

市街地の地震被害、横から観るか、上から観るか

住宅・都市研究グループ 主任研究員 阪田 知彦

目次

- I はじめに
- II 「横から観る」技術
 - 1) アウトラインー被災後の現地調査
 - 2) 応急危険度判定の概要
 - 3) 応急危険度判定支援ツールの開発
 - 4) マルチプラットフォーム対応の応急危険度判定支援ツールの開発
 - 5) 今後の展開
- III 「上から観る」技術
 - 1) アウトラインーリモートセンシングの活用
 - 2) 人工衛星による被害解析技術の開発1：合成開口レーダーによる被害集中地区解析システム
 - 3) 人工衛星による被害解析技術の開発2：高分解能衛星画像からのAIによる被害解析システム
 - 4) 航空写真による被害解析技術の開発
- IV 横から観るか、上から観るか
 - 1) 発災後のタイムラインと解析結果の信頼性を考慮した被害マップの生成
 - 2) 戦略的な現地調査実施のための被害区域のトリアージ
- V おわりに
- 注釈・参考文献

I はじめに

大規模地震後の市街地に関する被害状況を迅速に把握することは、その後の復旧・復興、生活再建に対して重要な視点である。市街地の被害状況の把握といっても多岐に渡るため、本稿では「市街地の建物被害をマッピングする」ということをゴールとしたい。かつては、こうした被害をマッピングする都市計画的な目的は、復興計画の策定と言われていたが、近年では都市計画的な目的を超えて、災害初動期の意思決定支援における重要な情報コンテンツとしての位置づけも担うようになってきた。つまり、より迅速性が求められるようになってきたと行っても過言ではない。

市街地の被害をマッピングすることがいつごろから行われているか。歴史上どこまで遡れるかは様々な学説があるため、その代わ

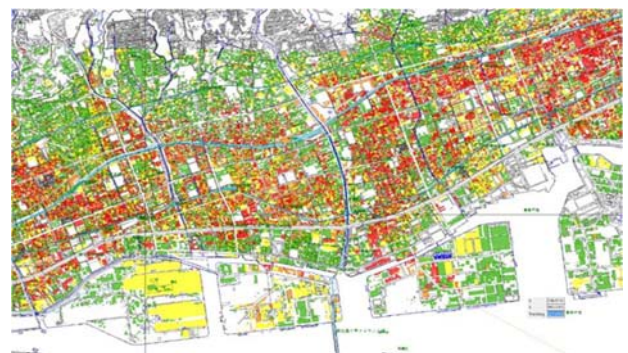


図1 1995年兵庫県南部地震時の建物倒壊状況

りに直近100年間で捉えたとすれば、関東大震災時に旧参謀本部陸地測量部が関東大震災の被害状況を記載した「震災地応急測図原図」が有名である。その後いくつかの地震災害で同様の迅速図が

作られている。また、わが国で建物被害についてGIS（地理情報システム）を用いてマッピングした最初の事例は、1995年兵庫県南部地震後に、旧建設省建築研究所が、日本建築学会・都市計画学会等による被害調査をマッピングした例（図1）ではないかと考えられる。ちなみに、世界では1994年ノースリッジ地震時にアメリカ地質調査所（USGS）がGISを用いてマッピングした例が世界初のものであると言われている。それらから25年以上が過ぎ、市街地の被害をマッピングする技術は様々な機関が様々なアプローチで研究開発に取り組んでいる。

本稿では、こうした視点に立ち実施している市街地における地震被害の把握技術の研究開発から、「横から観る」技術として応急危険度判定調査の支援ツールの開発について、「上から観る」技術として観測衛星データや航空写真の画像解析やモデリング技術を応用した被害解析システムの開発について紹介し、最後にこれらの個々の技術のハイブリッドな運用がもたらす効果について概観する等、今後の展開を述べることにしたい。

II 「横から観る」技術

1) アウトラインー被災後の現地調査

まずは、「横から観る技術」を大きく分けると、現地調査のように人の目で1棟1棟を確認するアプローチと、地上や車載のカメラやレーザー計測機等を用いた測量によるアプローチがあげられる。ここでは、前者の現地調査による被害把握を取り上げる^(註1)。現地調査と一口でいっても、地震災害後に行われる主な調査は、発災後の時間的経過の順に、①応急危険度判定、②宅地危険度判定、③住家の被害認定調査、④学会・研究者等による学術調査、⑤損害保険会社等による調査、⑥被災区分判定の6種類がある。その主なものを見てみる（表1）と、それぞれの調査や判定の目的や調査者が異なっているが、いずれにしても人海戦術による方法であることから、それらの効率化については重要な視点である。

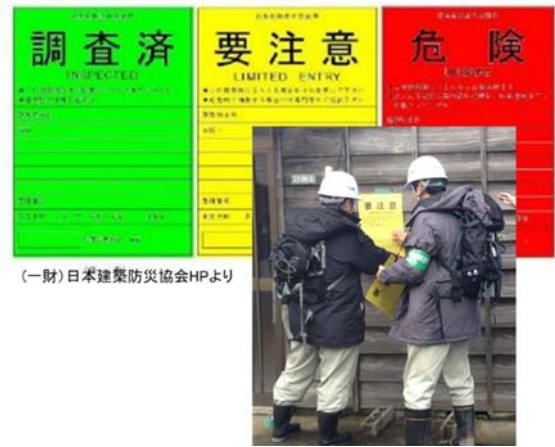
2) 応急危険度判定の概要

応急危険度判定は、正式には「被災建築物応急危険度判定調査」と呼ばれる。災害後の被災地の映像で、赤・黄・緑の紙が貼られているのをご覧になった方も多いと思われる。地震で被害を受けた建築物について、その後の余震等による倒壊や落下物等の危険度を判定し、住民等に危険情報を提供することで、「人命に関わる二次災害を防止する」ための調査である（図2）。赤・黄・緑の紙はその判定結果を示したステッカーで、赤は「危険」、黄色は「要注意」、緑は「調査済」を示している。なお、応急危険度判定調査の

仕組みは、1985年に建設省総合技術開発プロジェクト「震災構造

表1 地震災害後に実施される代表的な現地調査の比較

名称	被災建築物応急危険度判定	住家の被害認定調査	被災区分判定
目的	余震等による被災建築物の倒壊、部材の落下等から生ずる二次災害の防止	住家に係る「り災証明書」の発行、資産的な被害程度を調査	被災建築物の適切かつ速やかな復旧
実施期間	地震直後～2週間程度	地震後2週間後～数ヶ月	地震後3ヶ月～半年
実施主体	市町が実施（県・全国被災建築物応急危険度判定協議会が支援）	市町	建築物所有者
判定調査員	応急危険度判定士（行政又は民間建築士等）	主に行政職員（「り災証明書」発行は行政職員のみ）	民間建築士等
運用基準等	被災建築物応急危険度判定業務マニュアル	災害の被害認定基準	被災区分判定基準
判定内容	当面の使用の可否	住家の損害割合（経済的被害の割合）	継続使用のための復旧の要否
判定区分	赤「危険」、黄「要注意」、緑「調査済」	「全壊」、「大規模半壊」、「半壊」、「半壊に至らない」	「要復旧」、「復旧不可能」等
判定結果の表示	建築物に判定結果を示したステッカーを貼付	判定結果を記載した「り災証明書」を被災者に発行	判定結果を依頼主に通知



