

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



1995年兵庫県南部地震時の建物被害マップ

- 建築学会・都市計画学会の現地調査＋建研独自調査を，建研でマッピング
- 日本初の地理情報システム（GIS）を使った被害状況図



- データなどの関係から，半年以上の時間を要した

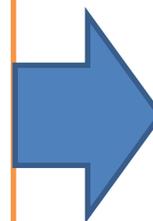
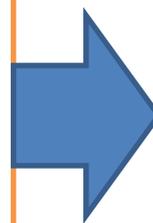
モチベーション

かつては

- 建築制限区域の設定
(基準法84条, 最大2ヶ月)
- 復興計画の策定資料
- 復興事業における参考資料

今は ユースケース

- 上記に加え
- 仮設住宅等の戦略
- インフラ企業での復旧戦略
上の情報
- 災害廃棄物量の推計



- 基盤となるデータがない
- GISの性能上の問題
- 被害結果を得るまでの
リードタイムが長い

課題

- 基盤となるデータがない
- GISの性能上の問題
- 被害結果を得るまでの
リードタイムが長い

市街地の被害状況を迅速にマッピングする

モチベーション

市街地の被害状況を迅速にマッピングするには

	現地調査	映像・画像判読	シミュレーション
入手時期 (リードタイム)	・早くても数週間後	・元の映像・画像等は、 早期に入手可能 ・画質も向上し、伝 送手段も多様化	・早期に入手可能
メリット	・専門家の目が入るため、 信頼性が高い	・リアルな被害状況を入 手・可視化することが可 能	・広域に対しての被害状 況の推定・可視化も可 能
デメリット	・人員配置、結果集約等 の作業の効率化	・目視判読の場合は、作 業量・時間の問題 ・自動(機械)判読の場 合は、判読精度の悪さ、 地域移転性の低さ等の 課題がある	・推定結果が安全側(概 ね過大)になる傾向あり ・データの準備に手間が かかる

モチベーション

- ・リアルな被害状況を如何に迅速に把握し、マッピングするか

「横から観る」⇒現地調査

- 応急危険度判定支援ツールの開発

「上から観る」⇒映像・画像判読(リモートセンシング)

- 観測衛星からの市街地の地震被害の解析
- 航空機からの市街地の地震被害の解析

横から観る技術

応急危険度判定支援ツールの開発

• 経緯

- 1980年 南イタリア地震の際、被災度判定が効率的に実施された
- 1985年 建設省総合技術開発プロジェクト「震災構造物の復旧技術の開発」で応急危険度判定の原案が策定
 - メキシコ地震(1985年)での適用(RC造)
 - アメリカでも判定活動のマニュアル化(ATC-20, 1989年)
- 1991年 「震災建築物等の被災度判定基準及び復旧技術指針」(一般財団法人日本建築防災協会)が発刊
- 1991年～ 応急危険度判定士認定制度が発足(1991年静岡県, 1992年神奈川県)
- 1996年 「被災建築物応急危険度判定マニュアル」(財団法人日本建築防災協会)が発刊

応急危険度判定が実施された事例

これまでに**28**事例

日付	地震名	判定期間	判定のべ人数	判定棟数	判定結果		
					調査済	要注意	危険
H7.1.17	兵庫県南部地震	H7/1/18～2/9	6,468人	46,610棟	30,832棟	9,302棟	6,476棟(他に使用禁止2,825棟)
H7.4.1	新潟県北部の地震	H7.4.2	12人	342棟	261棟	61棟	20棟
H8.8.11	宮城県北部地震	H8.8.14	34人	169棟	127棟	36棟	6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	1,507棟	452棟	89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	1棟	8棟	0棟
H12/6/26, 7.1/7.9/7.15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	122棟	118棟	
H12.10.6	鳥取県西部地震	H12.10.7～20	332人	4,080棟	2,138棟	1,499棟	443棟
H13.3.24	芸予地震	H13.3.25～4.12	636人	1,763棟	674棟	921棟	168棟
H15.5.26	宮城沖を震源とする地震	2003/5/30, H15.6.2	5人	6棟	2棟	4棟	0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	3,804棟	2,181棟	1,260棟
H16.10.23	新潟県中越地震	H16.10.24～11.10	3,821人	36,143棟	19,778棟	11,122棟	5,243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	1,500棟	1,131棟	517棟
H19.3.25	石川県能登半島地震	H19.3.25～3.30	391人	7,600棟	4,800棟	1,571棟	1,229棟
H19.4.15	三重県中部を震源とする地震	2007/4/15	2人	1棟	0棟	0棟	1棟
H19.7.16	新潟県中越沖地震	H19.7.16～7.23	2,758人	34,048棟	20,150棟	8,943棟	4,955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	3,031棟	837棟	271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	60,491棟	23,191棟	11,699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	1,249棟	694棟	375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	345棟	155棟	13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	200棟	156棟	46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	217棟	241棟	144棟
H28.4.14	平成28年熊本地震	H28.4.15～6.4	6,819人	57,570棟	22,833棟	19,029棟	15,708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	5,809棟	1,209棟	293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	5,712棟	782棟	133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	6,770棟	2,198棟	489棟
H30.9.6	北海道胆振東部地震	H30.9.7～9.14	108人	813棟	493棟	163棟	157棟
R1.6.18	日本海山形県沖地震	R1.6.19～6.22	97人	841棟	540棟	219棟	82棟

