耐震診断や耐震改修は少ない。
4. プレキャストRC造工場の被害が甚大であった。
5. 調査した免震構造の病院では被害は限定的で診療を継続できた。
6. 住宅復興の初期の避難所(テント)や仮設住宅(コンテナハウス)は、早期に集団的に準備されているが、災害住宅建設前に多くの住民が他の地域に移転している。

今後調査結果をまとめ、2023年度末を目途に報告書を取りまとめる予定である。

写真10　被災者用のテント

写真11　被災者用のコンテナハウス

お悔やみと謝辞

本地震で被災された方々にあらためて弔慰を表します。

本調査は日本建築学会により実施された。日本建築学会災害委員会委員長 塩原等教授に謝意を表します。また、調査の実施に際しては全国耐震ネットワーク委員会および日本建築センターからも補助して頂きました。更に、調査においては、在トルコ日本大使館、国際協力機構、国土交通省、トルコ環境都市化気候変動省、イスタンブール工科大学をはじめとする各大学の研究者各位、AFAD等、たくさんの方々のお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針、2005

楠 浩一（くすのき こういち）

1992年東京大学卒、1997年東京大学大学院博士課程修了、東京大学生産技術研究所助手、建築研究所主任研究員、横浜国立大学准教授、東京大学地震研究所准教授を経て現職、博士（工学）、専門分野：耐震構造、鉄筋コンクリート構造、構造ヘルスモニタリング

現地におけるライフラインの被害状況

小野　祐輔
●鳥取大学工学部社会システム土木系学科 教授

1. はじめに

2023年2月6日にトルコの南東部を震源としてMw7.7とMw7.6の地震が相次いで発生した。一つ目の地震が発生したのは日本時間の午前10時17分頃であった。筆者がこの地震の発生をいつ、どのように知ったのかはっきりとした記憶はない。当時のメールのアーカイブを検索したところ、当日午後6時頃には研究者仲間とのメールのやり取りを始めていたようである。筆者が一つ目の地震による被害の状況について情報収集を始めた後、日本時間午後7時24分頃に二つ目の地震が発生した。

現地の様子が徐々に明らかになるに従って、多数の建物が倒壊するなど激しい被害が発生していることがわかってきた。その後、日本地震工学会、土木学会、建築学会、地盤工学会等の関係者が協議し、現地に学術調査団を派遣する準備が進められた。いくつかの調査団が現地に派遣された中で、筆者は日本地震工学会と土木学会との合同調査団に参加する機会を得た。本稿では、筆者が現地で入手した情報を中心に、この地震によるライフライン被害の状況について報告する。

2. 現地調査の概要

現地調査は2023年5月2日から10日までの9日間で実施した。そのうち、被災地で活動できたのは5月6日の朝から9日の午前中までである。非常にありがたいことに筆者が参加した調査団にはトルコ・イスタンブール工科大学からBeyza Taskin准教授とMuzaffer Yazar博士に参加していただくことができた。この二人の参加がなければ、今回の現地調査の成果はまったく実りのないものとなっていたであろう。

図１は調査の経路と、調査を行った主な箇所を示したものである。震源域の東端に近いAdıyamanから調査を開始し、Gölbaşı、Narlı、Kahramanmaraş、Şekeroba、Nurdağı、Islahiye、Demirköprü、Antakya、Iskenderunとほぼ一つ目の地震の震源断層に沿って移動した。なお、Iskenderunでの調査を終えた後、Hatay空港からイスタンブール国際空港行きの便に搭乗する予定であったものの、出発予定の３時間前にその便がキャンセルされたため、急遽Adana空港まで陸路で移動し、イスタンブールを経て帰国することになった。

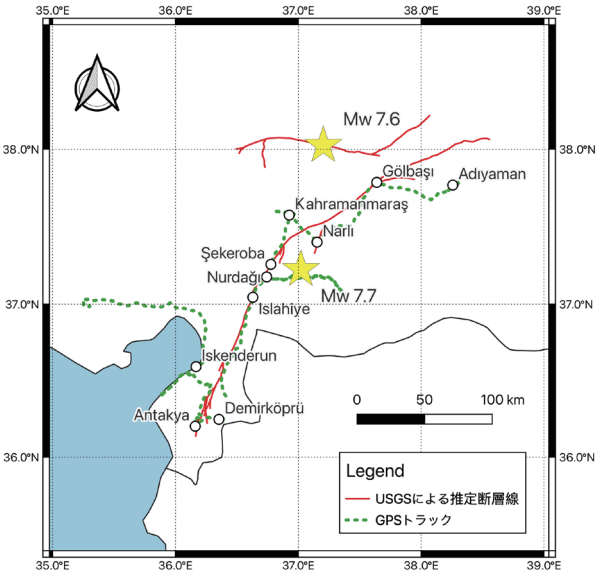


図1　現地調査の経路

3. ライフラインの被害状況

3. 1 道路

道路に関しては、橋梁の損傷の他、斜面崩壊や落石、液状化による側方流動等に加えて、断層変位による路面のずれが発生した。

写真1はAntakya郊外で落橋した橋梁である。基礎の支持力が不足し橋脚が傾いたことで、落橋に至ったと考えられる。写真2は断層変位を受けて、高速道路の路面が横ずれを起こした様子である。断層線に沿って4m程度左横ずれを生じたことが確認できた。周囲の畑には断層変位による横ずれの痕跡が残っていた。この写真を撮影した際には補修が施され、特に規制もなく車両の通行が可能であった。その他、桁の横ずれ抑止ブロックの損傷、桁と橋台あるいは桁と桁の衝突による損傷を受けた橋梁が複数確認できた。

写真１　Antakya郊外の落橋した橋梁

写真２　断層変位により横ずれを生じた道路

3. 2 鉄道

被災地域の鉄道路線は、その多くの区間が図2に示すように一つ目のMw7.7の地震の震源断層に沿うように整備されていた。そのため、断層変位の影響を直接受けて、線路が湾曲した箇所が複数発生した。筆者は、断層変位を受けて線路が座屈した箇所のうちNarlıとŞekerobaを訪問した。その際には、どちらでもすでに線路は修復されていた。地震直後の線路が湾曲した様子を撮影した写真は、現地調査を行った研究者や地域の住民によってSNSに多数投稿されており、現在も閲覧できる[例えば1-3)]。

その他、鉄道関連の被害としては、落石や斜面崩壊による線路の閉塞、停車中の車両の脱線、転覆があったことがAynda and Ulusay[4)]により報告されている。

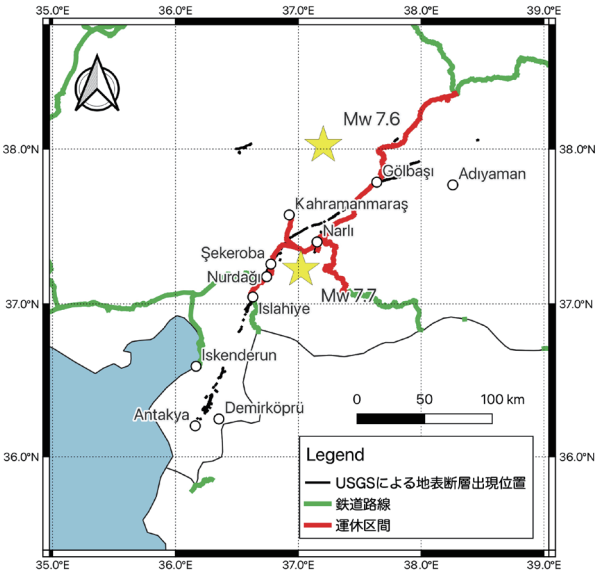


図２　被災地域の鉄道路線図

3. 3 電力

地震発生直後には広域で停電が発生したことがトルコ内務省危機管理庁（AFAD）のプレスリリース[5)]で確認できる。また、筆者が現地で被災者に行ったインタビューでも、多くの地点で地震直後に停電が発生したとの証言があった。米国EERIの報告[6)]によると停電の原因は変電所の被害であった。筆者の把握している範囲では、発電所で重大な被害は発生していない。

なお、電力の供給能力には直接影響はなかったと考えられるものの、部材の一部が座屈損傷した送電鉄塔があった。筆者が直接確認したのはNarlıとŞekerobaの２箇所で、どちらも断層を跨ぐ一組の送電鉄塔のうち、片方が損傷していた。断層運動によって送電鉄塔同士の間隔が広がったために送電線の引張力が増加し、地震動の作用と合わせて鉄塔に損傷が生じたと考えられる。部材の座屈した箇所は、対面の鉄塔方向に引っ張られた場合に発生すると考えられる箇所と一致していた。写真3はŞekerobaで撮影した送電鉄塔の部材の座屈の様子である。

写真３　部材が座屈した送電鉄塔

3. 4 上水道

正確な統計データは明らかになっていないものの、上水道の被害が多くの地域で発生したことは確かである。Gölbaşıでは、地震の発生から三ヶ月が経過し、一時的に避難していた住民が戻り始めているのにも関わらず断水が続いていたエリアもあった。Gölbaşıでは断層変位が地表に出現しただけでなく、液状化も発生しており、上水道の埋設管にも大きな被害が出ていたものと考えられる。Kahramanmaraşでインタビューすることができた市役所職員によると、Kahramanmaraşの上水道の管路網では、敷設時期の古いものが多く損傷しているとのことであった。また、Kahramanmaraşでは地震後、水源である井戸の濁りが問題になっているとの証言もあった。Adıyamanでは自宅が全壊したために避難所で生活している住民が、避難所には水道は引かれているものの、水場の数が限られており、洗濯や入浴が満足にできないと話していた。