（一財）日本建築防災協会HPより

図2 判定ステッカーと応急危険度判定作業のイメージ

表2 応急危険度判定の実施事例

日付	地震名	判定期間	判定のべ人数	判定棟数
H7.1.17	兵庫県南部地震	H7.1/18～2/9	6,468人	46,610棟
H7.4.1	新潟県北部の地震	H7.4.2	12人	342棟
H8.8.11	宮城県北部地震	H8.8.14	34人	169棟
H9.3.26, H9.5.13	鹿児島県薩摩地方を震源とする地震	H9.4/11.5/17, 6/4～6/5	220人	2,048棟
H9.3.26, H9.5.13	秋田沖を震源とする地震	H11.3/1	4人	9棟
H12.6/26, 7.1/7.9/7.13他多数	三宅島火山活動及び新島・神津島・三宅島近海を震源とする地震	H12.7.3～10, H12.7.17～19, H12.8.2～5	17人	240棟
H12.10.6	鳥取県西部地震	H12.10.7～20	332人	4,080棟
H13.3.24	芸予地震	H13.3.25～4.12	636人	1,763棟
H15.5.26	宮城県沖を震源とする地震	2003.5/30, H15.6.2	5人	6棟
H15.7.26	宮城県北部を震源とする地震	H15.7.27～8.3	743人	7,245棟
H16.10.23	新潟県中越地震	H16.10.24～11.10	3,821人	36,143棟
H17.3.20	福岡県西方沖地震	H17.3.20～3.31, H17.4.20～4.26	444人	3,148棟
H19.3.25	石川県能登半島地震	H19.3.25～3.30	391人	7,600棟
H19.4.15	三重県中部を震源とする地震	2007.4/15	2人	1棟
H19.7.16	新潟県中越沖地震	H19.7.16～7.23	2,758人	34,048棟
H20.6.14	岩手・宮城内陸地震	H20.6.16～6.20, H20.6.14～6.23	624人	4,139棟
H23.3.11	平成23年東北地方太平洋沖地震	H23.3.13～5.31	8,541人	95,381棟
H23.3.12	長野県北部を震源とする地震	H23.3.12～3.19	229人	2,318棟
H23.3.15	静岡県東部を震源とする地震	H23.3.16～3.19	64人	513棟
H25.4.13	淡路島付近を震源とする地震	H25.4.15～4.17	56人	402棟
H26.11.22	長野県北部を震源とする地震	H26.11.23～11.27	131人	602棟
H28.4.14	平成28年熊本地震	H28.4.15～6.4	6,819人	57,570棟
H28.10.21	鳥取県中部を震源とする地震	H28.10.22～10.29	450人	7,311棟
H30.4.9	島根県西部を震源とする地震	H30.4.11～4.25	198人	6,627棟
H30.6.18	大阪府北部を震源とする地震	H30.6.19～6.28	1,091人	9,457棟
H30.9.6	北海道胆振東部地震	H30.9.7～9.14	108人	813棟
R1.6.18	日本海山形県沖地震	R1.6.19～6.22	97人	841棟

物の復旧技術の開発」で応急危険度判定の原案が策定されたことが起源となっている。その後、全国に普及し、今日に至っている。その調査が本格的に行われたのは、1995年兵庫県南部地震が最初で、その後27の災害において調査が実施されてきた(表2)。この調査は、建築士の有資格者等で一定の講習等を受けた応急危険度判定士が現地へ赴いて実施される(図2写真)。応急危険度判定は、被災自治体内の判定士だけで行われることもあるが、多くは他都道府県からの広域応援により実施されることが多くなってきている。そうした様々な状況に対応できるように、講習会や実務訓練がほぼ毎年実施されている場合が多い。個々の建物の判定作業は、①個々の建物の外観からの確認、②調査表への記入、③判定ステッカーの掲示、④実施本部に戻ってからの確認等に分かれる。このうち従来は②と④に大きな労力と時間が必要であった。応急危険度判定調査としては、総合判定の結果を集計するまでがほとんどであるが、さらに、詳細な集計を行ったり、マッピングしたりといったことを考えた場合、現状では、紙媒体の調査票からの入力作業や、位置情報を得るためのプロット作業に、多大な労力が必要である。

3) 応急危険度判定支援ツールの開発

こうした課題に対して、建築研究所では、1995年兵庫県南部地震を契機に地震時の応急危険度判定調査の支援システムについての研究を継続的に実施し、2001年のPalmOSで稼働する支援ツール(図3)の開発・公開(建築研究所住宅・都市研究グループ; 2001)を皮切りに、2013年からはApple社製のiPad等のiOS端末で稼働する応急危険度判定支援ツール(訓練版)(図3)をApp Storeで公開(建築研究所住宅・都市研究グループ; 2013)してきた。iOS版はこれまでに、約4200ダウンロードされており、上記の実務訓練等での活用実績も多い。しかし、このツールはiOSが搭載された端末でしか動かないことや集計機能は公開していなかった等の課題があった。

4) マルチプラットフォーム対応の応急危険度判定支援ツールの開発

前述のような課題に対して、2018年より支援ツールのマルチプラットフォーム化について検討を開始した。検討にあたって、最も重要な観点は、それらを利用する際のハードウェア(端末)のOSをどうするかという問題である。実際にモバイル端末のOSのシェアは月によって若干の違いはあるものの、直近の調査では概ねAndroidとiOSで3対1~4対1となっているという報告がある(図5)。また、端末の実売価格から見ても、Androidが搭載され



図3 PalmOSをベースとした現地調査支援ツール(City Surveyor®)

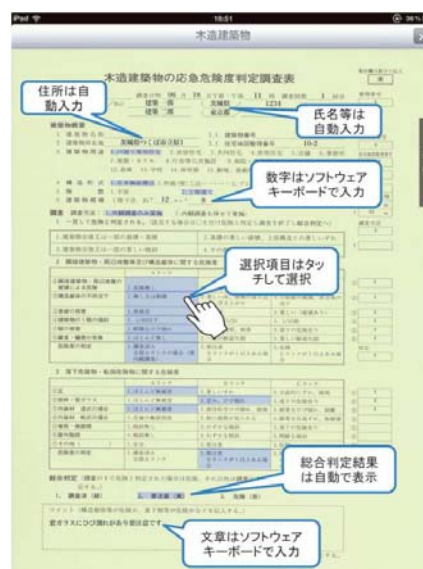


図4 iOSをベースとした応急危険度判定支援ツール

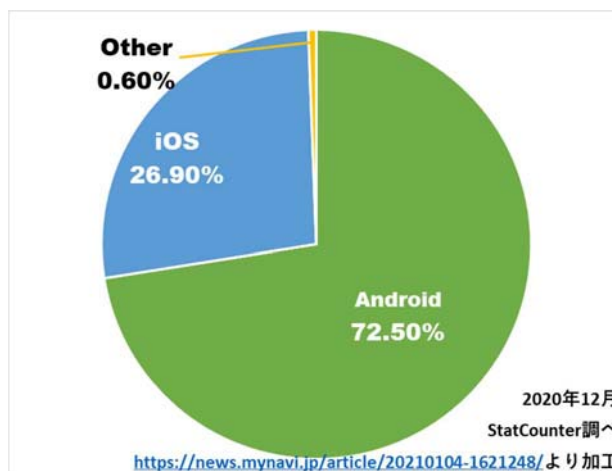


図5 モバイル端末のOSシェア

た端末は、比較的安価に入手・導入することが可能である。すなわち、このことから支援ツールの Android 等へのマルチプラットフォーム化は、不可避であると考えられる。