・ 応急危険度判定の流れ




判定拠点から
調査対象地まで移動

判定作業
調査票の記入
判定ステッカーの掲示

判定拠点へ帰還し
調査結果の確認等

2019年3月末現在
応急危険度判定士数
110,375名



応急危険度判定支援ツール

住所標記が統一
されていない、
未記入

何度も各項目に
「//」や略語が書
かれている

計算違い

条件分岐で
未回答がある

総合所見が
未記入

住宅地図と照合
がつかない

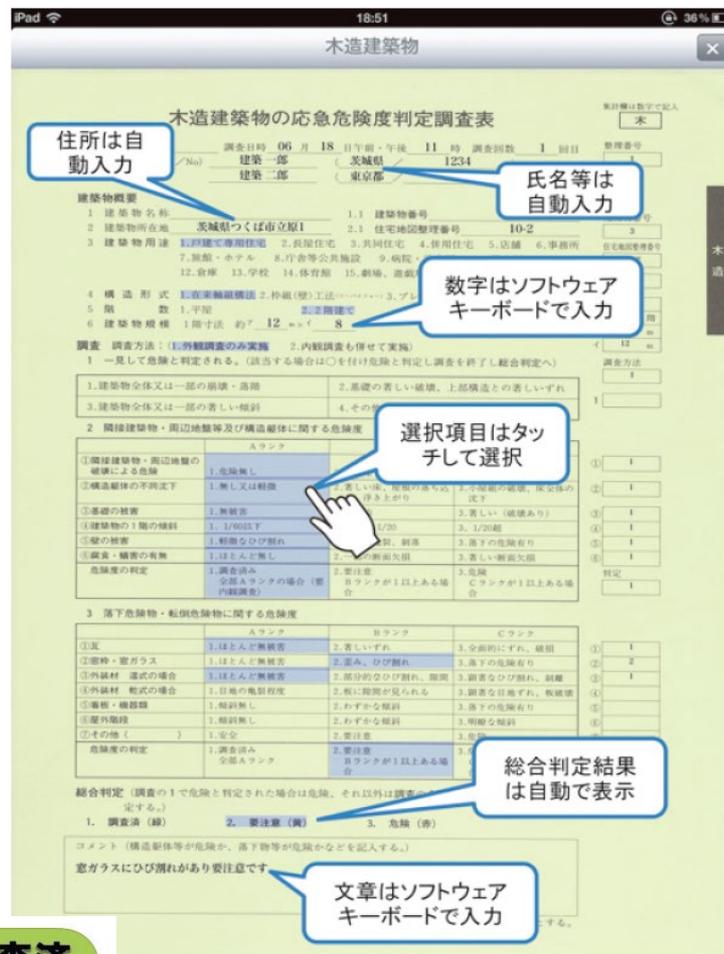
(ごく希に) 記載内容が判読できない

● 建築研究所での取り組み



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

<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/hou/topics/CitySurveyor/index.html>



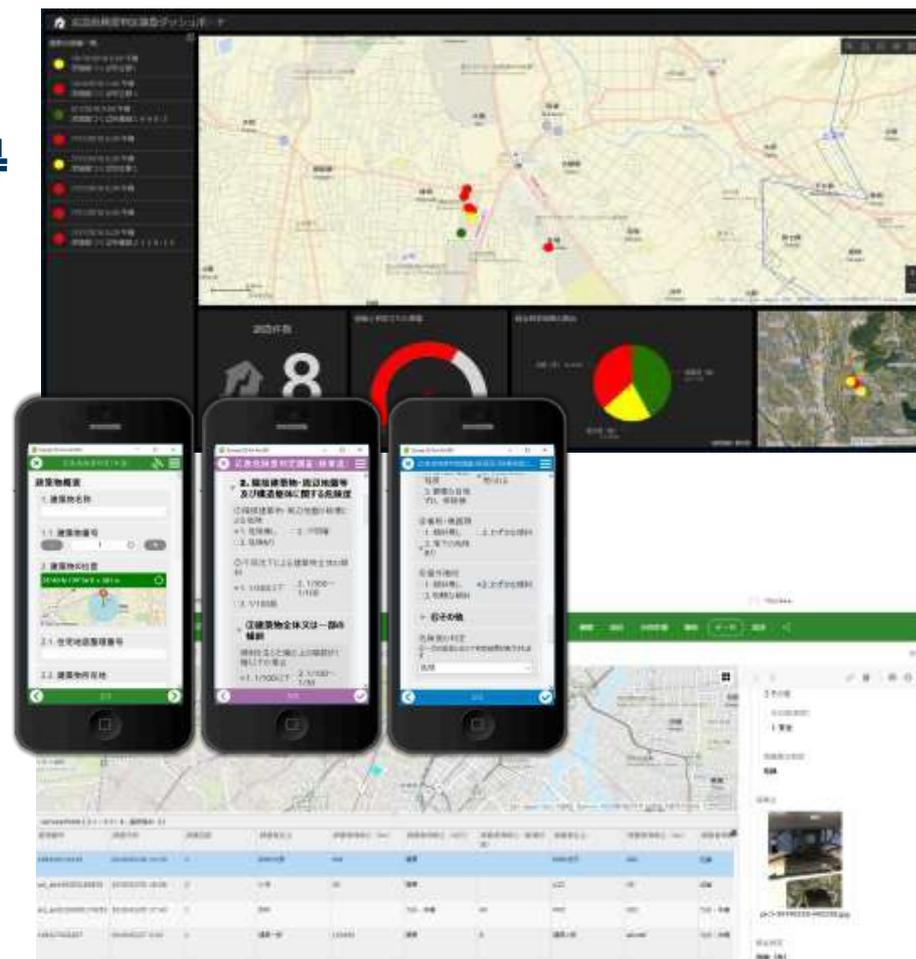
調査済
要注意
危険

iOSをベースとした
応急危険度判定支援ツール

<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/hou/topics/city-surveyor/index.html>

マルチプラットフォーム対応応急危険度判定支援ツール開発 クラウドGIS(ArcGIS Online)を利用

- 木造、S造、RC及びSRC造に対応
- デバイスのGPSからの位置情報取得
- 調査員の入力作業の負担軽減
 - 調査毎のユニークIDの自動採番
 - プルダウンでのメニュー選択
 - 調査時刻の自動付与
 - 危険度判定結果の自動適用
 - 写真などの添付
- 結果の集約・可視化には、本部向け・現場向けに、結果の集約・可視化ができるアプリ等も簡易に構築可能