3. 5 ガス

AFADのプレスリリースによると、天然ガスのパイプラインで漏洩が発生した他、予防的な措置として天然ガスの供給を一時的に停止したエリアがあった[5]。また、パイプラインから漏洩したガスに引火し、火災が発生していることが報道されていた。SNSへの投稿[7]によりこの火災の発生地点を特定することができた。この地点では図3に示したように断層変位が地表に現れており、断層変位によってパイプラインの損傷が生じたものと推察できる。なお、パイプラインが敷設されている方向が不明なため、断層変位によってパイプラインがどのような変形を受けたのかは不明である。

被災地域では、個々の住宅に天然ガスが引き込み管によって供給されている。写真4の中央に写っている管のように、住宅の被害を受けてガスの引き込み管が損傷した様子が多数見られた。Gölbaşıでは、写真5のように被害を受けた住宅の前の埋設管を掘り起こし、漏洩防止のキャップの設置が行われていた。

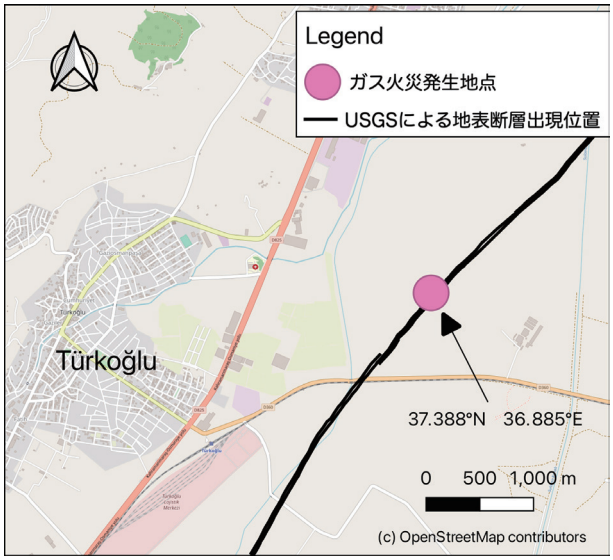


図３　ガスの漏洩による火災発生地点

写真４　損傷した住宅へのガスの引き込み管

写真５　ガスの漏洩防止キャップの設置状況

3. 6 その他

写真6はIslahiyeで地表近くに埋設されていた管路が地表断層変位の作用を受けて変形し、地表に露出した様子である。この地点では地表断層変位が出現しており、断層の左横ずれ変位に伴ってこの管は圧縮された。土被りが浅かったために、地表方向に向かって座屈変形し、地表に露出したと考えられる。

写真7はIskenderunで下水管のマンホールの修復作業が行われていた様子である。ここは海岸にごく近いエリアであり、地盤沈下が起きたことで雨水の排水に支障をきたしていることが報道されていた[8]。このマンホールの修復作業の目的を確認することはできなかったものの、排水機能の回復を意図としたものであろうと思われる。

4. おわりに

今回の地震の被害調査において、これまでの経験と最も違うと感じたことは、インターネットを通じて得られる情報の豊富さとリアルタイム性であった。発生直後から現地の様子が報道され、被災地の住民は現地の状況をSNSに盛んに投稿していた。ただし、これらの情報は被害の目立つ住宅の倒壊に偏っており、ライフラインの被害状況は現地に行くまでほとんどわからない状況だった。現地でも時間的な制約から十分な調査ができたとは言い難いものの、ライフラインにおいても大きな被害を受けていることを確認できた。最後に、この地震で被災され亡くなられた方々、ご家族や親しい人々を失った方々に対して哀悼の意を表し、この報告の結びとする。

写真６　断層変位を受けて地表に露出した埋設管

写真７　修復作業が行われているマンホール

参考文献

1) https://twitter.com/akyuz24/status/1624154084004487172 (参照2023-08-19).
2) https://twitter.com/kasimileri_/status/1623366974322446358 (参照2023-08-19).
3) https://twitter.com/CengizZabci/status/1623236454926229504 (参照2023-08-19).
4) Aydan, Ö and Ulusay, R.: A Quick Report on Pazarcik and Ekinözü Earthquakes (Türkiye) Of February 6, 2023, https://isrm.net/news/show/622 (参照2023-08-19).
5) Emergency Management Presidency, Ministry of Interior, Turkey (AFAD): PRESS BULLETIN -5 about the Earthquake in Kahramanmaraş-Pazarcık, https://en.afad.gov.tr/press-bulletin--5-about-the-earthquake-in-kahramanmaras-pazarcik (参照2023-08-19).
6) Earthquake Engineering Research Center: Preliminary reconnaissance report on February 6, 2023, Pazarcik Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaras-Turkiye Earthquake, Technical Report METU/EERC 2023-01, Middle East Technical University, 2023.
7) https://twitter.com/Stef_EQ_Geology/status/1630508950570389504 (参照2023-08-19).
8) BBC News Türkiye: Kahramanmaraş depremi: İskenderun neden sular altında kaldı?, https://www.bbc.com/turkce/articles/ce57mynyjp3o (参照2023-08-19).

小野 祐輔（おの ゆうすけ）

2002年京都大学大学院博士後期課程修了、博士（工学）。京都大学大学院助手、同助教、鳥取大学准教授を経て2018年より現職。専門は地震工学、応用力学。

トルコにおける建築基準

安藤　尚一
●近畿大学建築学部 教授

1. はじめに

現地調査（2023年3月29日～4月2日）が、日本建築学会、日本地震工学会等4団体の合同で実施され、筆者もその一員として参加した。ここでは現地政府へのヒアリングをはじめとする建築基準等に関する調査を行い、その結果を取りまとめたのが以下である。今回の現地調査は地震から約8週間後で、現地は戒厳令がかかった状態であったこともあり、トルコ側研究者との合同で調査を行った。なお、本稿に関して、Adar et al. (2021)[1]、Kemaloğlu (2015)[2]、国土交通省住宅局（2018）[3]などの文献が参考となる。

社会的な背景として、トルコの人口は2022年現在、8,500万人である。1963年に3,000万人、1986年に5,000万人、2006年に7,000万人、2016年に8,000万人とこの半世紀間、毎年100万人ずつ人口が増えている。また出生率もこの半世紀ほど日本の倍以上あり、一世帯当たりの子供が3－4人で、特に地方部では家族数も10人世帯が珍しくない。しかし所得が上がるにつれ世帯分離や核家族化も進んでおり、これに伴い、住宅戸数も数多く必要になっているのが現状である。

今回被害の大きかった地方の都市部と大都市圏では、人口増加が特に著しく、住宅建設も盛んに行われている。地方部においても近年の建築許可を受けた住宅のほとんどは中高層の共同住宅である。

2. トルコの建築耐震基準

トルコの建築耐震基準は、最初の規制が1944年に制定された。1939年12月26日にエルジンジャンで発生し、大きな被害をもたらした地震の後である。この建築規則では、当初、公的業務、免許、および罰則が含まれていた。鉄筋コンクリート構造について言及されていたが、詳細は示されていない。

1968年の規則には、さまざまな種類の自然災害に対する保護方法と設計規則が含まれている。鉄筋コンクリートという用語は、この規則で初めて使用された。

その後、1985年の建築法（ゾーニング法）の制定や1999年のコジャエリ地震を受け、耐震基準は2007年に改訂整備された。最新改定版TBDY-2018は2018年に公表、17の章と395ページで構成され、2019年1月1日に発効した。新しい基準は、2007年版を大幅に改定して、高層建築、免震建築及び木造建築などに関する規定が追加された。2018年地震規制では、地震力、設計加速度スペクトル、地盤の分類、耐震設計クラス、高さの範囲、柱の最小寸法などが改正又は新設された。

コンクリートと鋼材のクラス、および構造システムの寸法に大きな変更が加えられた。2007年規則では最小の具体的なクラスはC20であったが、新規則ではこの値がC25に決定された。角柱の最小寸法は25×30cmであるが、新規則では30×30cmと定められている。

3. 建築基準の執行体制

現地でのヒアリングは、Gaziantep県Nurdagi市、Gaziantep都市圏庁建築部局、Kahramanmaraş市役所担当者、NurdagiのAFAD、Gaziatep文化庁支所などに行った（写真1）。このうち建築基準関係で確認できた内容は以下の通りである。いずれからも、行政側の執行体制や現場での基準の確認検査体制が不足していることがうかがえる。以下はヒアリングの内容である。

Nurdagi市役所建築許可部局　2023年3月30日

（建築物被害全般）
・上下水道の被害が多い。
・古い建物が大破している事例が多い。

（建築図面・設計図書について）
・図面については、開示できる状況にはない。
・許可関係の図面は、すべて裁判所に持っていかれている。

（建築許可について）
・現在、通常の建築許可事務は行われていない。
・いつ再開できるかは、国の判断次第の状況である。
・2013年まではNurdagi市役所の自由裁量で建築許可ができていたが、それ以降県からの指導が増え、（Gaziantep）県が色々言ってくるようになった。
・震災前から、建築許可部局は、課長を含めEngineerが3名、Architectが1名、補助が1名の5人体制で行っている。20年前まではNurdagi市を1人で扱った。