もう 1 つの難題は、どういった開発方法を採用し、その開発・メンテナンスコストをどう考えるかという課題である。こうした課題の解決には、2 つのアプローチが考えられる。1 つには、iOS 版と同様に、Android や Windows 用のアプリを一から開発することだが、これにはかなりの費用とその後のメンテナンスコストが必要となる。さらには、アプリの更新等に際して、即時性を求めるとなると、それなりの仕組みを導入する等の工夫が求められる。

それに対して、SaaS (Software as a Service) に代表されるクラウド上等に構築された基盤アプリを利用して、そのアプリ上に必要な機能を追加していくアプローチがある。これならば、開発やメンテナンスの対象が絞られることから費用や手間を減らすことが可能である。今回は、この後者のアプローチで開発を行うことにした。具体的には、ArcGIS Online 上で提供されている現地調査用の基盤アプリの「ArcGIS Survey123」を用いて、ESRI ジャパン株式会社の協力により、入力画面 (テンプレート) を作成するという方法で、応急危険度判定支援ツールを実現することができた。また、調査結果を集計する画面は ArcGIS Online 上で作成した。今回開発した入力画面を図 6 に、集計画面の例を図 7 に示す。

今回の開発により、iOS だけでなく、Android や Windows が稼働するスマートフォンやタブレット端末でも応急危険度判定調査の訓練を実施することが出来るようになった。これにより、調査時に課題となる資機材の調達や準備の効率化、調査の入力から集計までの迅速化・効率化等に寄与できる。

また、今回のテンプレートは個々の災害での応急危険度判定調査に即して容易にカスタマイズすることができ、それらを各調査員にほぼ遅延無く反映させることが可能な点もクラウドをベースとした SaaS 型によるメリットだと考えられる。

この支援ツールを用いた実証実験 (図 8) を、2020 年度から開始した。現状では、2 団体の実務訓練での活用実績がある。いずれも実際の建物を被災建物と見なして、支援ツールを用いた入力を実際に体験していただいた。概ね紙媒体の調査票への入力よりも便利だという評価や、集計とマッピングが瞬時に行われる点を評価していただいている。コロナ禍の影響で思うように実証実験が出来ない状況下ではあるが、今後も自治体での実証実験において、知見の蓄積を図っていきたいと考えている。



図 6 マルチプラットフォーム対応版応急危険度判定支援ツールの入力画面



図 7 集計画面例

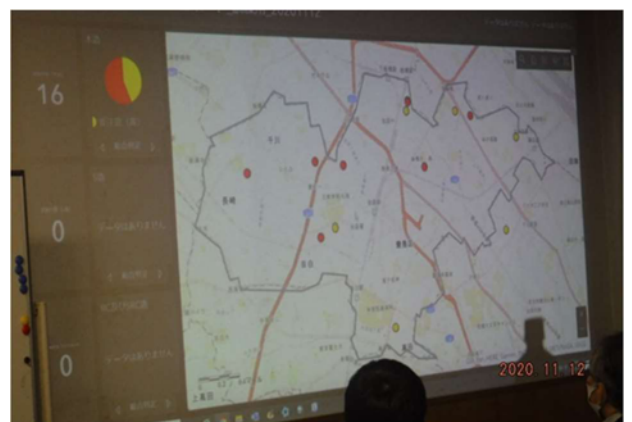


図 8 実証実験風景



図 9 応急危険度判定支援ツールの導入による調査オペレーションイメージ

5) 今後の展開

現状公開している支援ツールは、あくまでも訓練版（おおよそ年に1回程度行われる実務訓練での利用を想定）の位置づけであることから、実際の地震時の応急危険度判定調査で利用出来るように、機能標準やデータ交換標準の検討を経て、社会実装を行っていく必要があると考えている。

また、支援ツールの実運用だけでなく、それをコントロールする実施本部でのオペレーションも大きく変容する可能性を秘めている。例えば、現状では判定士は判定拠点から調査地へ出発して、調査を実施し、判定拠点へ戻ってくるというのが標準的な動きであるが、こうした支援ツールを用いると、その端末に対して本部から調査対象地等の情報を判定士の持つ端末に送信し、判定士はそれに基づいて現地へ直接赴き、調査結果をクラウドに送信することができれば、判定士は判定拠点や調査本部に行かなくても良くなるといったことも考えられる。既にこうした機能についてもシステム化の準備を進めており（図9）、これが社会実装できれば、判定士の作業負荷の低減にも貢献でき、また判定拠点や本部の密集を避けられる等の波及効果が期待できる。

III 「上から観る」技術

1) アウトライナーリモートセンシングの活用

本章では、「上から観る」といった観点からの研究開発事例を紹介したい。それらは、全てリモートセンシングによるアプローチである。リモートセンシングは、原義的には「離れた位置からセンシングすること」（Wikipedia）であるが、人工衛星や航空機、最近ではドローン等の「上から」の観測によるものを指すことが多い。このうち人工衛星には様々な種類があるが、ここでの人工衛星は地球観測衛星のことを指す。地球観測衛星にも、その搭載しているセンサーにより、可視光衛星とレーダー衛星に大別できる。

本章では、このうち地球観測衛星と航空機からの被害把握技術の研究開発事例を紹介することとしたい。

以下では、衛星合成開口レーダー（衛星 SAR）による被害集中地区の把握技術について、続いて高分解能衛星画像を用いた AI による被害解析技術について、最後に航空写真からの 3 次元モデリングによる被害解析技術について、それぞれの技術概要と実装事例を紹介することとしたい。

なお本章は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」のうち「衛星データ等即時共有システムと被災状況解析・予測技術の開発（主機関：国立研究開発法人防災科学技術研究所）」の国立研究開発法人建築

研究所担当課題「建築物被害状況解析システム開発」委託費で実施した検討成果が含まれている。また、解析に使用した ALOS および ALOS-2 のアーカイブデータについては、上記プロジェクトの枠組みで国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構より貸与を受けたものである。

2) 人工衛星による被害解析技術の開発 1：合成開口レーダーによる被害集中地区解析システム

① 研究概要

建築研究所では、衛星合成開口レーダー（衛星 SAR）を用いた建築物被害の把握技術の開発を行っている。衛星 SAR は、基本的にレーダーを地上に対して照射して、その跳ね返りの強さを観測するセンサーを搭載している衛星である。いわゆるアクティブセンサーであることから、昼夜間・天候に左右されにくいといわれている。こうした特性を活かし、災害における活用を目指した研究開発がされている。しかし、その分野は砂防や河川等の分野が多く、建築物についての解析事例はまだ少ない。衛星 SAR を用いた建築物の解析事例として代表的なものとしては、松岡・山崎(2017)、Karinzadeh and Matsuoka(2017)、Watanabe et al. (2016)等があるが、ここで利用されている衛星 SAR データは1~2種類であることから、より多くの衛星 SAR（センサー）の違いによる比較や課題等については十分に検討・整理されていないと言える。さらに、複数の地震災害を対象として、複数の衛星 SAR データによる比較が有用であると考えられるが、こうした視点からの報告は管見では見られない。