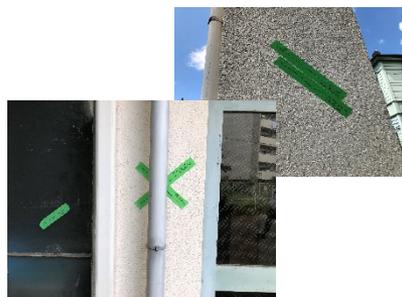
開発: ESRIジャパン

自治体での実務訓練での実証 これまでに2事例

- 判定技術の向上・維持のために、都道府県ごとの判定協議会等が主催して年に1回程度、実務訓練が実施されている。そういう機会での試用と実証を重ねている。

自治体主催の実務訓練への参加事例(京都市)

2020年7月31日実施。参加人数10名(判定経験有り5名,無し5名。両者で1組で1班を構成)。約2時間程度。機材は建研から持ち込み。RC造の2階建建物を対象として実施。



ダミーのクラック等の設置



訓練概要・
ツールの使い方の説明



使用した
タブレット



班ごとに訓練を実施
(結果はクラウド上に送信。
リアルタイムに集計)



集計・分析結果の講評
ディスカッション等


 ○入力については、違和感はなかった
 ○集計結果がすぐに見られるのが良い


 ○通信環境が悪かった
 ○自治体でクラウドが利用できない場合があるので、要検討

開発の効果

・ 支援ツールによる調査の流れ



調査員が本部へ出向く回数が減らせるので、負担軽減につながる

本部の3密を避けられる

支援ツールの今後の展開

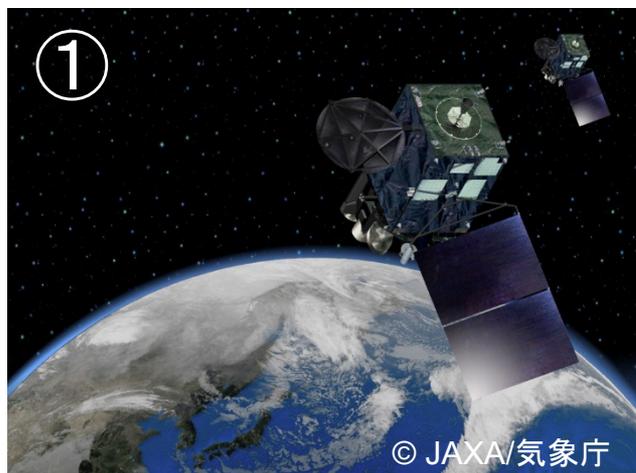
- ニューノーマル時代における現地調査ツールのプロトタイプ
 - リモートによる本部機能の実現
 - リモートによる判定作業支援
- 判定結果の住民への提供機能の開発
- 日常業務との連携
 - 空き家調査

上から観る技術

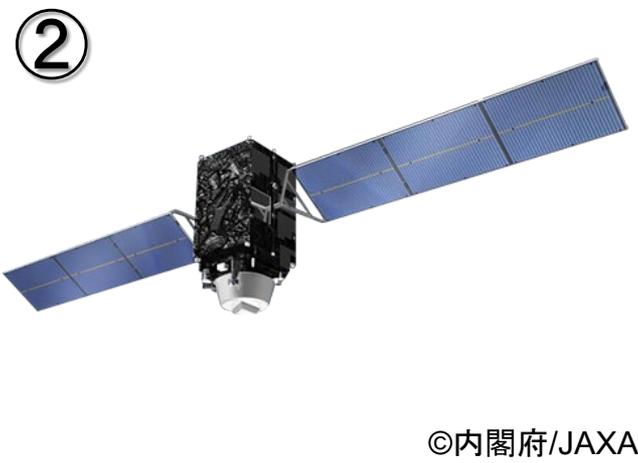
観測衛星からの市街地の地震被害 の解析

● 衛星の種類

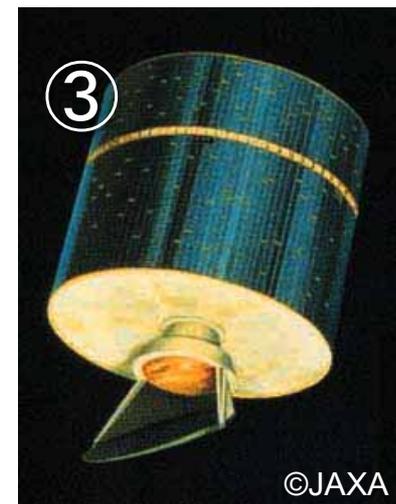
- ① 気象・地球観測衛星
- ② 測位衛星（GPS, カーナビ, 準天頂衛星:みちびき）
- ③ 通信・放送衛星（衛星携帯, BS,CSなど）
- ④ その他の人工衛星



気象衛星ひまわり8号, 9号



準天頂衛星みちびき



通信衛星さくら

観測衛星の種類

	合成開口レーダー Synthetic Aperture Radar: SAR	可視光・赤外線センサー
センサーの概要	地上に向けてマイクロ波を放ち、その反射を計測するタイプのセンサー	可視光については、太陽を光源とした反射強度等を計測するセンサー。カメラと同原理。
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・アクティブセンサーのため、昼夜間、天気を問わず観測可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・見た目をそのまま記録しているので、解析処理が簡単 ・高分解能センサーになると、地上分解能30cm程度の物体を検出可能。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・地上分解能が粗い(数m～) ・解析処理が複雑かつ高度な技術が要求される 	<ul style="list-style-type: none"> ・夜間、雲・雨の時は撮影されない。 ・高分解能衛星はほぼほぼ商用なので、データが高価

衛星SARによる
建物被害集中地区の検出

高分解能可視光衛星画像
による被害解析

衛星SARによる 建物被害集中地区の検出

- 課題

- 「現状の衛星SARは、建物に比して分解能が低く、建物の被害解析には向かない」というトラウマ
- でも、衛星SARは、昼夜間問わず観測が出来る点や、斜めから見ていることの特徴をどう活かすか
- 衛星SARの解析手法は様々あるが、解釈を簡易化する必要がある