Nurdagi市役所災害担当責任者　2023年3月30日

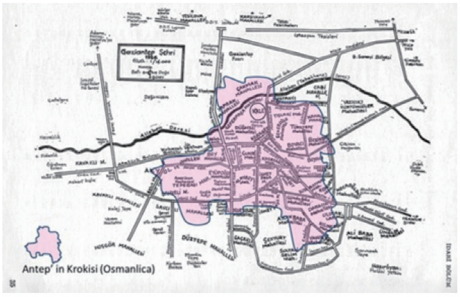
（建物被害について）
・どの建物も、外壁のコンクリートブロックが壊れている。
・倒壊した建物が多いこと、死傷者が今後増える可能

がある。
・被害は、データベースで（SNSを使用して）管理している。
・被害のデータは、持っているが、そのデータは開示できない。（被災地全域の市町村ごとの個々の建築物の被災度区分データを、GIS上に色分け表示。区分は、倒壊（赤）、早急に解体（濃橙）（うち解体済み（黒））、深刻な被害・大破（橙）、中程度の被害・中破（黄）、軽微な被害（黄緑）、無被害（水色）、未調査（灰）の6（7）段階）。
・被害のデータは、現在、意見徴収中であり、その結果変わるかもしれない。一昨日までが意見聴取の期限であった。その結果はまだこのデータベースには反映されていない。

Kahramanmaraş市役所担当者　2023年4月2日

市中心部の東側にある住宅団地で多くの被害が出た。
・団地は市が建設・分譲し、現在住宅は住民の所有になっている。
・平均の広さは120㎡程度である（80㎡は、住宅として狭い）。

写真１　現地調査　左：Kahramanmaraş市役所の女性技師　中：森脇　安藤・間トルコ代表、右：Alper Ilki イスタンブール工科大学教授（トルコ側の団長）



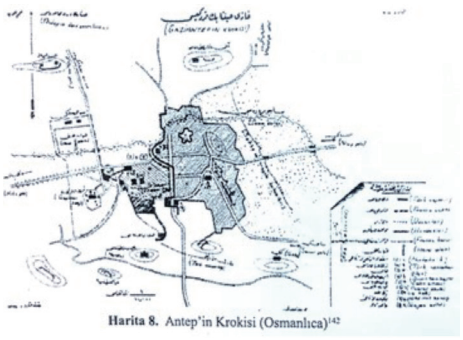


図１　Gaziantep　（上2つ）古い地図と現在の地図（Yandex Map 2018年、図2-4はYandex Map 2023年）

図２　Kahramanmaraş（上が古い地図、下が新しい地図）

4. 旧基準の建築物

古くから栄えたKahramanmaraş、Gaziantep、Hatay（Antakya）の3都市における約100年前の地図を東京外国語大の川本先生からいただき当時の市街地の範囲を推定した。Kahramanmaraşの前後比較で古い地域に倒壊建築が多いことがわかる（Gaziantepは図1、Kahramanmaraşは図2 ～図4）。

図３　Kahramanmaraş（地震後、2023年3月）

図４　Kahramanmaraş 中心部（地震後、2023年3月）

耐震診断

既存建築物の耐震診断方法は、基本的に新規建築物の耐震設計と同じである。ただし、現場調査と材料実験により得られた実際の構造物寸法、コンクリート強度を用いて計算する。耐震診断では、三次元モデルの解析により各部材（柱、梁、せん断壁）の耐力が要求された性能を満足するどうかをチェックする。これは、日本で使われている構造耐震 指標（IS）による耐震診断方法よりも詳細な評価手法と考えられる。

耐震補強設計

日本の耐震診断や補強設計とは異なり、トルコの補強設計の方法は新規建築物の耐震基準に従っている。同基準に示されている地震動と同等の地震動に耐えなければならないため、概念的には耐震補強された建物の耐震安全性は新規建築物のそれと等しい。例外は公称強度の代わりに実強度を用いることで、すなわち、地震荷重に対する安全性は材料の安全率によって与えられるのではなく、実際の断面や配筋に基づいて与えられる（2020年JICA報告書[4]　ES p.6より）。

5. トルコ政府の地震報告書による分析

5.1 地震被害の原因

現在政府公表中のKhramanmaraş and Hatay Earthquake Report[5]、p.26-27には以下のような記述がなされている。

「ITUやMETUを含むさまざまな機関が実施した分析によると、建物の破壊の主な決定要因は、地震動の激しさ、建物の基礎が置かれている地盤の耐力の低さ、次のような欠陥であることが判明した。建物の設計や施工の品質、建物の築年数、建築物の法令違反、隣接する建物の階数の違いなどである。（中略）建築品質の確保、建築ストックの耐震性の評価と強化、防災開発計画の原則・基準の策定等の対策が講じられてきたものの、特に無許可建築物を中心とした和解問題は希望のレベルでの解決はできなかった。」

5.2 建築物に関する課題と対策

課題と対策について以下に記載する。ページ数は当初のTurkiye Recovery and Reconstruction Assessment[5]からとっている。現在公表中の報告書からは、記述の一部が削除されているので注意が必要である。
(p.140-142)

「レジリエントな建物　　まず、我が国の建築ストックの品質とリスク状況に応じて判断し、リスクの高い建築物を優先的に改修すべきである。建築ストックの耐久性については、全国、特に地震地帯における建築確認を受けた建築物の危険状況が問われるべきである。違法建築物を特定し、違法建築物に対する制裁（売買の禁止等）を強化し、違法建築物の増加を防止すべきである。 建物の性能レベルに応じた定期検査と監査の手順と原則を策定することは、建物の健全性を定期的に監視するのに役立つ。建物内の建物健全性監視システムの使用を拡大することが重要である。（中略）

建築検査は、法律に準拠して耐久性のある構造物を構築するための最も重要な要素の1つである。 このため、関係機関・団体による検査・評価を通じて建築検査会社を定期的に監視できる体制を整備する必要がある。専門性が求められる建築検査業務の質を高めるためには、検査員の専門教育プログラムを確立し、その能力を認定する必要がある。

地震地帯で建て替えが予定されている建築物の責任技術者として働く技術者に求められる条件に加え、地震特有の知識、技術法規の適用、設計などを測る試験によって評価される必要がある。地震リスクのある優良国の例の枠組みの中で、エンジニアや建築家の卒業後の専門的経験に基づいた認定プロセスを確立することは有益であろう。」

(p.150-151一部略)

「建物の再建プロセスにおいて、2つの主要な地震は、最新のトルコ耐震基準に基づいた構造物の耐震性に関する科学的指針に従うことの重要性を示した。再建プロセスは、世界で最も最先端の耐震設計基準(ユーロコード8:2004、ASCE2010)に従って採用されたTBDY2018の適用から恩恵を受けるであろう。影響を受ける特定の地域の地盤は再建には安全ではない可能性があるため、地盤工学調査作業が必要になる。開発計画は地震リスクやその他の防災指針を引き続き尊重する必要がある。 都市のデータ管理は改善する必要がある。

地震が発生しやすい地域の住民の将来の安全と建物の構造に対する信頼を確保するには、許可の発行と検査をより厳格にする必要がある。」

6. 2020年JICA報告書[4]等の指摘事項

6.1 2007 地震防災分野技術協力レビュー調査

Long-term Actions: (p.20)

・建設違反に対する恩赦が政治的理由で頻繁に行なわれてきたことが、トルコで法律を守らず、管理が出来ていない、危険な状態と建築物が造りだされてきた主な理由である。

・計画、都市化、土地利用について、再構築からの開始が必要。

6.2 2020 建築物耐震化促進情報収集・確認調査

(ES p.2)

トルコにおける耐震基準は、過去の地震被害の教訓も踏まえ、改正されてきた。1998年の改定は、建物の動的な挙動を考慮したいわゆる新耐震基準に相当し、設計地震荷重が大幅に増加することとなった。従ってそれ以前の基準(いわゆる旧耐震基準)に基づいて設計・建設された建物は、一般に地震脆弱性が高く、耐震化の必要性が高いものと考えられる。

6.3 トルコの耐震化工事に係る技術水準

(ES p.4)

一般にRC部材に比べて鋼材が高いこともあり、トルコでは耐震補強における鉄骨ブレースなどの鋼材の使用はあまり普及していない。トルコにおける従来型の耐震補強方法の適用・実施は適切かつ効果的と考えられる。トルコにおける、先進手法による耐震補強技術の適用は限定的である。先進技術がまだ十分なコスト競争力を持っていないことも一因と考えられる。免震構造などを採用した病院や空港建物等の公共建物がいくつか見られる程度である。ダンパー等の減衰装置を用いた耐震補強を実施した工業施設の例もある。

7. 施工現場での諸課題

施工現場での諸課題は、ヒアリング調査のほか、現地調査でも見られた。まとめると以下の通りである。

7.1 コンクリートの品質・強度

現場でコンクリートを練っていた時代には、品質に大きなばらつきがみられた。ただし、最近の建築で多い(生コン工場から運んでくる)レディミクスト・コンクリートであれば、ばらつきは少なくなる。今回の調査では手で崩せるような粗悪な現場はみられなかった。