② 解析事例の蓄積

研究の手始めに過去の複数の災害時の観測データ等を用いて、市街地における建築物被害区域の解析を行い、事例の蓄積を行った^(注2)。今回の検討で使用した衛星は、ALOS、ALOS-2、Sentinel-1、COSMO-SkyMed の4種類である（図10）。ALOS と ALOS-2 は L バンド、Sentinel-1 は C バンド、COSMO-SkyMed は X バンドのセンサーを持つ。解析に使用した衛星 SAR データは、ALOS、ALOS-2 に関しては JAXA との協定により入手したデータを、Sentinel-1 については、ESA が提供しているデータ Hub からダウンロードしたデータを、COSMO-SkyMed についてはアーカイブデータを購入し利用することにした。

また、対象とした地震災害事例は、国内5事例、海外2事例である。本来は全ての組み合わせを行いたいところではあったが、災害時の観測状況、アーカイブの整備状況等を考慮して表3のよう

な組み合わせで解析を行った。

今回の解析方法を図11に示す。まず、今回の解析では、3時点のSAR画像が必要である。1つは発災後に観測されたもの、もう1つは発災時点に近い発災直前の観測データ、そしてそれよりも前の発災前の観測データの3つである。つまり、発災前の2時点で定常時での値を捉え、発災直前と発災後の2時点で地震による影響を捉えるということになる。次にそれぞれのペアで干渉解析を行い、さらに干渉している度合を表す干渉性(コヒーレンス)画像を生成する。コヒーレンスは0から1の値を取り、ペアの画像間での強度と位相の相関が高ければ、すなわちペアでの変化があまり無い場合は、1に近づく傾向がある。この傾向を利用して、2つのペアのコヒーレンスの比を取って1から引いた値が大きいものは、建築物をはじめとする地表物に変化があった≒被害が生じた箇所であると判断する指標として利用できると考えられる。さらに、この段階の画像だと、建築物以外の箇所も含まれていることで、建物ポリゴンにかかる画素を抽出し、これらが建築物において変化があった≒被害が生じた可能性の高い建築物であると判断することにした。

主な解析結果について概要を述べる。使用した衛星SARデータについては、表4にまとめて示す。解析にはENVI5.5/SARscape5.4.1、ArcGIS10.4を用いた。

まず、2007年中越沖地震時の状況をALOSのデータを用いて解析した結果を図12に示す。柏崎市街を中心に赤い領域が広がっており、実際の建築物被害範囲とも符合する結果である。また、柏崎市街外縁部や見附市内でやや被害度が高めになっている箇所があるが、これは建築物自体の被害というよりは、液状化による影響が表れているものと推察される。

衛星による違いの例として、2018年熊本地震時の熊本市・益城町周辺の被害度を示したのが図13である。ここでは、ALOS-2(北行軌道)とSentinel-1(北行軌道)を用いた。ALOS-2とSentinel-1とも益城町の被害の大きかった地域で解析結果も被害が大きいという結果が出ている。ALOS-2よりSentinel-1の方が被害結果に差が大きく出ている箇所が多いことがわかる。これは、Cバンドの方が短波長であることから建築物被害に対する感度が高いため、Lバンドではとらえられなかった軽微な被害を捉えている可能性がある。また、市街地の棟数密度との関係、家屋周辺の樹木の影響等の可能性が考えられる。

今回実施した解析の全ケースの計算時間を示したのが表5である。本来ならば全てのケースで計算機環境を統一して実施すべき

ALOS(だいち)2号 国籍:日本	
搭載センサー	Lバンド、3m/50km、30m/350km、HH、VV、HV、VH
軌道	太陽同期準円軌道
高度	628km
周期	97分
軌道傾斜角	97.9度
回帰	14日

Sentinel-1A / 1B / 1C / 1D 国籍:EU	
搭載センサー	Cバンド、5m/80km、5m/20m/100km、HH-HV、VV-VH
軌道	太陽同期ダウングラス軌道
高度	693 km
周期	98.74分
軌道傾斜角	98.19度
回帰	12日

COSMO-SkyMed 国籍:イタリア	
搭載センサー	Xバンド、3m/40km、30m/100km、HH、VV、HV、VH
軌道	太陽同期ダウングラス軌道
高度	619.5 km
周期	97.1分
軌道傾斜角	97.06度
回帰	16日(4種コンステラで数時間以内に同一地点の観測が可能)

図10 解析に利用した運用中の衛星

表3 解析対象とした地震災害と衛星SARデータの関係

	発生	地震名	衛星名		ALOS		ALOS-2		Sentinel-1		COSMO SkyMed	
			ASC	DES	ASC	DES	ASC	DES	ASC	DES		
	JO1	2007/7/16	中越沖地震	○	-	-	-	-	-	-	-	-
	JO2	2011/3/11	東北地方太平洋沖地震	○	-	-	-	-	-	-	-	-
	JO3	2016/4/16	熊本地震	-	-	○× 2 入射角	-	-	○	○	-	-
	JO4	2018/6/18	大阪北部地震	-	-	○	-	○	○	○	-	-
	JO5	2018/9/6	北海道胆振東部地震	-	-	○	-	-	○	○	-	-
	WO1	2015/4/25	ネパール地震	-	-	○	-	-	○	○	-	-
	WO2	2016/8/24	イタリア中部地震	-	-	○	-	-	○	-	-	○

ASC:北行軌道、DES:南行軌道

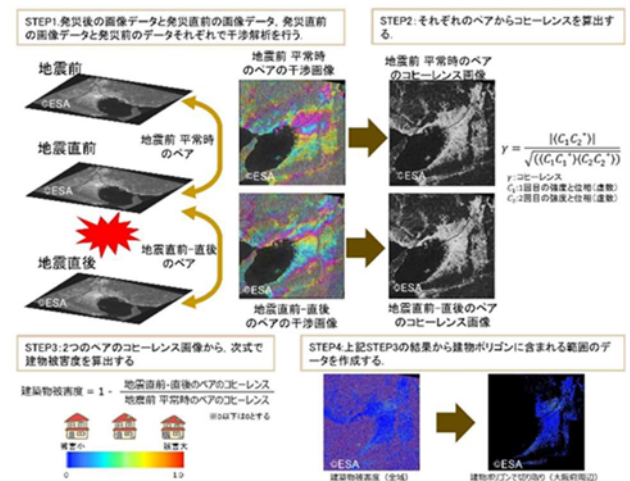


図11 3時期コヒーレンス法を応用した建物被害集中の抽出

ところであるが、作業工程の関係で3種類の計算機環境で実施した結果である。

解析はほぼシーンごとに実施しているので、基本的には衛星SARの観測範囲が大きく影響しており、特にSentinel-1の観測範囲は広いので、単純な処理時間だけでは半日以上かかる場合がある。今回は、3時点の2つのペアのコヒーレンスをシーンごとに計算すること等を全て行ったことから、時間を要していると考えられる。