研究の進め方

衛星SARによる
建物被害集中地区の検出

- ① まずは、過去の災害での解析を行ってみて、手法の有効性を検証
- ② プロトタイププログラムを作成し、事例的解析を行う
- ③ 対象衛星の追加、処理の高速化等と同時に、試験運用を行ってみる
- ④ 完全自動解析モードに移行し、本格運用に移行する

事例解析

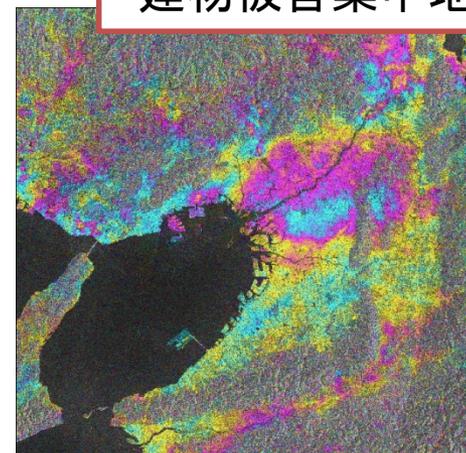
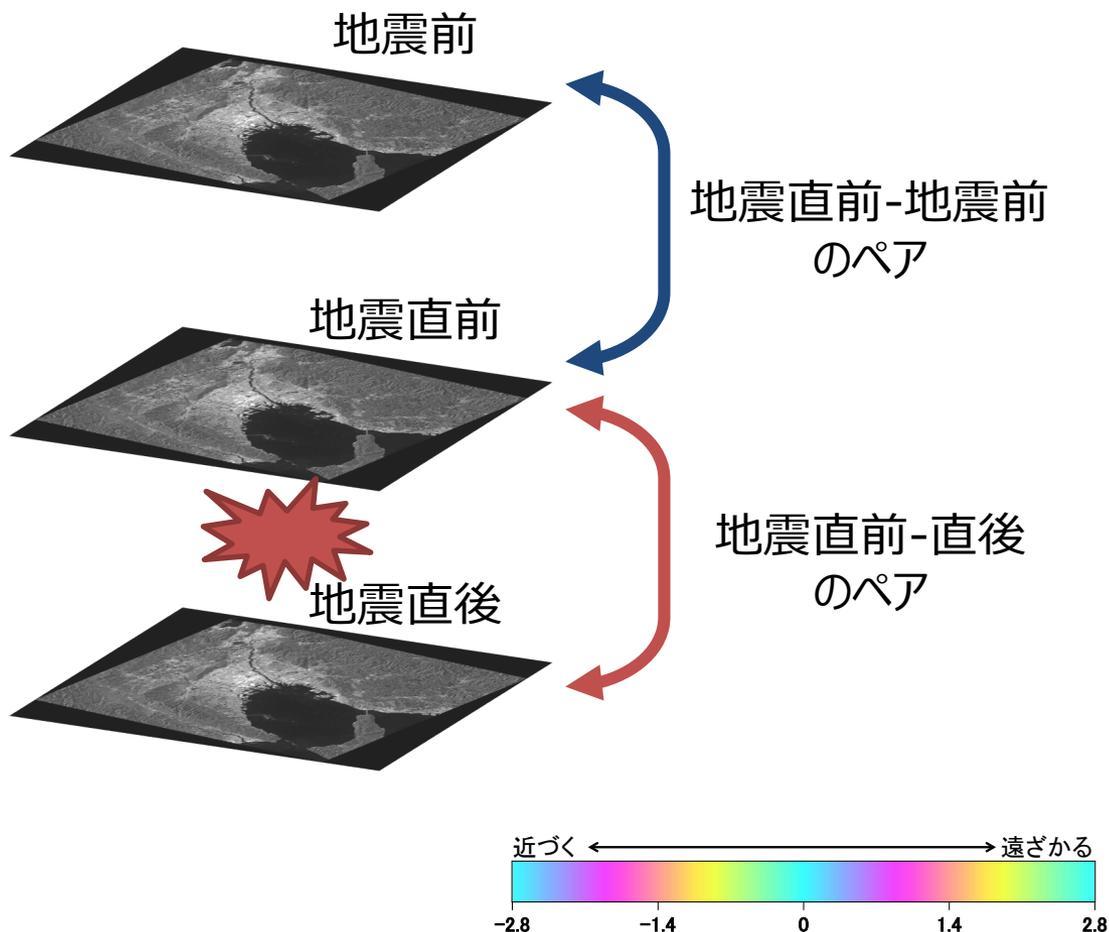
衛星SARによる
建物被害集中地区の検出