7.2 施工精度

最終日の工場地帯の新築現場では、(地震の被害ではない)精度の低い現場打ち鉄筋コンクリートの構造体の建設現場があった。

7.3 基礎・杭

Adiyaman県Gölbaşı市では、湖畔の住宅地で液状化で沈下した建物や傾いた建物が多くあった。現地関係者は「杭を支持地盤まで打ってあると聞いたが、本当かはわからない。」とのこと。

7.4 柱の太さ(径)

縦横比が規定されている耐震壁もあったが、ほとんどの建物は柱で荷重を支えている。その柱は縦横比が1以外の扁平柱である。以前の規定では25㎝の径の柱が認められていたが、2018年以降は最小寸法が30㎝となっている。

7.5 鉄筋の継ぎ手・定着

倒壊した建築物の構造体から見える鉄筋は、フックによる定着が135度ではなく90度のものが多くみられた。また、継ぎ手は床の位置でそろって行われて、コールドジョイントも発生して継ぎ手部分の強度低下やさびの原因になっている。また、特に高層の倒壊現場ではいわゆる過密配筋も散見され、鉄筋間隔の規定(TS500 /9.5.2 (トルコ規格))が守られていない。

7.6 あばら筋・帯筋間隔

倒壊又は大破した構造体の、あばら筋や帯筋間隔は、新しい建築物の場合はおおむね順守されているが、(2000年以前建設と思われる)古い構造物の場合は、間隔がかなり広いものがみられた。

7.7 鉄筋のかぶり厚

調査に同行したトルコ側カウンターパートが「鉄筋が錆びていなければ、構造耐力にかぶり厚は関係がない」と言っていた。多くの現場でTS500 /9.5.1 (トルコ規格)に定められたかぶり厚が、満足されていないのを確認できた。もともと施工現場でスペーサーを使用していた現場は(十数か所のうち)1か所だけだった。今後30 ～ 40年たった時に、耐久性上の大きな問題が起こる恐れがあり、地震が来なくても倒壊するといっ

た建築物の発生が懸念される。

8. 結論

・1939年12月27日午前1時57分（現地時間）のエルジンジャン地震により約33,000人が犠牲になって耐震基準の導入が始まり、最新の耐震基準はTBDY-2018である。
・人口増加に伴い新築マンション（共同住宅）が多く建つ地方都市で、公共団体内部に建築許可を担当する（耐震基準を理解した経験豊富な）技術者が少ない。
・古い基準に従って建てられた多くの建物が倒壊した。Gaziantepのような大都市では古い建物が多くても、耐震診断や耐震改修はほとんど行われていない。2007年に既存建築物の耐震化が規定されたが、2000年以前のコンクリートの品質が低いため、現行基準に適合する改修が困難である。
・被害調査現場では様々な施工上の問題がある。耐震基準は整備されているものの、現場に浸透していないと思われる。例えば施工上の問題として、スペーサーを入れても緩衝材に食い込んで隙間が確保できない現場もあった。なお、柱の断面寸法や配筋間隔規定などはTBDY-2018にあるが、荷重やかぶり厚の規定はTS（トルコ規格）にある。
・基準が浸透していない理由には、1）関係者や住民に地震に対する警戒感が薄かったこと、2）基準が多岐にわたり特に許可担当や現場管理者に理解されていないこと、3）現場検査が建築検査会社によるコンクリート強度以外ほとんど行われていないこと、4）建築許可手続きが厳格でないこと[5]、5）政治的に建築恩赦が行われてきたこと[4]などが挙げられよう。
・今後の新技術の活用として、今回のトルコの被害認定ではGISやQRコードを使った被害把握の対応が目を引いた。さらに、衛星画像を用いたAIによる被害分析や建築現場のIT化によるモニタリング監督・検査の可能性も、研究開発が望まれる。

参考文献

1) Adar, K., Büyüksaraç, A., Işık, E., and Ulu, A. E.: 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Yapısal Analizler Işığında Karşılaştırılması. Avrupa Bilim. ve Teknol. Derg, Vol. 25, pp. 306–317, 2021.
2) Kemaloğlu, M.: Türkiye'de Afet Yönetiminin Tarihi ve Yasal Gelişimi, Akademik Bakış Dergisi, Vol. 52, pp. 126-147, 2015.
3) 国土交通省住宅局、トルコの建築基準規制 2018 年 12 月時点（建築・住宅国際機構（IIBH）が2017年調査で作成）、2018、https://www.mlit.go.jp/common/001368966.pdf (参照日 2023-09-09).
4) JICA、オリエンタルコンサルタンツ：トルコ国　建築物耐震化促進にかかる情報収集・確認調査ファイナル・レポート、2020.
5) トルコ政府大統領府：2023 Kahramanmaraş and Hatay EQ Report（英語版）、145p、2023、https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-and-Hatay-Earthquakes-Report.pdf（参照日2023-09-09).（注：当初の報告書名は「Turkiye Recovery and Reconstruction Assessment：トルコ復興と再建の評価」218p）

安藤 尚一（あんどう しょういち）

1980年東京大学建築学科卒、建設省建築指導課、建築研究所、政策研究大学院大学教授などを経て現職、博士（工学）

被災地における復興と課題

澤田　雅浩
●兵庫県立大学大学院 准教授

1. はじめに

本稿は被災地における復興と課題について、1999年8月にトルコで発生したコジャエリ地震と11月に発生したドゥジェ地震（これらをあわせてマルマラ地震という）からの復興プロセスを通じて整理することとする。というのも、筆者は2023年2月の地震発生以降、いまだ現地調査には赴いておらず、現地での実情、そして計画策定経緯の把握ができていない。さまざまな調査報告会等もすでにトルコ国内や日本国内でも開催されているが、その情報を整理するのではなく、あくまで四半世紀前に発生した震災のみを取り上げることで、今後進んでいく復興プロセスをある程度予見し、理解する補助線となることを期待したい。

コジャエリ地震の発生直後から行われた復旧・復興に関する各種対応は、ドゥジェ地震の発生によってさらに広範な対応を迫られることとなったが、震災発生後４年を経過した時点で、復興住宅の完成と引渡しが行われるなど、復興プロセスは順調に進んだ。そこでは、トルコ独自の災害対応体制や計画策定に関する特徴が反映されている点も多い。ここではマルマラ地震の災害復興プロセスにおいて特徴的であった点を対象として、その特徴を生み出す背景となったトルコにおける災害対応体制の状況と、その変容、さらにはその変容の受容過程を整理するものである。

2. トルコにおける特徴的な復旧･復興支援策

マルマラ地震における人的被害や建物被害等に関する整理は中林[1)]などが詳しい。それらを踏まえ、トルコにおける地震災害からの復旧･復興プロセスの特徴を把握し、それらの対応が行われる背景となった状況や災害対応体制ならびに関連法制度との関係を明らかにする上で、必要となる被害状況ならびに復旧･復興対策を整理する。

マルマラ地震における建物の被害状況とその後の各種対応の概要を表1に示す。当時、トルコにおける震災復興に関して最も特徴的だったのは、住宅所有者への復興支援の手厚さにある。住宅所有者が被災した場合、その被災程度に応じての支援が行われる。特に大破・全壊認定を受けた場合、所有戸数に関わらず一戸分の再建の支援が受ける権利を得られる「有権者」認定が行われた。

表１　マルマラ地震(1999)の建物被害と再建支援

建物被害	被害戸数	復興支援		備考
大破・全壊	93,152戸 コジャエリ地震 66448戸 ドゥジェ地震 26704戸	恒久住宅 37,320戸	国によるもの 18団地　30,987戸	恒久住宅希望者よりも建設戸数が多くなっているのは，係争中で今後希望が見込まれるものが含まれる． それでも余剰が発生する場合には売却可能性あり
			世界銀行（MEERプロジェクト）によるもの 9団地　12,068戸	
		再建支援 5,853戸		集合住宅の場合，階数制限に伴う合意形成が困難となっている．
		代替住宅購入支援 9,244戸		
		有権者複数所有分（賃貸分・別荘など）・係争中など 40,735戸		複数住戸所有の場合にも得られる権利は一つであるため，賃貸住宅オーナーや別荘所有者が含まれる．
中破・半壊	104,581戸 コジャエリ地震 66,756戸 ドゥジェ地震 37,825戸	RC造建物の修繕支援 45,041戸		
		それ以外の修繕支援 2,492戸		
		有権者複数所有分（賃貸分・別荘など）・係争中など 57,048戸		複数住戸所有の場合にも得られる権利は一つであるため，賃貸住宅オーナーや別荘所有者が含まれる．

中林(2003)[1)]，越山(2002)[3)]，ヒアリング記録を元に作成

また、この建物被害を受けた被災者への復興支援策のうち、恒久住宅の建設に関しては、既成市街地から離れた郊外の丘陵地域に新規に恒久住宅団地を開発することで行われた。これもトルコにおける震災復興プロセスとして特徴的なものである。結果として国が主体となって建設した恒久住宅団地は18団地30,987戸、世界銀行を中心とした国際支援によって建設されたものが9団地12,068戸の総計43,055戸が供給されることとなった[2)]。

3. マルマラ地震からの復旧･復興を支えた仕組み

3.1 トルコにおける災害対応体制の枠組の確立

トルコにおいて、災害対応体制が法律によって確立するきっかけとなったのは1939年に発生したエルジンジャン地震である。そこでは、トルコにおける震災復興として初めて復興住宅団地の郊外移転が行われた。これは1940年に施行された第3773号法「エルジンジャン地震と被災地域における建物増設に関する法律」が根拠となっている。さらには1944年に成立した第4623号法「地震災害軽減基準法」からは、災害毎の特別措置法的な性格とは異なり、各種災害に対して適応可能で、かつ被災者の支援方法を具体的に定めた法体制となった。そして最終的に災害対応体制の枠組みが確立したのは1959年に成立した第7269号法「災害法」によってである。さらにはその後1968年に成立した第1051号