実用上の工夫としては、シーンを分割して計算する機能の実装

表4 解析に用いた衛星 SAR データ

地震名	衛星SAR	画像種別	観測日	観測軌道	備考
J01 新潟中越沖地震 2007/7/16	ALOS	地震前	2006/9/11	北行軌道	2シーン
	ALOS	地震直前	2007/6/14	北行軌道	2シーン
	ALOS	地震直後	2007/7/30	北行軌道	2シーン
J02 東北地方 太平洋沖地震 (茨城) 2011/3/11	ALOS	地震前	2011/1/4	北行軌道	西バス2シーン
	ALOS	地震直前	2011/2/19	北行軌道	西バス2シーン
	ALOS	地震直後	2011/4/6	北行軌道	西バス2シーン
	ALOS	地震直前	2010/12/18	北行軌道	東バス2シーン
J03 熊本地震 2016/4/14	ALOS	地震直前	2011/2/2	北行軌道	東バス2シーン
	ALOS-2	地震前	2015/11/5	北行軌道①	オフナディア角29.1° 2シーン
	ALOS-2	地震直前	2016/2/11	北行軌道①	オフナディア角29.1° 2シーン
	ALOS-2	地震直後	2016/6/2	北行軌道①	オフナディア角29.1° 2シーン
	ALOS-2	地震前	2015/12/22	北行軌道②	オフナディア角38.2°
	ALOS-2	地震直前	2016/3/29	北行軌道②	オフナディア角38.2°
	ALOS-2	地震直後	2016/4/26	北行軌道②	オフナディア角38.2°
	Sentinel-1	地震前	2016/2/20	北行軌道	2シーン
	Sentinel-1	地震直前	2018/4/8	北行軌道	2シーン
	Sentinel-1	地震直後	2016/4/20	北行軌道	2シーン
J04 大阪北部地震 2018/6/18	Sentinel-1	地震前	2016/3/3	南行軌道	2シーン
	Sentinel-1	地震直前	2016/3/27	南行軌道	2シーン
	Sentinel-1	地震直後	2016/4/20	南行軌道	2シーン
	ALOS-2	地震前	2018/6/18	北行軌道	
	ALOS-2	地震直前	2018/4/9	北行軌道	
	ALOS-2	地震直後	2017/6/19	北行軌道	
	Sentinel-1	地震前	2018/5/24	北行軌道	
	Sentinel-1	地震直前	2018/6/5	北行軌道	
	Sentinel-1	地震直後	2018/6/23	北行軌道	
	Sentinel-1	地震前	2018/5/30	南行軌道	2シーン
J05 北海道 胆振東部地震 2018/9/6	Sentinel-1	地震前	2018/6/11	南行軌道	2シーン
	Sentinel-1	地震直後	2018/6/23	南行軌道	2シーン
	ALOS-2	地震直前	2018/8/9	北行軌道	
	ALOS-2	地震直前	2018/8/23	北行軌道	
	ALOS-2	地震直後	2018/9/6	北行軌道	
	Sentinel-1	地震前	2018/8/12	南行軌道	
	Sentinel-1	地震直前	2018/8/24	南行軌道	
	Sentinel-1	地震直後	2018/9/5	南行軌道	
	ALOS-2	地震前	2014/10/4	北行軌道	
	ALOS-2	地震直前	2015/2/21	北行軌道	
W01 ネパール地震 2015/4/25	ALOS-2	地震直後	2015/5/2	北行軌道	
	Sentinel-1	地震前	2015/3/24	南行軌道	
	Sentinel-1	地震直前	2015/4/17	南行軌道	
	Sentinel-1	地震直後	2015/4/29	南行軌道	
	ALOS-2	地震前	2015/7/1	北行軌道	
	ALOS-2	地震直前	2015/9/9	北行軌道	
	ALOS-2	地震直後	2016/8/24	北行軌道	
	Sentinel-1	地震前	2016/8/15	北行軌道	
	Sentinel-1	地震直前	2016/8/21	北行軌道	
	Sentinel-1	地震直後	2016/8/27	北行軌道	
W02 イタリア中部地震 2016/8/24	COSMO-SkyMed	地震前	2016/7/3	南行軌道	
	COSMO-SkyMed	地震直前	2016/8/20	南行軌道	
	COSMO-SkyMed	地震直後	2016/8/28	南行軌道	
	COSMO-SkyMed	地震直後	2016/8/28	南行軌道	

表5 解析時間の比較

地震	衛星	軌道 ASC: 逆行軌道 DES: 南行軌道	データインポート		干渉処理		被害度計算		合計 hh:mm	PC
			シーン 数	時間 hh:mm	マルチ ルック	ペア数	時間 hh:mm	時間 hh:mm		
J01 中越沖地震	ALOS	ASC	6	0:05	1×3	2	0:36	0:01	0:42	1
J02 東北地方太平洋沖地震	ALOS	ASC	12	0:06	1×3	4	1:08	0:03	1:17	1
J03 熊本地震	ALOS-2	ASC	6	0:36	1×1	2	3:31	0:08	4:15	1
	ALOS-2	ASC	3	0:06	1×1	2	3:30	0:05	3:41	1
	Sentinel-1	ASC	6	0:46	1×1	2	14:37	0:27	15:50	1
	Sentinel-1	DES	6	0:38	1×1	2	9:14	0:23	10:16	1
J04 大阪北部地震	ALOS-2	ASC	3	0:05	1×1	2	5:01	0:03	5:43	1
	ALOS-2	ASC	6	1:04	1×1	2	11:44	0:18	13:05	2
	Sentinel-1	ASC	6	1:04	1×1	2	4:48	0:02	5:53	2
	Sentinel-1	DES	6	1:35	1×1	2	12:40	0:22	14:33	2
J05 北海道胆振東部地震	ALOS-2	ASC	6	1:35	1×1	2	2:25	0:09	4:09	1
	ALOS-2	ASC	3	0:06	1×1	2	3:39	0:07	3:52	2
W01 ネパール地震	Sentinel-1	DES	3	0:48	1×1	2	2:38	0:01	3:27	1
W02 イタリア地震	ALOS-2	ASC	3	0:02	1×1	2	0:56	0:07	1:05	2
	ALOS-2	ASC	3	0:05	1×1	2	0:38	0:02	0:43	1
	Sentinel-1	ASC	3	0:08	1×1	2	0:27	0:02	0:37	1
	COSMO-SkyMed	DES	3	0:05	1×1	2	2:01	0:02	2:08	1

※イタリアのSentinel-1の観測範囲はCOSMO-SkyMedの観測範囲に準じてデータを切り出した

や、一部の解析を別の計算機環境で実施する機能、常時解析を実行する環境を構築して解析結果を蓄積しておくことで、そこから発災前のペアの解析結果を活用することにより、発災後の解析のみ行なうような仕組み作り等が考えられる。