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

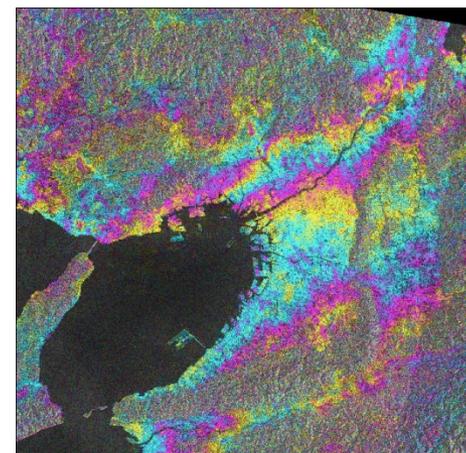
ASC=北行観測, DES=南行観測

解析方法

衛星SARによる
建物被害集中地区の検出



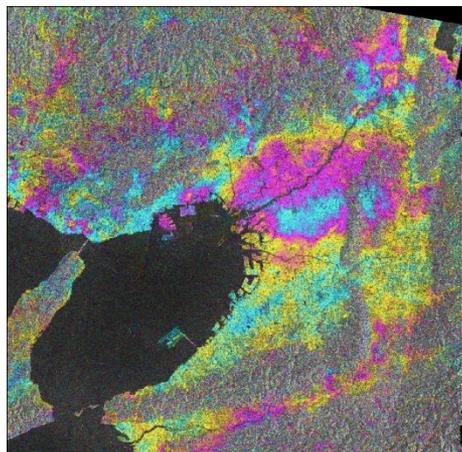
地震直前-地震前のペア
のペアの干渉画像



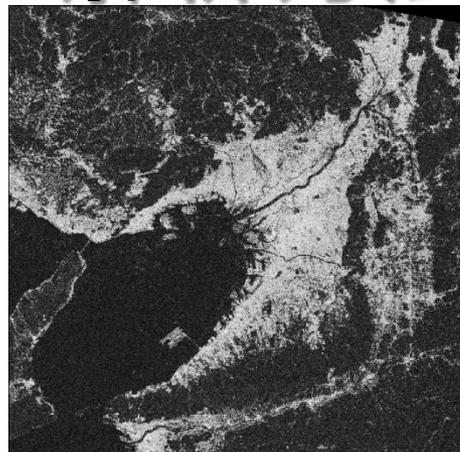
地震直前-直後
のペアの干渉画像

解析方法

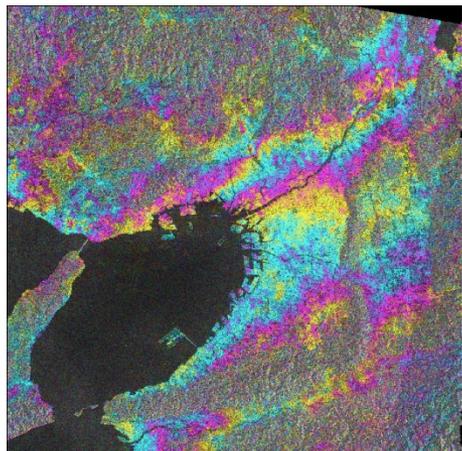
衛星SARによる
建物被害集中地区の検出



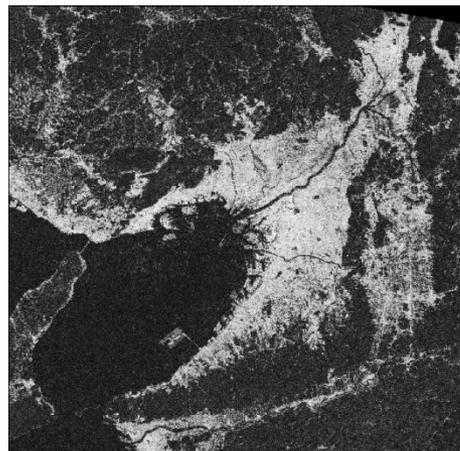
地震直前-地震前のペア



地震直前-地震前のペア
のコヒーレンス画像



地震直前-直後のペア

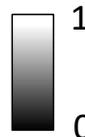


地震直前-直後のペア
のコヒーレンス画像

- 干渉処理の結果からコヒーレンス画像を作成
- コヒーレンス(干渉性)とは2時期の強度と位相の相関であり、地表面の形状が2時期でどの程度変化したかの指標となる。

$$\gamma = \frac{| \langle C_1 C_2^* \rangle |}{\sqrt{(\langle C_1 C_1^* \rangle) (\langle C_2 C_2^* \rangle)}}$$

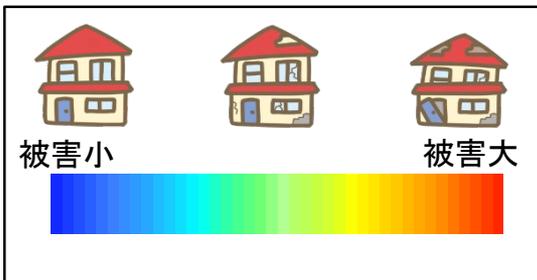
コヒーレンス



γ: コヒーレンス
C₁: 1回目の強度と位相(虚数)
C₂: 2回目の強度と位相(虚数)

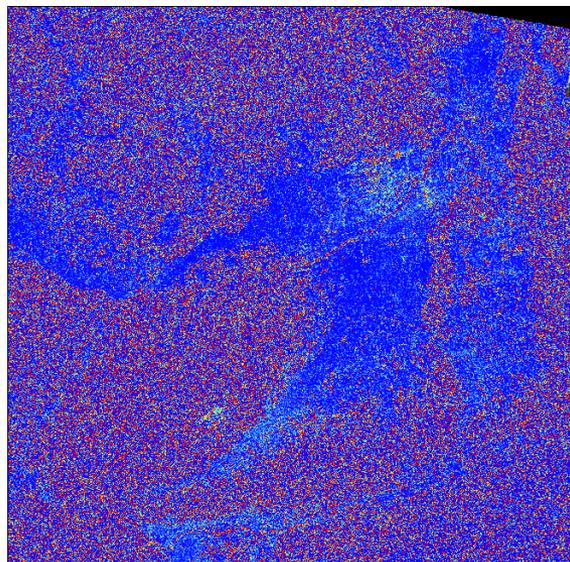
衛星SARによる
建物被害集中地区の検出

建物被害度への変換

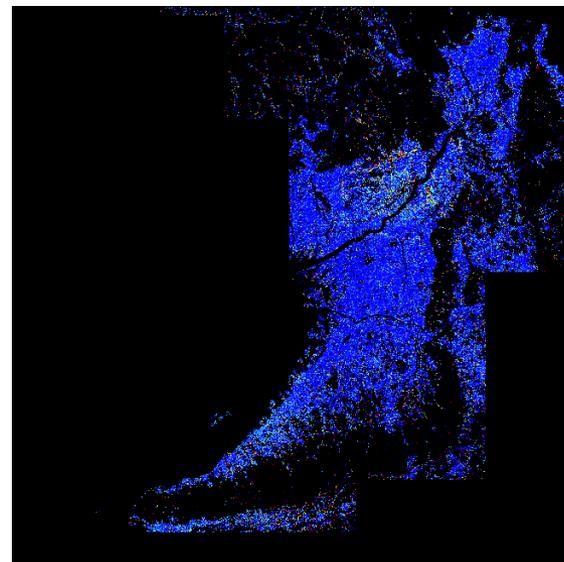


$$\text{建物被害度} = 1 - \frac{\text{地震直前と直後のペアのコヒーレンス}}{\text{地震直前と地震前のペアのコヒーレンス}}$$