法と、それらに関連して制定されている規則によって災害復興を総合的に実施するための法制度の整備が実現したといえる。

3.2 災害法が定めてきた復旧・復興プロセス

災害法では災害対応体制やそこでの活動、その権限などを定めているだけでなく、被災者への支援について多くのことを定めている。その第一の特徴が建物被害を受けた被災者に対しての被害の確定と再建支援に関する条項である。被災地においては、数々の緊急対応活動が行われる一方で、復旧･復興に関わる取り組みも並行して実施される。その一つが建物被災度判定であり、災害法第13条で定められている。ここで大破もしくは全壊認定を受け、建物撤去の必要性が生じた場合、第29条に則った有権者の確定作業が行われる。ただし、複数の住居を所有していてそれらがともに被災した場合でも所有者一人に対して一つの権利が与えられる形で確定される。ここで確定した有権者に対しては、現地における住宅再建支援、新規住宅購入支援、そして恒久住宅の提供のうちの一つを選択することが可能となる。

一方、原則としてこれらの支援は「融資」として行われ、返済方法もまた第40条に明示されている。この融資に対する利子は無利子であり、またその債権額が確定した後、最短20年での均等払いによって返済されることが規定されている。当時、トルコではインフレが進んでおり、時間の経過に伴い、その負担は小さくなることが想定されていた。また、災害法第16条において、災害地域の一地区の移転が中央政府の諸機関で構成される委員会での審議を経た後、内閣決定によって公共事業･住宅省が実施できる権限を与えている。さらには同一自治体内であれば内務省と公共事業･住宅省によって内閣決定の必要なく実施することができるとされている。

二つ目の特徴として、有権者はその権利を、あくまでも有償、もしくは融資という形で有するという点にある。結果として、有権者は恒久住宅の提供をはじめとする再建支援策を選択し、新規に建設された住宅を入手した場合でも、大破・全壊認定を受けた従前の居住地の所有権を失うわけではない。震災発生以降、既成市街地内では従前よりも低い階数での建築制限がかけられた。特に集合住宅の場合、この制限によって従前戸数もしくは従前床面積を確保することが不可能となり、再建への合意形成を困難にしている。物理的な建物の再建は行われていないものの権利自体は存続しており、その権利との交換によって再建支援の権利を与えていないことで従前居住地との関係を考慮する必然性が低下し、公共事業･住宅省はその建設用地を既成市街地から離れた郊外の丘陵地域へと設定することが可能になったといえる。

3.3 復興計画策定手続きを定める災害法と計画法

被災地の復興計画の策定手続きもまた、災害法第15条に定められている。まず、被災地における都市計画の整備状況と改正の必要性の有無が検討され、改正が必要だとみなされた場合には改正計画が５ヵ月以内に公共事業･住宅省によって作成されることとなっている。また､これらの計画を持たない地域が被災した場合にはその上位計画となる環境整備計画とともに公共事業･住宅省によって最優先で作成されることとなっている。

災害復興計画を被災地において策定する場合も、災害法で定められたプロセスによって行われるだけでなく、計画法によって定められる枠組みに準拠した形で行われることとなる。マルマラ地震からの復興過程における既成市街地の建築制限と、恒久住宅団地の郊外立地というマルマラ地震における復旧･復興プロセスを特徴付ける二つの施策もこのプロセスに準じて計画されたといえる。被災自治体のうち、アダパザルでは液状化による建物倒壊が数多く発生した。また、被災地全域においては建物構造の脆弱さに起因する建物倒壊も多く発生した。このような地震被害の特徴に加え、震災前は農地として利用されていた土地での恒久住宅団地の建設を可能にするためには、整備建設計画だけでなく、上位計画である環境整備計画の変更の必要も生じることとなり、各地域のマスタープランとなる整備建設計画の変更の前に、公共事業･住宅省の地方事務所によってそれぞれの地域の環境整備計画が変更される必要性が生じたのである。

自治体によっては、既成市街地の歴史的位置付けや産業立地の状況などを考慮して、整備建設計画の見直しによる復興計画策定に際し、それらの地域の再建計画を盛り込んだ案が検討された。しかし、結果的にはその上位計画である環境整備計画の変更案が地盤調査の結果に基づき承認されたことで計画の整合性を図ることができず、環境整備計画で既成市街地に新たにかけられた建築制限に従わざるを得ない状況となった。復興計画の策定においては、震災被害が広域かつ甚大であった結果、地域ごとの計画の独自性を考慮する余裕が失われてしまったこと、さらには建物被災者に対する再建支援策を早急に実施する必要性に迫られた中央政府によって政府としての対応を迅速に行うことが重要視され、従来それぞれの自治体の都市計画を担っていたそれまでの整備建設計画や具体的な用途規制などが考慮される余地がなかったといえる。

3.4 トルコにおける都市計画の主体と権限

計画法に定めれられる都市計画の策定プロセスと権限をみると、上位計画としての環境整備計画の制限は受けるものの、それぞれの市自治体における都市計画の策定権限は市自治体に担保されていた。事実、マルマラ地震以前の環境整備計画はほとんど見直しがなされておらず、見直しをした場合にも既成市街地のダウンゾーニングのような制限を強化する方向への見直しは行われていない。しかし、地域性や既成市街地の再建計画が考慮されることなく復興計画を策定できるような中央政府の非常時の権限も、計画制度の成立過程において確立されており、マルマラ地震からの復興計画の策定においては、この枠組みが適用されたに過ぎなかったと見ることも可能である。トルコにおいて都市計画の主体と権限が定められたのは、1930年に第1593号法、通称「都市法」の成立に端を発する。この法律によってトルコでは初めて市自治体が成立し、本格的な民主主義制度における都市計画が可能となるとともに、都市開発計画（マスタープラン）の作成が定められることとなった。さらに1933年に成立した第2290号法、通称「都市建築·道路法」がトルコ最初の都市計画法とされ、都市規模に関わらず50年間の都市開発計画の策定が義務付けられ、そこでは街路計画や地区の規模、そして居住密度などが定められることになった。その後、1957年の第6785号法、通称「都市計画法」の策定などを経て、1972年に第1605号法、通称「新都市計画法」が成立し、そこでは人口1万人以上の都市へのマスタープランの策定義務の設定や、都市化の急速に進展する地域への公共事業·住宅省の権限強化、そして自然災害発生危険地域への権限強化が図られた。この法律によって、トルコにおける都市計画は、マスタープラン策定における地方の権限の担保を行いながら、災害時の権限は中央政府が有するという体制の基礎を構築したのである。最終的に1985年に第3194号法、通称「計画法」が新都市計画法を改正して成立し、1984年に成立した第3030号法とともに震災当時の都市計画の枠組みを規定している。

4. 組織や制度の変容とその受容の可能性

4.1 復旧・復興過程における課題

マルマラ地震からの復旧・復興過程においてはいくつかの問題点が指摘された。特に建物被害に関しては、地盤状況の悪い土地への立地が原因となっただけではなく、建築基準に合致しない建物や、増築して階数が増えた建物の被害も多く発生した。トルコにおいても建築物を設計する際には基準が設けられているが、その基準に従った設計を行い、建設許可を得た場合にも、実際の建築時にはより脆弱な構造や資材を用いて建設されることが多く、完成時の検査も行われていなかった。また、災害法が被災建物の所有者への再建支援を明確に規定しているにもかかわらず、その建物が建築基準に合致しているかどうかの審査が行われないまま権利が付与されたことや、そもそも政府がほぼ無償に近い形で代替住居を提供する仕組みを持っていることで、復旧·復興に際して莫大な予算が必要となった。

また、被災地での復興計画の策定については、従来それぞれの自治体で策定されていた整備建設計画を踏まえない、地盤条件を重視した計画策定が行われた結果、既成市街地における住宅をはじめとした建物の再建はきわめて困難になっている。従前建物よりも低い階数に制限された地域に立地する集合住宅などでは、再建に際して必要な合意形成を図ることもできず、既成市街地では建物撤去がなされたままの空地が目立つこととなった。その影響で、市自治体は商業施設や住宅の再建支援を既成市街地で行うことが困難な状況を生み出すことになった。

4.2 災害保険制度の設立

マルマラ地震からの復旧·復興過程において、住宅再建支援はトルコの災害復興支援の中で最も特徴的であったが、反面、そのために必要とされた財政負担は莫大なものとなった。恒久住宅の建設に関しては世界銀行の全面的な支援も受けることとなったが、今後の災害復興支援において、建物被災者に対する再建支援方法は大きく再編されることとなった。1999年に第587号法令が施行され、自然災害保険機構（DASK）が設立された。この組織によって地震保険が設立され、建物所有者は地震保険の加入が義務付けられた。これは登記されている建物に対し、5つのレベルの地域危険度と3つの構造を組み合わせた15種類で保険料が設定されるものである。一例として年間約4千万トルコリラ（当時レート）の掛け金で、地震で全壊した場合上限200億トルコリラを受け取ることができるというものであり、従来有権者に認定されれば住宅再建支援は政府によって実質的に負担されてきたものを、被害に対して支払われる保険金によってその費用をまかなうという制度である。しかし、この制度が成立して以降に発生したアフィヨン地震やビンギョル地震での建物被害を受けた被災者に対しては、地震保険未加入者に対しても支援が行われるなど、制度の運用が厳密には行われていない状況となっていた。これまでは自然災害によって被災した場合には政府による再建支援を受けることができた建物所有者の意識変革を行いなが