③ システム化と試験運用

前節の事例の蓄積をふまえて、一連の処理を自動化すべくシステム化を行い、試験運用を開始している。現状では、ALOS-2、Sentinel-1 に対応している。そのうち、Sentinel-1 については、ESA のダウンロードHUB から常時最新のデータをダウンロードし、常時解析を実施出来るようにしている。この常時解析の結果は、前述のように災害後の解析時間の短縮のために管理するだけでなく、平常時の市街地の変化を把握する解析プロダクトとしての活用も可能となっている。

3) 人工衛星による被害解析技術の開発 2: 高分解能衛星画像からのAIによる被害解析システム

前節で述べたとおり、合成開口レーダーは昼夜や天候を問わず地上の物体の観測が可能であるが、まだまだ地上分解能が建物に対しては粗いといった面や、主に位相を手がかりにした解析手法が主流のため、直感的でないといった面などがあげられる。一方で、可視光衛星は、原理的にはカメラと同様に太陽光の跳ね返りを捉えるセンサーを搭載しており、得られる画像を解析することで、レーダー衛星だけではわからないより詳細な観測が可能となると考えられる。

本節で用いる可視光衛星画像は、地上分解能が1m未満のいわゆる高分解能衛星画像である。多くは商用衛星であるが、地上分解能30cmの撮影が可能なものもある。また、2021年度に予定されているALOS-3には地上分解能80cmの可視光センサーが搭載されるこ

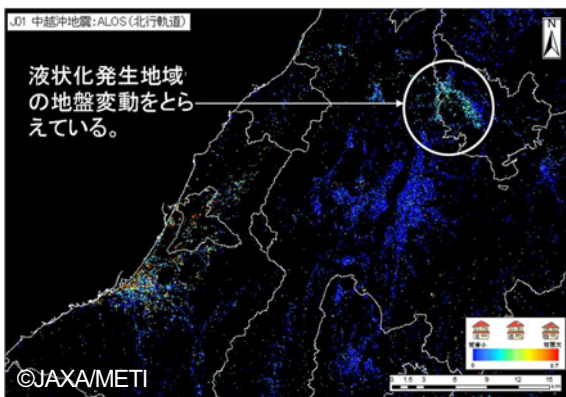


図12 解析例(中越沖地震、ALOS 北行軌道)

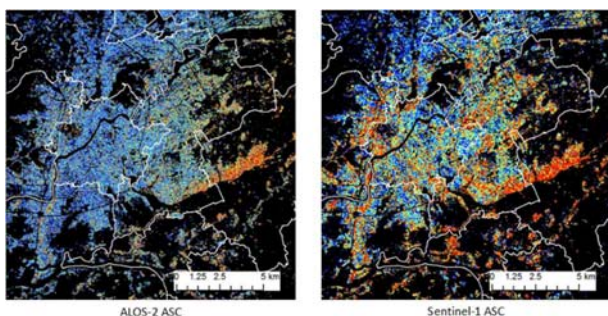


図13 衛星(バンド)による違い(熊本地震、左:ALOS-2北行軌道、右:Sentinel-1北行軌道)



図 14 学習に用いる画像例

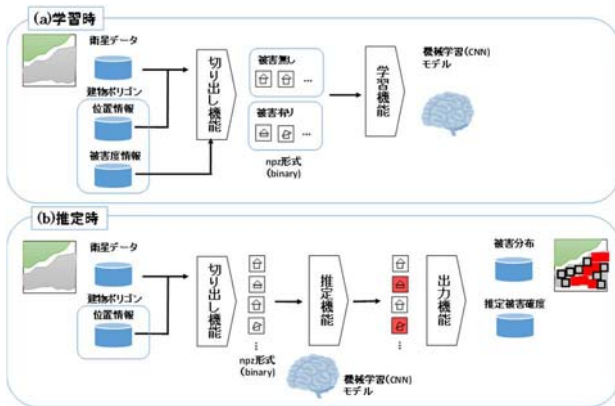


図 15 今回のシステムの処理の流れ (イメージ)

とになっている。

こうした高分解能衛星画像を解析する手法としては、①2 時期の画像の比較解析、②1 時点の画像を用いた AI (人工知能) による解析、に大別できる。そのうち、本研究では実用性を考慮して、②のアプローチでの被害解析システムの構築を行うことにした。システム構築自体が目下進行中のため、以下ではその概要を述べることにしたい。

ここでは、1 時点の高分解能衛星画像データと、建物ポリゴンデータを用いて、Convolutional Neural Network (CNN) を用いた機械学習により建物 1 軒毎の被害推定を行う。学習・予測に用いるデータは、衛星データから建物ポリゴンの位置情報により建物を 1 軒毎に切り出したカラー画像とする (図 14)。

ここで重要なのは CNN として何を用いるかである。CNN の候補としては、例えば石井他 (2018) で使用されている LeNet、藤田・畑山 (2020) で使用されている AlexNet などが挙げられる。LeNet は 1998 年、AlexNet は 2012 年に提案されたモデルで、どちらも物体認識分野において一定の成果を収めている。一方 ResNet (Residual Networks : He, Kaiming, et al. 2015) は 2015 年に提案されたモデルで、大規模自然画像データセットである ImageNet を用いて学習され、名前の通り、後続の層に対して手前の層との残差を元

に学習を進めるといった機構を入れていることから、一般物体認識において高い分類性能を持つモデルである。画像分類においては AlexNet を大きく凌ぐ結果を残している。また、層数も AlexNet が 14 層であるのに対して、提案された ResNet の中で最も層数の少ないものでは 18 層と複雑さは大差なく、層数の少ないモデルであれば処理時間も問題にはならない。

本研究の CNN は、ResNet18 とした。ResNet18 を ImageNet データセットに対して学習させた重みは Python の機械学習パッケージ PyTorch で使用可能であるため、本研究ではこの重みを利用した転移学習により被害推定モデルを作成することとした (図 15)。

本稿執筆時点では、システム構築がおおよそ終了し、テストデータによる検証を行っているところである。また、このシステム自体は高分解能衛星画像だけでなく、航空写真やドローンの画像でも解析可能なことから、今後の被害把握の幅が大きく広がったとも言える。

4) 航空写真による被害解析技術の開発

人工衛星と並んで、航空機も災害後の被害把握には不可欠な方法である。多くは航空測量会社が保有するデジタル測量カメラによる航空写真 (空中写真) であるが、この他にもレーザー計測やオプリーグ航空カメラや赤外線カメラなど、センサーも多種多様なものが実装されている。そのうち航空写真については、現在では地上分解能 15cm といったカメラも存在することから、建物を対象とする解析を行うには分解能の点はすぐれていると言える。しかし、多くの場合、航空写真は直下を撮影されることが多いことから、その画像解析だけは、屋根の被害には適しているが、建物の崩壊状況を把握するには十分でない。

そこで本研究では、災害後に撮影される航空写真から、3 次元モデリング技術を用いて災害後の 3 次元建物データを生成し、これと災害前の建物データの比較による被害評価を自動的に行うシステム開発を行った^(註3)。具体的には、航空写真等の空撮画像や映像等から 3 次元モデリング技術の 1 つである SfM (Structure from Motion) により 3 次元化したデータ (仮に、被災市街地 3 次元データと呼ぼう) と、発災前の建築物等の地理空間情報に基づいて、それらの高さ方向の差分計算による被害検出を迅速に行うためのシステム開発である。