- 2ペアのコヒーレンスから建築物被害度を算出した
- また、コヒーレンスの低い山地等の影響を除くため建物ポリゴンで切り取る。
 - 海外事例の分析では建物ポリゴンがないので光学画像より市街地範囲を切り取った



建築物被害度（全域）



建物ポリゴンで切り取り（大阪府周辺）

衛星SARによる
建物被害集中地区の検出

現在の到達点

- 現在は、Sentinel-1とALOS-2に対応した解析システムを構築済み。
 - Sentinel-1については、ESA(ヨーロッパ宇宙庁)からデータをダウンロードして自動解析可能
 - ALOS-2については、防災科研ワンストップシステムからデータをダウンロードして解析を出来るように調整中
 - 2021年2月より、AWS上で試験運用モードに移行
 - 2021年2月13日の福島県沖の地震についても、周回の関係で、解析中

高分解能衛星の事例

高分解能可視光衛星画像
による被害解析

Worldview1～4号 国籍:アメリカ

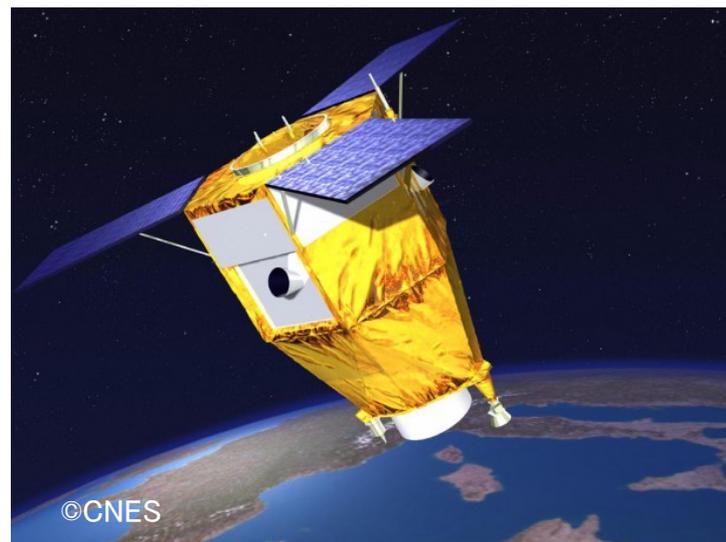
搭載センサー	パナクロ 0.31 m 8バンドマルチスペクトル 1.24m
軌道	太陽同期準回帰軌道
高度	617km
周期	97分
回帰	1日以下



©DigitalGlobe, Ball Aerospace

Pleiades-HR (1A / 1B) 国籍:フランス

搭載センサー	パナクロ 0.5 m マルチスペクトル 2.8m
軌道	太陽同期軌道
高度	694 km
周期	98.64分
回帰	26日(2機のコンステレーションで4日以下)



©CNES

いよいよ日本も！ 高分解能時代の到来！

- 0.8m

高分解能可視光衛星画像 による被害解析

項目	諸元	
打上げ	2021年度（予定）	
運用軌道	軌道種別	太陽同期準回帰軌道
	軌道高度	669 km（赤道上）
	降交点通過 地方太陽時	10時30分±15分
	回帰日数	35日
センサシステム	広域・高分解能センサ	
地上分解能	白黒（パンクロ）	0.8 m
	カラー（マルチ）	3.2 m（直下観測時）
観測幅	70 km	
ポインティング	60°	
データ伝送	直接伝送（Ka帯，X帯）	
	光データ中継衛星による光データ伝送	
質量	2,900 kg（打上時）	
衛星寸法	5 m×16 m×3.5 m（太陽電池パドル展開時）	
観測時間	1周あたり10分	
設計寿命	7年以上	