ら、災害保険制度の加入促進と、それを用いた災害復興支援を行うことは大きな困難を伴うプロセスである。保険への加入が進まぬ中で新たな災害が発生した結果、過渡的な措置としてこれまでの住宅再建支援と同様の支援を行わざるを得ず、そのことが今度はさらに保険加入への意識を低下させるという悪循環に陥りつつあるともいえ、加入者を増加させることは課題となっていた。こういった制度が今回のトルコ南部地震の被災地でどのように適用されてきたのかについては今後把握していくことが重要であろう。

地震保険の加入に当たっては、登記されている建物であることが条件となる。なお、既存の建物に関しても建設に際しての登記がなされていなくてはならず、いわゆる不法に建設された建物は受け付けられない。マルマラ地震時の住宅再建支援においては、有権者の確定を行うに当たり、建物の所有が明らかとなれば建物自体の違法性が問われることはなく、建設許可を受けたものと異なる構造や階数の建物も対象となった。このことも政府の財政負担が増大する要因のひとつとなったといえ、地震保険の義務化に当たってはその対応も必要となった。このような背景から、登記に当たっては、建物検査を正確に行い不適格建物の登記を認めないことで地震保険による支援対象を管理するために、地震保険の施行にあわせて2000年に第595号法令にて建物検査に関する規則が施行された。さらに、第601号法令によって専門家の認定についても規定し、さらに第4708号法、通称建設管理法による施工管理制度の確立によって制度の運用を支援する体制を整備している。この体制整備が今回の震災でどのように効果をもたらしたのかについても今後調査を進めつつ明らかにする必要もあるだろう。

4.3 既成市街地の再建

震災からの復旧･復興計画は、公共事業･住宅省により、地盤調査に基づく環境整備計画の見直しによって、既成市街地の多くの地域では従前より低層の階数制限がかけられることとなった。しかし、市自治体は既成市街地の再建による復興の推進を目指している場合も多く、いくつかの自治体では既成市街地での再建を可能にするために、公共事業･住宅省が実施した地盤検査より詳細な検査を行った結果を根拠として現在の階数制限を緩和する改正計画案を公共事業･住宅省に提案しているケースもあった。震災当初は、公共事業･住宅省が担う恒久住宅建設事業を迅速に推進するために策定された計画としての色合いが強く、恒久住宅の完成と引渡しが一通り完了した時点において、従来トルコが整備してきた市自治体の計画権限が徐々に回復しつつあったのかもしれないが、その点については詳細を把握していない。

5. まとめ

ここでは、2023年トルコ南部地震ではなく、1999年トルコ・マルマラ地震からの復旧･復興過程における特徴を、トルコにおける災害対応制度や都市計画制度を整理しつつ、そこで生じた問題点がどのように改善され、適用されつつあるのかについて整理した。

トルコにおけるこれまでの災害対応の特徴のひとつに建物所有者が被災した場合の国による再建支援があげられる。また、その際提供される恒久住宅の建設地選定は、既成市街地との位置関係よりも地盤調査の結果を重視して行われ、郊外の丘陵地に画一的に恒久住宅団地が形成されることとなった。このことを可能にしたのは、トルコにおける災害対応を定めた「災害法」を適用しながら、都市計画の枠組みを定める「計画法」に定められた非常時の中央政府の計画権限と上位計画の策定権限によってである。

しかしこのような災害対応体制は、マルマラ地震のように甚大な被害が発生した場合には中央政府の財政負担の増大を招き、結果的にこの枠組みはマルマラ地震後大きく変容を遂げることになった。地震保険への加入義務付けはその代表的なものである。加えて、迅速な災害対応を実施できるような組織の再編も行われている。トルコにおいてはマルマラ地震以降、ようやく防災を念頭に置いた施策が重要視されつつある。マルマラ地震を契機として改善された制度がどのように今回の復旧・復興プロセスに寄与したのかについては、稿を改めて整理してみたい。

参考文献

1) 中林一樹：阪神・トルコ・台湾における住宅と都市の震災復興過程に関する比較研究、総合都市研究第80号、pp. 5-37、2003.3
2) 日本建築学会：1999年トルココジジャエリ地震災害調査報告、丸善、2001. 9
3) 越山健治･中林一樹：1999年トルココジャエリ地震における住宅復興計画に関する考察、日本建築学会学術講演梗概集F-1、pp. 225-227、2002. 8

澤田 雅浩（さわだ まさひろ）

2000年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科単位取得退学、長岡造形大学建築・環境デザイン学科准教授を経て現職、博士（政策・メディア）、専門分野：災害復興計画、地区防災計画

学会ニュース

2023年2月に発生したトルコ南部の地震（M7.7，M7.6）に関する被害調査報告会（速報）の報告

阿部　慶太
●日本大学 准教授

1. はじめに

2023年2月6日4時17分頃（現地時間）、東アナトリア断層系を震源とするMw7.7の地震が発生した。またその9時間後、異なる断層を震源とするMw7.6の地震が続いて発生した（以後、これらの地震を併せてトルコ・シリア地震と呼ぶ）。日本地震工学会では、土木学会地震工学委員会および関係学術団体等と連携して現地被害調査を実施した。また、科学研究費補助事業（特別研究推進費）「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」調査団、日本建築学会、土木学会、地盤工学会の合同災害調査団による現地被害調査も行われた。そこで、調査結果と情報を共有する場として、土木学会地震工学委員会と共催で被害調査報告会（速報）を2023年5月29日にオンライン開催した。本報告会では6名の方にご報告頂き、大学や民間の研究者や技術者を中心に800名ほどの方に参加頂いた。

2. 報告会の概要

土木学会地震工学委員会の加藤一紀氏（大林組）による司会ではじまり、日本地震工学会会長の高田毅士東京大学名誉教授（日本原子力研究開発機構）より開会のご挨拶を頂いた後、土木学会地震工学委員会地震被害調査小委員会委員長の小野祐輔教授（鳥取大学）より調査団の紹介がなされた。その後、6件の報告があった。表1に報告題目と報告者の構成を示す。

一件目として、後藤浩之教授（京都大学）より「地震動」について報告された。前述したように本地震は東アナトリア断層系を震源とした地震、その9時間後に異なる断層を震源とする地震が発生しており、いずれも震源の浅い左横ずれ断層運動によるもので、断層浅部で大きな滑りが生じたと推定され、部分的には破壊速度がS波速度を超えるSuper shear ruptureが生じていた可能性があることが報告された。また、震源断層の近傍では最大速度2.0m/sを超えるような強い地震動が観測されており、特にIslahiye町からAntakya市にかけて強い地震動記録が得られていること、一部の記録には、周期1.0 ～ 2.0秒を除いてJR鷹取波を上回るような加速度応答もみられることが報告された。さらに、南西側の断層に沿って得られた稠密な地震記録には、共通して断層平行成分にFlingパルスが認められ、断層延長上に位置するAntakya市内では非常に強い速度パルスが観測されているものの指向性パルスによるものとは考えにくく、今後詳細な検討が必要であることが報告された。

表１　報告項目と報告者（敬称略）の構成

No.	報告題目	報告者
1	地震動	後藤　浩之（京都大学）
2	断層	吉見　雅行（産業技術総合研究所）
3	ライフラインの被害	小野　祐輔（鳥取大学）
4	橋梁の被害	井上　和真（群馬工業高等専門学校）
5	地盤関連の被害	志賀　正崇（長岡技術科学大学）
6	建築の被害	毎田　悠承（東京大学）

二件目として、「断層」について、吉見雅行氏（産業技術総合研究所）より報告された。本報告では、トルコ・シリア地震の１度目に発生したMw7.7の地震の震源断層沿い地表地震断層について、現地で観察した結果が報告された。断層出現位置の多くはMTA（トルコ鉱物資源調査開発総局）発行の活断層図に概ね沿うものであり、断層変位形態は左横ずれ主体、断層走向の揺らぎによって部分的に上下変位が生じている場所もあったが顕著ではなかったことが報告された。ズレ量は断層東側のGölbaşi町で5.0m程度（2条に分かれる）、破壊開始点付近のNarli村で2.0ｍ程度、北北東―南南西走向の震源断層南部域で概ね2.0～3.0m程度であることが報告された。また、断層変位により、道路の破壊、線路の座屈（調査時には補修済み）、送電鉄塔の座屈、建物の変形などの被害が生じていたことが報告され、インフラ建設における活断層位置の考慮の重要性が説明された。

三件目として、「ライフラインの被害」について、小野祐輔教授より報告された。本報告では、トルコ・シリア地震で発生したライフラインの被害に関する現地調査結果について報告された。具体的には、道路の盛土部に発生した水平方向の食い違い、圧縮作用を受けて座屈した線路、同じく圧縮作用を受けて座屈し地表に出現した埋設管、送電線が引張られることで損傷した送電鉄塔の事例が紹介され、これらはい