SfM は複数の画像からカメラ位置と空間的な点座標を復元するモデリング技術で、近年 3D プリンターや UAV (ドローン) 等の普及や、i-Construction 等の進展に併せて注目されている技術である。基本原理を示したのが図 16 である。ここでは垂直写真を例

にとると、通常は同じ範囲をオーバーラップするように撮影されるため、ある地物が複数の画像に含まれることになる。ここから、各画像の位置関係をもって、三角測量の考え方を適用して地物上の

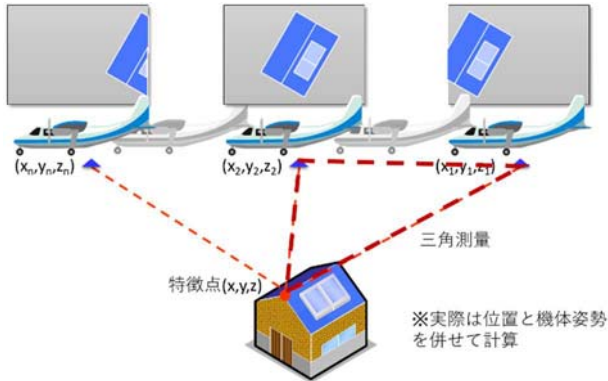


図 16 SfM (Structure from Motion) の基本原理

ある点の位置を特定する方法だと考えると理解していただき易いかと思われる。ただし計算量やデータ量が多くなるため、処理時間の効率化が不可避である。SfMは有償無償を問わず、多くのアプリケーションや処理ライブラリがあるため、これらを如何に実装していくかが、迅速化においては重要な観点の1つである。

今回の作成方法を考える上で留意した点は、

- ・ 3次元化したデータのデータ量が多くなるため処理時間の効率化が不可欠
- ・ 被災前と被災後の地盤変動等や元データの作成方法の違い等に起因する空間的な位置のずれを自動的に検出し位置合わせを行うこと

である。こうした処理自体はGISの操作でも実施可能だが、本研究ではこれらの処理を高速化・自動化するための作成フローを検討し、一連の処理を自動化することとした(図17)。総じて個々の処理は極めてシンプルであるが、データ量が多いことから、こうした自動処理の機構は不可欠である。

この作成フローに基づいて、建築物被害図の試作を行った。本稿では2016年熊本地震の前震後及び本震後1日以内に撮影された益城町中心部の空撮被害画像を用いることにした。これらより、SfMソフトにより点群データを生成し、前述の検出プログラムにより発災前後での高さの変化率を計算した結果を可視化した(図18)。今回の試作では、被災前の建築物の高さを建築物ポリゴンの階数情報に平均階高を乗じて算出していることや、SfMで復元した被災後の点群の高さに誤差が含まれていることを勘案して、発災前後での高さの変化率が25%以上の建物ポリゴンを被害有りとして図化した。実際は被害区分ごとの図化も有効であると考えら

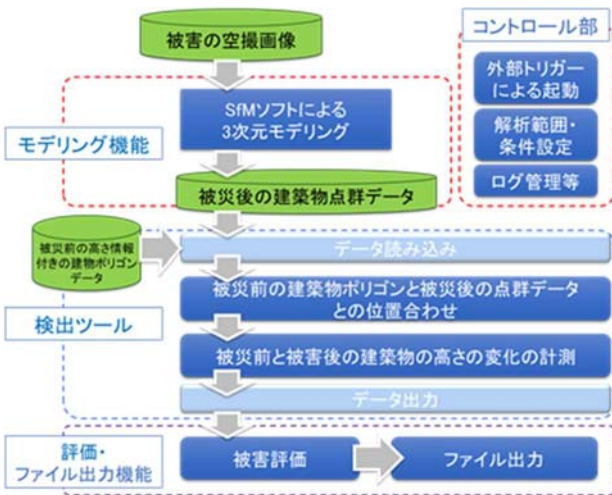


図 17 処理の流れ (イメージ)

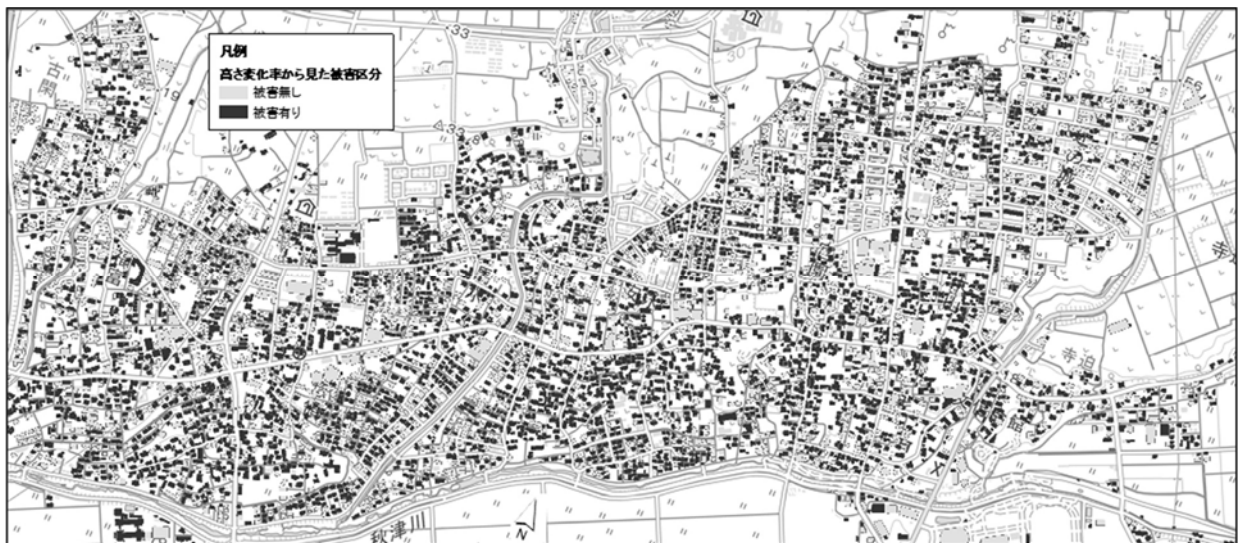


図 18 3次元モデリング技術を応用した被害図 (2016年熊本地震、益城町:本震後)

れるが、発災前後での高さの変化率と被害度合いは単純な比例関係ではないことや、表現方法も様々な考え方が有るため、現状では被害の有無程度の区分が現実的であると考えられる。

今回の範囲での処理時間は、概ね 17 分程度であった。発災から被害図の可視化までの時間は、地震の規模とその発災時刻、画像の配信と若干のデータの下処理の時間等を勘案する必要があるが、処理の工程のみに着目すれば、今回のアプローチで迅速に建築物 1 棟ごとの被害の有無を検出し可視化することが可能であると考えられる。