光衛星間通信機器

データの伝送速度の向上、データ量の増大を目的とした光データ中継システムと通信するための機器です。

広域・高分解能センサ

広い視野と高い分解能を両立させた光学のカメラで、地上の様子を広く詳細に観測します。

太陽電池パドル

軌道上において太陽光を電池エネルギーに変換し、衛星に必要な電力を供給します。

ALOS-3の概要 | ALOS-3@EORCホームページ (jaxa.jp)より引用

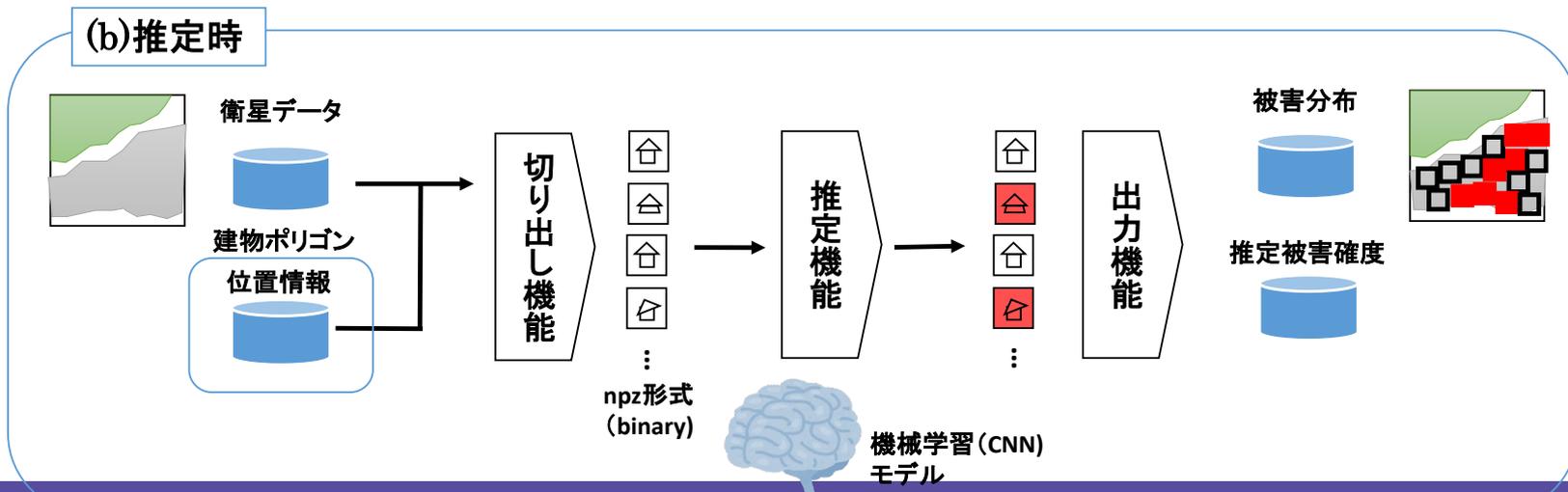
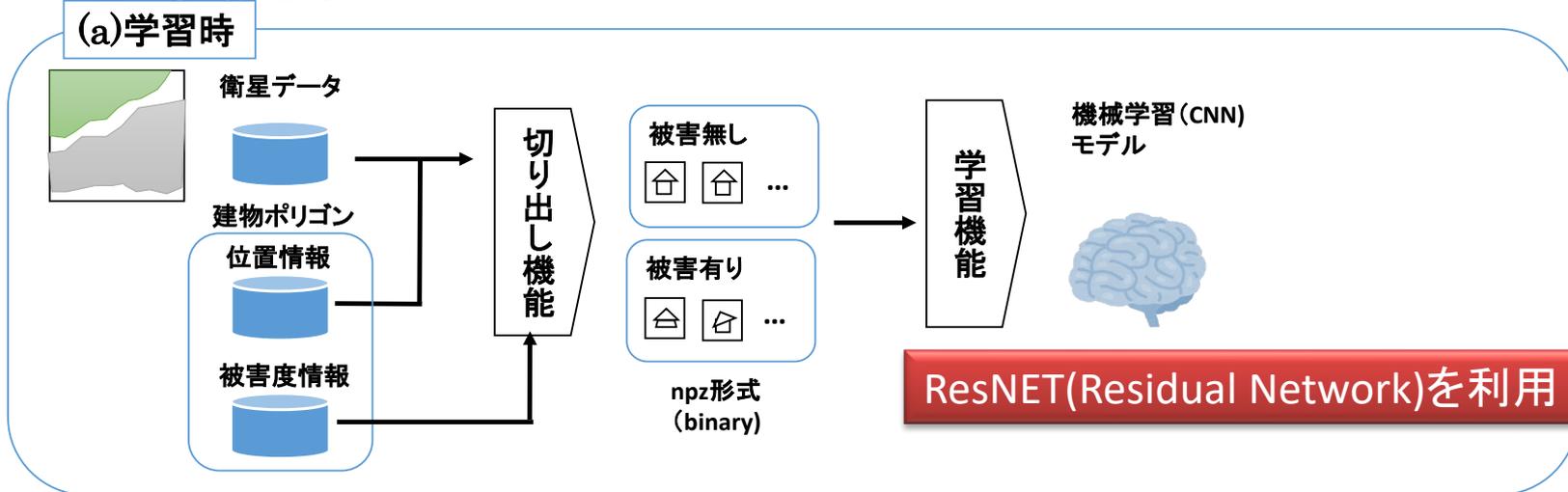
高分解能衛星画像の解析方法

- アプローチは主に2つ
 - 災害前後の差分解析
 - メリット: 直接比較するため、地域差などによる影響がない
 - デメリット: 完全に2時点の画像をそろえるのが難しい
 - AIによる解析
 - メリット: 災害後1時点の画像があれば十分
 - デメリット: AIの信頼性により解析結果に影響がでる
- 今回は、AIによる解析を試行