ずれも断層との交差部で生じたものであることが報告された。また、Adiyaman県のAdiyaman市とGölbaşi町、Kahramanmaraş県のKahramanmaraş市、Gaziantep県Islahiye町で住民に対して行ったライフラインの被害状況の聞き取り調査の結果についても報告された。

四件目として、「橋梁の被害」について、井上和真准教授(群馬工業高等専門学校)より報告された。まず、橋梁の主な地震被害状況として、主桁と落橋防止用の変位制限構造の衝突に伴う損傷、主桁と橋台パラペットとの衝突に伴う損傷や伸縮装置の損傷、橋台背面土の沈下に伴う段差の発生、桁掛かり長の不足に伴う落橋などの被害が報告された。その一方で、橋脚などの下部構造の地震損傷は限定的であり、主桁の橋台や変位制限構造への衝突の対策とその補修が今後の重要な課題であることが説明された。

五件目として、「地盤関連の被害」について、志賀正崇助教(長岡技術科学大学)より報告された。トルコ・シリア地震に関して地盤工学の観点から、地震による地盤変状、構造物被害の特徴やメカニズムについて分析した結果が報告された。調査対象地は、Gölbaşı町、Kahramanmaraş市、Değirmencik村、Tepehan地区、İskenderun市であり、液状化、側方流動、斜面崩壊、断層変位などの現象が観察されたことが報告された。さらに、衛星写真、UAV測量、微動観測、簡易コーン貫入試験などの手法を用いて把握された地震前後の地形や地盤特性について報告された。

六件目として、「建築の被害」について、毎田悠承准教授(東京大学)より報告された。毎田准教授からは、科学研究費補助事業(特別研究推進費)「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」調査団、日本建築学会、土木学会、地盤工学会の合同災害調査団が3月28日～4月4日(一部、4月2日)に実施した現地調査で得られた結果のうち、建築の被害について報告された。はじめに、8つの強震観測点周辺の計211棟の建物について、構造形式、層数、被害程度に関する情報を取得したことが報告され、今後、強震記録の特性と、周辺建物の被害の傾向との相関を詳細に分析する予定であることが報告された。次に、RC造の建物被害例が示され、配筋(過密配筋、補強筋の90度フック、短い余長、重ね継手、台直し)が原因とみられる壁柱脚部コンクリートの圧壊や曲げ破壊、主筋の抜け出しや、短柱化によるせん断破壊、柱梁接合部内に補強筋がないことが原因とみられる接合部破壊などが報告された。さらに、大規模工業団地は立地地盤特性が良く、被害が少ないものの、PCa造の被害が大きく、柱が曲げ降伏していたこと、病院施設は、地盤特性が良好で設計の重要度係数が1.5の場合は構造被害が比較的小さいことが報告された。最後に、伝統的な組積造においても、Grade4以上の被害は比較的少なかったことが報告され、この要因として地震による最大振動数が建物の推定固有振動数と大きく異なったと推測されることが報告された。近代的な組積造では、Infill masonry形式であったこと及び補強鉄筋なしで施工されていたために、面外破壊が多くみられたことが報告され、本調査で得られた多くの教訓と課題とともに、今後の活動予定について報告された。

最後に、土木学会地震工学委員会委員長の酒井久和教授(法政大学)より閉会のご挨拶を頂き、本報告会は終了となった。

3. おわりに

2023年5月29日に実施された「2023年 2月に発生したトルコ南部の地震(M7.7, M7.6)に関する被害調査報告会(速報)」について報告した。地震動から土木構造物、建築物に至るまで幅広い分野の報告がなされ非常に有益で貴重な報告会となった。報告内容の中には、日本の地震対策にも活かすことができる内容が多く含まれており、今回の報告内容の活用と応用が期待される。また、今後さらなる調査が計画されており、調査内容のさらなる深度化、発展が期待される。なお、本報告会での資料は、土木学会地震工学委員会のホームページ(https://committees.jsce.or.jp/eec2/node/215、2023年8月18日確認)でダウンロード可能である。

最後に、ご報告頂いた先生方ならびに本報告会に日本地震工学会が共催として参画するためにご尽力頂いた後藤浩之先生はじめご協力頂いた関係者の方々に心から謝意を表する。また、本原稿の作成に向けて、報告内容の概要を提供頂いた、後藤浩之先生、吉見雅行先生、小野祐輔先生、井上和真先生、志賀正崇先生、毎田悠承先生に末筆ながら深謝の意を申し上げる。

追悼文

太田 裕先生を偲んで

清野　純史
●京都大学名誉教授／前日本地震工学会会長

写真１　人間被害に関する研究会での趣旨説明 (2011)

日本地震工学会の名誉会員でもあり、北海道大学工学部教授、東京大学地震研究所教授、山口大学工学部教授、愛知淑徳大学現代社会学研究科教授等を歴任されました太田 裕先生が令和5年2月にご逝去されました。ここに謹んで太田先生のご冥福をお祈り申し上げます。

太田先生は、昭和38年名古屋大学大学院理学研究科博士課程を修了後、東京大学地震研究所助手、助教授を経て昭和48年北海道大学工学部教授、平成元年東京大学地震研究所教授に転出され、平成7年山口大学教授を経て、平成10年から22年まで愛知淑徳大学の教授を務められました。

先生のご研究は、地震学から地震工学、地震防災まで多岐にわたり、全ての分野においてパイオニア的な研究を行い、斯学の発展とその国際展開に大きく貢献されました。特に、地盤の揺れを常時微動による実験的方法と震源破壊過程理論による理論的方法から評価する方法を提案するとともに、「太田方式」と呼ばれるアンケートによる震度調査法を開発する等、入力としての地震動評価に関する研究を推進されました。また、川崎市で運用が開始されたリアルタイム被害予測情報システムなどの地震被害の迅速把握と処理システムの開発に関する研究は、その後のリアルタイム地震防災研究の礎となりました。さらに、国際的な活動としては強震観測も不十分な状況にあった発展途上国における地震防災研究センターの設立支援などを通じて、国際的研究者ネットワークの構築や若手研究者の育成を図られました。

私は平成5年に山口大学工学部に赴任し、平成7年から2年間太田先生から薫陶を賜りました。地震動の入力分布評価の一環として、震度階を短周期・中周期・長周期の3つに分け、それぞれの震度の算出式を提示する組合せ震度を提案したのも、太田先生との共同研究でした。また、先生がリーダーを務められていたJICAのトルコ地震防災研究プロジェクト(平成5年4月～平成11年3月)では、山口大学・三浦房紀先生による太田先生の赴任直後の歓迎会にて、私もぜひ派遣メンバーに入れてくださいと頼み込み、約半年間アンカラに滞在して、インフラの即時地震被害推定システム構築に参画させていただきました。お蔭様でとても刺激的で有意義な日々を過ごすことができました。

理学、工学、医学、社会科学など分野横断的な研究者を多く集め、研究会を通して地震防災や人間被害に至るまでご指導・ご議論してくださった太田先生が亡くられたことは残念でなりません。ただこの太田先生のご遺志を継いで、さらに継続･発展させていくことが、これからの関係者の務めだと思っております。太田先生、ありがとうございました。安らかにお眠りください。

写真２　人的被害研究会メンバーとの集合写真(2004)

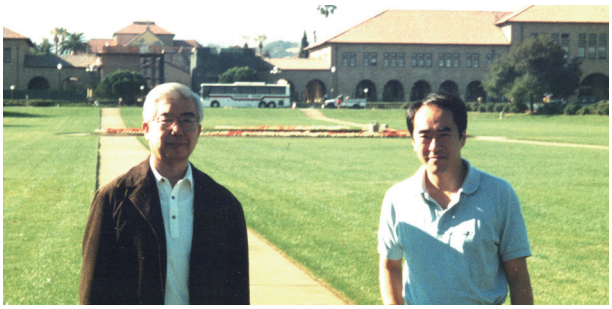
亀田弘行先生を偲ぶ―PSHAの実践を通して

高田　毅士
●日本地震工学会会長／日本原子力研究開発機構

地震工学・防災学の世界的権威であられる亀田弘行先生が2023年6月6日に83歳でご逝去された。先生は京都大学土木工学科を卒業後、京都大学にて教鞭を執られ1995年には地域安全学会長、1998年には理化学研究所地震防災フロンティア研究センター長、2004年に京都大学を定年退職後、京都大学名誉教授、その後、JNES(原子力安全基盤機構)の技術顧問、2019年には瑞宝中綬章を受賞された。専門分野は幅広く土木耐震工学、都市のライフラインの耐震評価、広く地震防災学の先駆者である。

まずは読者の皆様にお断りをしておく。亀田研の多くの門下生が各界で活躍されており、そのような方々を差し置いて本追悼の辞を引き受けることに最初は躊躇した。しかし、大学を退職される頃から原子力耐震分野にて長い間ご一緒させていただき、特に確率論的地震動評価(PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Assessment)の実践においては、蛯澤勝三氏(元JNES)と共に私自身は長い間ご指導いただいたので、本原稿を引き受けることにした。