さらに、事後に調査が行われた応急危険度判定結果との比較を行った。ここでは応急危険度判定の「危険(赤)・「要注意(黄)」を被害有りの建築物、「調査済(緑)」を被害無しとの建築物と見なし、本方法の結果をつきあわせると、正解率(応急危険度判定が被害ありかつ本方法での高さの変化率が 25%以上、同じく被害無しで高さの変化率が 25%未満の件数の合計を応急危険度判定の調査棟数で除したものは 70%であった(表 6)。

以上、3D モデリング技術を応用した建物被害の解析手法の開発について概要を述べた。現状では、一連の処理については自動化されており、さらにクラウド上に実装して試験運用を行っているところである。

表 6 応急危険度判定調査結果と本手法での結果の比較

応急危険度判定結果との比較 (暫定値)	応急危険度判定	
	被害無し (調査済:緑)	被害有り (危険:赤+ 要注意:黄)
本方法 被害無し	6%	16%
被害有り	14%	64%

IV 横から観るか、上から観るか

前章までで、個別の「観る技術」に関しての研究概要を見てきた。ここではこれらの個々の技術をハイブリッドに活用した展開可能性について 2 つの視点から述べたい。

1) 発災後のタイムラインと解析結果の信頼性を考慮した被害マップの生成

前述した個々の解析技術から出力される解析プロダクトは、それぞれの観測・調査技術の前提や制約により、建物被害という観点からは信頼性が異なる。もちろん、どのような目的で用いるかということで、その信頼性の基準も異なってくる訳だが、ここでは応急

危険度判定との相対的な関係で捉えれば、現状では衛星 SAR は建物に対する分解能が粗く、その解析結果も発災前後での変化を捉え得ているという意味ではせいぜいどのエリアに被害が発生してそうだという見当を付けたり、観測タイミングによっては他に被害の発生箇所がないかを確認する目的での利用が望ましい。一方、本稿で紹介した可視光衛星画像からの解析は直下視による被害であることや、航空写真からの解析は高さ方向の変化だけを捉えている等、解析している対象が異なるものの、いずれも個々の建物を観るには十分な分解能を持っている。

そして、発災後のタイムラインにそって時間差で観測・調査がなされることが一般的であることから、それぞれの解析プロダクトのリリースも時間差で出てくることになる。発災後の解析プロダクトの出るタイミングとそれらの信頼性を並列的に整理することにより、信頼性が低い場合は、例えばメッシュ表現等の集計的な可視化にとどめ、最終的に応急危険度判定の結果がマッピングされた段階で、個別建物の表示に切り替わるような、それぞれの解析プロダクトをしかるべき可視化方法で提供することが可能となる。すでに、プロトタイプの作成が出来ており、今後さらに使いやすさのための改良を行っていく予定である。

2) 戦略的な現地調査実施のための被害区域のトリアージ

前節では、出力プロダクトの取り扱いといった観点からハイブリッドな可視化の可能性について述べたが、もっと実務的な観点からのハイブリッドな活用について述べたい。

応急危険度判定をはじめとする災害後の現地調査は、人海戦術であるが故に、今後懸念されている南海トラフや首都直下地震といった大規模地震が発生した際に、現地調査にかかるリソースを如何に効率化するかが課題となる。その課題の解決策の 1 つとして、本稿で述べたような「上から観る」技術を用いて、衛星 SAR でおおよその調査範囲を特定し、高分解能衛星画像や航空写真からの解析結果によって、調査を行う地域(例えば、街区毎)の優先度や難易度(いわゆる、トリアージの概念)を参照しながら、調査を実施する判定員の経験や土地勘等を勘案して判定員のペアの組み方を効率化する等を行うことで、より多くの棟数を効率的かつ迅速に調査することが可能となると考えられる。

現在、こうしたコンセプトに基づくシミュレーションのプロトタイプについて検討しており、この検討結果に基づいて実際のシステム構築や社会実装へと進めて行きたいと考えている。

V おわりに

以上、市街地における地震被害の把握技術の研究開発から、「横から観る」技術として応急危険度判定調査の支援ツールの開発について、「上から観る」技術として観測衛星データや航空写真の画像解析やモデリング技術を応用した被害解析システムの開発について紹介し、最後にこれらの個々の技術のハイブリッドな運用がもたらす効果について概観する等の今後の展開を述べた。

今後の大規模地震において、本稿で紹介した技術が実務に貢献できるようにさらなる技術開発や社会実装を行うとともに、常に活用できる状況や体制が持続的に継続されるように、関連する機関や企業等との連携等を引き続き行っていきたいと考えている。

注釈

- 1 II1) ~4) は、阪田他 (2020) を元に、加筆修正を行ったものである。
- 2 III2) ②は、阪田他 (2019) を元に加筆修正を行ったものである。
- 3 III4) は、阪田 (2020) を元に加筆修正を行ったものである。

参考文献

- 石井友、松岡昌志、牧紀男、堀江啓、田中聡 (2018) 「兵庫県南部地震後に撮影された航空写真と現地写真を用いた深層学習による建物被災度判別の試み」日本建築学会構造系論文集、第83巻、第751号、pp. 1391-1400。
- 建築研究所住宅・都市研究グループ (2001) 携帯型情報端末による現地調査支援ツール、<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/hou/topics/CitySurveyor/index.html>、2021年1月15日確認。
- 建築研究所住宅・都市研究グループ (2013) タブレット型情報端末機器による被災建物調査ツールの開発、<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/hou/topics/city-surveyor/index.html>、2021年1月15日確認。
- 阪田知彦、佐藤匠、本田謙一、引地慶多 (2019) 複数の衛星 SAR による建築物被害に関する解析事例の蓄積、地域安全学会梗概集、vol. 45、pp. 47-50。
- 阪田知彦 (2020) 3次元モデリング技術を活用した建物被害状況の迅速マッピング手法の開発、建築と社会 (日本建築協会)、pp. 20-21。
- 阪田知彦・石井儀光・櫻井洋祐 (2020) クラウド GIS をベースとした応急危険度判定支援ツールの開発、地理情報システム学会研

究発表大会論文集、vol.29 (CD-ROM)

藤田翔乃、畑山満則 (2020年) 「航空写真を用いた深層学習による地震災害時の屋根損傷家屋の把握」、土木計画学研究・論文集 第75巻 第6号、127-135。

松岡昌志、山崎文雄 (2001) 1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星 SAR 強度画像の特徴、日本建築学会構造系論文集、No. 546、pp. 55-61。

Kaiming He、Xiangyu Zhang、Shaoqing Ren、Jian Sun (2015) Deep Residual Learning for Image Recognition、Tech Note of arXivLabs、<https://arxiv.org/abs/1512.03385>。

Manabu Watanabe、Rajesh Bahadur Thapa、Tsuneo Ohsumi、Hiroyuki Fujiwara、Chinatsu Yonezawa、Naoya Tomii and Sinichi Suzuki (2016) Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2、Earth、Planets and Space、68、131、12p。

Sadra Karimzadeh、Masashi Matsuoka (2017) Building Damage Assessment Using Multisensor Dual-Polarized Synthetic Aperture Radar Data for the 2016 M6.2 Amatrice Earthquake、Italy、Remote Sensing、MDPI、Vol. 9、No. 4、330、17p。