亀田先生とは1997年の京都で開催された信頼性の国際会議(ICOSSAR)の実行委員会において初めてお会いしたと思う。先生は学術委員会の主査をされていたと記憶している。その頃、NUPEC(原子力発電技術機構)において、原子力安全分野における確率論的地震ハザード評価プロジェクトが進行中で理学や工学の専門家の様々な解釈の差異、所謂、認識論的不確定性を評価にどのように取り入れるかが重要な課題であった。その頃、米国では、SSHAC(Senior Seismic Hazard Analysis Committee)の報告書が世に出たばかりの頃であり、専門家の意見に重みを付けたロジックツリーを用いることが提唱されていた。日本でも認識論的不確定性の評価方法を開発しつつあったが、先行している米国の状況を調査するために、米国専門家へヒアリングをすることが必要と考え、亀田先生のお力をお借りして海外出張に参画してもらった。1996年、Stanford大学のCornell教授、Coppersmith氏、ロスで活躍されているSommerville氏等の専門家を対象にヒアリングを行った。阪神・淡路大震災後の多忙な時期であったが、海外調査を快く引き受けていただいた。先生は米国に２泊ぐらい滞在の超ハードスケジュールであった。サンフランシスコ空港に到着し、先生の運転でスタンフォード大のキャンパスまで連れて行ってもらったことを思い出す。


スタンフォード大学キャンパスにて(1996.10)

その後、2004年から文部科学省の全国を概観する地震動予測地図プロジェクトが動き出した。これは現在の地震調査推進本部の確率論的地震動ハザード地図として定着しているもので、先生は本プロジェクトの中心的先導者であり、私も委員の一人として地図の工学利用の立場から関わるようになった。

2004年には発足したばかりのJNES主催の地震ハザードワークショップ「地震ハザード評価における不確定性の認識と克服―ロジックツリーの活用」が開催され、防災科研の亀田先生のリーダーシップの下、米国専門家の招待講演、日本の専門家を交えたパネル討論が実施され、私はパネル討論の進行役を仰せつかった。今から思えば、我が国にとって「ロジックツリー」、「認識論的不確定性」という新しい用語が使われ始めた大きなイベントになったと思う。

先生は2006年に施行された原子力施設の耐震設計審査指針の改訂にも深く関われた。2007年7月に起きた新潟県中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の被害は原子力業界に大きな影響を及ぼした。日本原子力学会から日本地震工学会に協力要請があり、宮野廣先生(元法政大学)と日本原子力学会とが連携をして「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」が日本地震工学会内に設置されることになった。学会発足後初めての日本原子力学会との正式な連携活動の始まりである。筆者はこの時から亀田先生と一緒に現在に至るまで深く活動した。その後、東日本大震災が起こり、耐津波の調査委員会、地震安全原則の調

査委員会と長い間活動を共にし、先生から多くのことを学ばせてもらった。これらの活動は本誌No.44(2021年10月発刊)を参照していただきたい。

一方、2014年10月に電力中央研究所に原子力リスク研究センターが開設され、2016年3月から長期間の議論を経て、四国電力伊方３号機を対象にした日本初のSSHAC手法を適用した地震ハザード評価プロジェクトを実施することになり、亀田先生はプロジェクトのPTI(Project Technical Integrator)としてプロジェクトの技術面の最高取りまとめ役として2020年10月まで務められた。本プロジェクトの実施は日本としては画期的な出来事であり日本全国に大きな影響を与え、四国電力はその功績を評価され、2022年に日本原子力学会賞を受賞することになった。亀田先生は受賞の一報を聞き大変喜ばれたと聞いている。

先生がJNESの顧問をされているときだったと思うが、打合せ終了後花見をやりたいというので、神谷町から愛宕山に登って花見をし、その後カラオケボックスにて先生が三橋美智也の「古城」を歌われたことが懐かしく思い出される。

先生にお会いしてから30年近くいろいろな形でご一緒させていただき多くのことを教えていただいた。国際派であり、確率論、リスク論については全くぶれることなく強い信念と実行力をもっている多才な専門家であり、我々後輩に多くのことを残していただいたこと、本当に感謝する次第である。

伊方SSHACプロジェクトの受賞を受けて、皆で祝杯を傾ける日を楽しみにしていた矢先であったが、叶わなくなってしまった。ご冥福をお祈り申し上げます。

第10回応用確率統計学に関する国際会議にて、CERA賞を受賞(2007.8)
(左：Prof. Armen Der Kiureghian, 右：神田順教授)

お知らせ

■ 本学会に関する詳細はWeb上で

日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員（正会員、学生会員、法人会員）を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。
日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧下さい。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご活用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員・各賞受賞者」の下の「入会案内」、「変更・退会手続」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ https://www.jaee.gr.jp/jp/

■ 会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容（原則として年3回の発行であるため）」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認頂けます。

日本地震工学会ホームページ　投稿・応募ページ　https://www.jaee.gr.jp/jp/contribution/

■ 登録メールアドレスご確認のお願い

当学会では、会員の皆様のお役に立つ会員限定のニュースやセミナー情報をメールにて配信させていただいておりますが、メールが届かず戻ってきてしまうケースが散見されます。メールアドレスを変更された方、あるいは、このところ弊学会から１通もメールが届いていないという会員の方は、以下の方法で会員登録情報をご変更いただくか、事務局までご連絡いただきますようお願い申し上げます。

【会員登録情報のご変更方法】

日本地震工学会のWEBサイト（https://www.jaee.gr.jp/jp/）の「会員ログイン」より、会員番号とパスワード（７桁　例：0000001）を入力してログインし、「登録情報の変更」を選択して登録情報をご変更ください。尚、会員番号またはパスワードがご不明な方は事務局までお問い合わせください。

■JAEE Newsletter 第12巻 第3号（通算第37号）が2023年12月下旬に発刊されます。

JAEE Newsletterは、日本地震工学会誌を補完し、タイムリーに情報発信する目的で2012年9月に創刊されました。

2015年より、会誌と連携した情報発信を行うため、会誌と交互となる4月、8月、12月に学会のWebサイト上で発行しています。地震工学に興味を持つ一般の読者も意識したわかりやすい記事を通じて、地震工学と地震防災の一層の普及・発展を目指しています。JAEE Newsletterについては以下のサイトで掲載しております。

https://www.jaee.gr.jp/jp/stack/1925-2/

最新号(第12巻 第2号)では、功績賞・功労賞・論文賞・論文奨励賞の受賞者の皆様から業績や研究内容等をご寄稿いただきました。オンライン媒体による情報発信で、どなたでも閲覧できますので、ぜひご覧ください。

■ 問い合わせ先

不明な点は、氏名・連絡先を明記の上、下記までお問い合わせ下さい。

日本地震工学会　事務局　〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館
TEL : 03-5730-2831　　FAX : 03-5730-2830　　電子メールアドレス: office@general.jaee.gr.jp

編集後記：

関東大震災から100年の節目ではありますが、第49号で特集したこともあり、本号では2023年2月6日に発生したトルコ・シリア地震に焦点を当てた特集としました。国外で発生した地震ではありますが、各学会、各機関でトルコ・シリア地震の調査報告がなされており、関心の高い地震だと思います。その中で、2つの地震の震源過程や強震波形、現地調査による建築物、ライフラインの被災状況、さらには今回の地震に触れながら、これまでのトルコにおける震災復興等と幅広い視点での記事をご執筆いただきました。本号を通して、トルコ・シリア地震に対する理解を深め、今後日本で発生が予想される巨大地震に対して、地震工学のあるべき姿を改めて考えるきっかけになれば幸いです。

最後になりますが、ご多忙のところ、記事をご執筆いただきました執筆者の皆様、各種工程の調整にご尽力いただきました編集委員の皆様に御礼申し上げます。

田附 遼太（長谷工コーポレーション）

2005年に現在の会誌の創刊号が発刊されてから本号で第50号の節目を迎えました。本号の特集内容を検討している時にトルコ・シリア地震が発生し、震源域を中心に大きな被害が発生しました。被害に遭われた方に心よりお見舞い申し上げます。

今回の地震と同規模の大地震が日本でも将来発生する可能性があり、地震の発生メカニズムや強震動の生成要因、被害状況・被害要因等について理解することは、日本における大地震に対する被害予測や防災体制等を検討する上で重要であると考えられます。このような理由から、会誌編集委員会での議論を経て、「2023年トルコ・シリア地震」と題して特集を組ませていただきました。

執筆者の皆様には、原稿の執筆を快く引き受けて下さり、感謝申し上げます。また、執筆者との調整や連絡、原稿の編集、校正にご協力いただきました会誌編集委員の皆様、関係者の皆様に感謝申し上げます。

中村 武史（電力中央研究所）

会誌編集委員会

委員長　皆川　佳祐　埼玉工業大学
幹　事　田附　遼太　長谷工コーポレーション
幹　事　中村　武史　電力中央研究所
委　員　浅井　竜也　東京大学生産技術研究所
委　員　入江さやか　松本大学
委　員　大野　卓志　高圧ガス保安協会
委　員　北原　　優　東京大学大学院
委　員　久保　久彦　防災科学技術研究所
委　員　小阪　宏之　戸田建設
委　員　土井　達也　鉄道総合技術研究所
委　員　鍋島　国彦　神戸大学大学院
委　員　仁田脇雅史　清水建設
委　員　藤井　　中　竹中工務店
委　員　横山　　遼　青島設計

日本地震工学会誌　第50号　Bulletin of JAEE　No.50

2023年10月30日発行（年３回発行）
編集・発行　公益社団法人 日本地震工学会
〒108－0014　東京都港区芝５－２６－２０　建築会館
TEL　03－5730－2831　FAX　03－5730－2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2023
本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。
Printed in Japan