AIによる被害解析

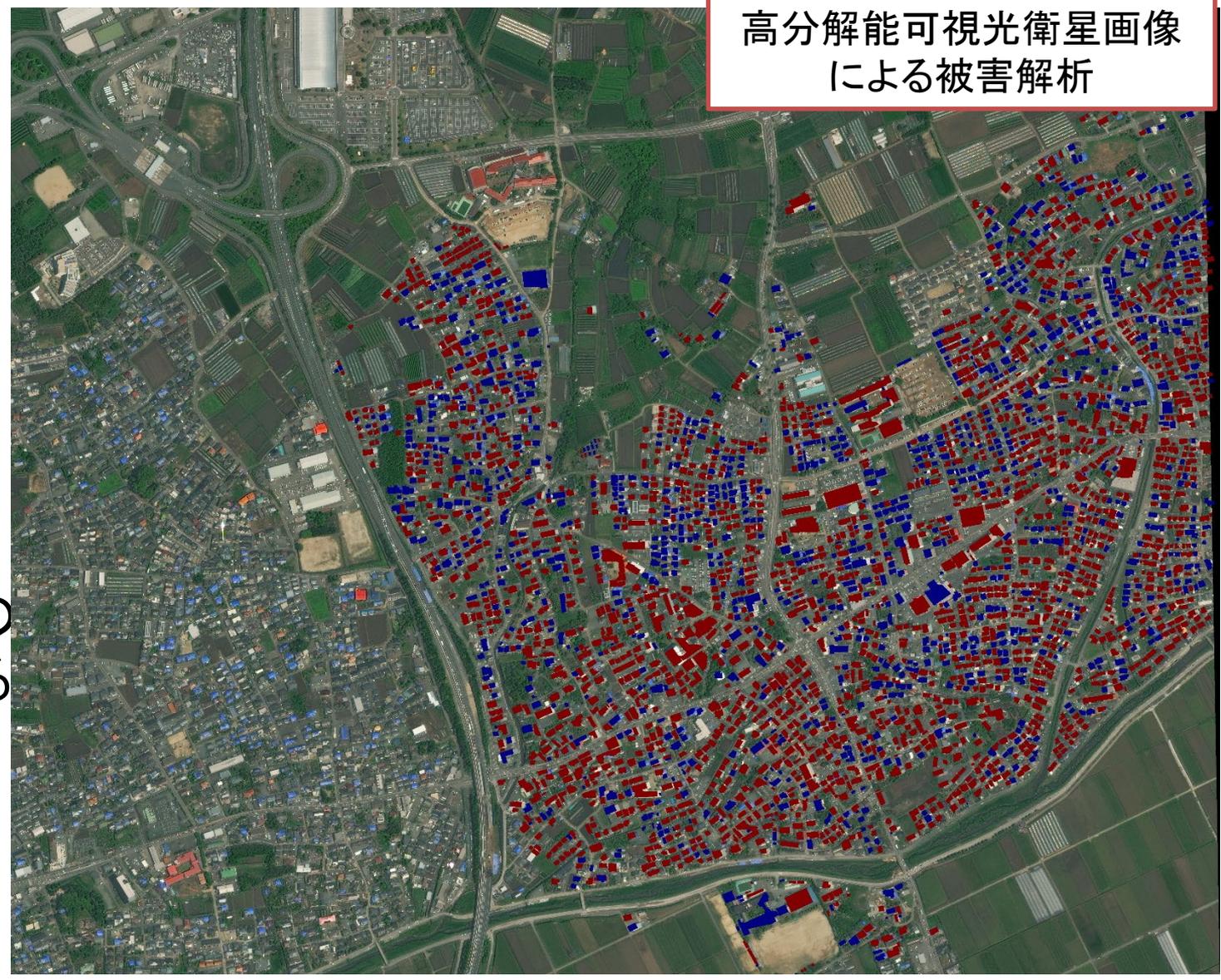
高分解能可視光衛星画像
による被害解析

大きな流れ



- 熊本地震

高分解能可視光衛星画像
による被害解析



※少し過学習の
傾向が見られる

現段階の到達点

高分解能可視光衛星画像
による被害解析

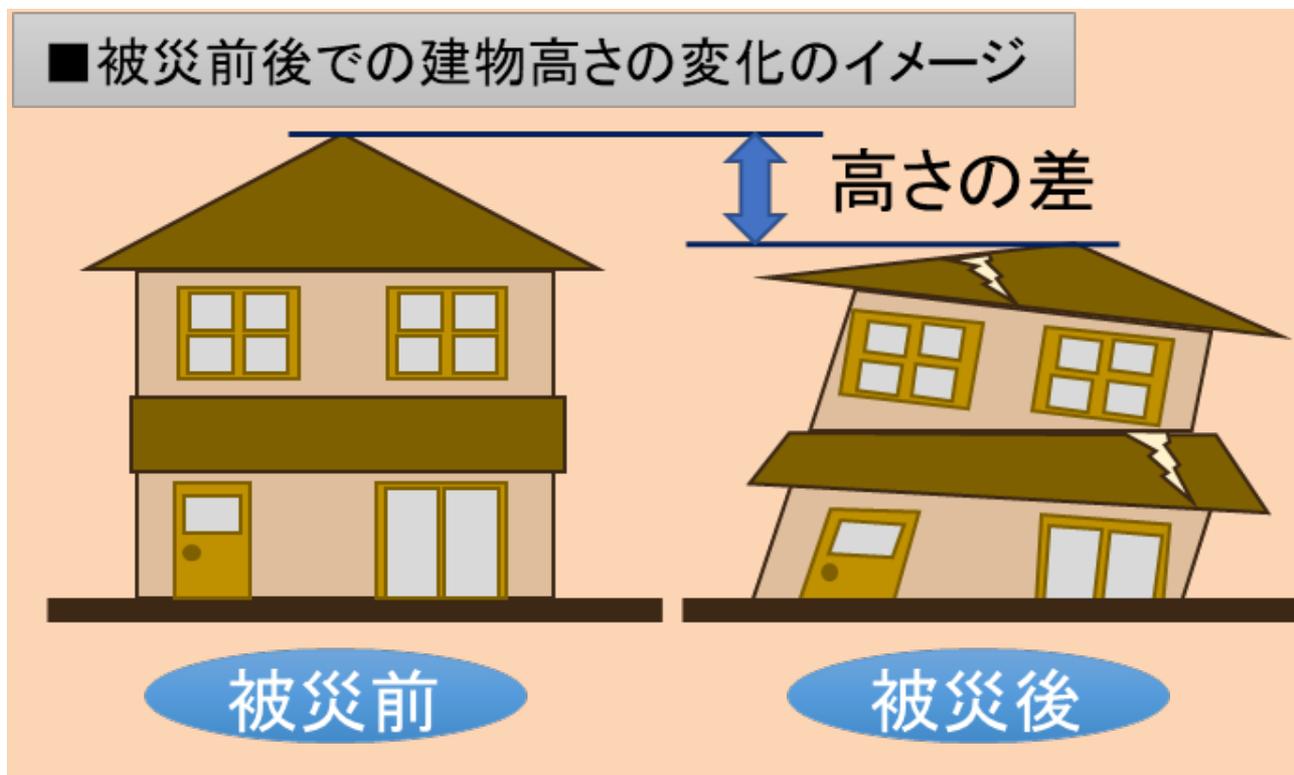
- 基本的なプログラムは概成（ほぼ自動処理が可能）
- いくつかの地震で検証を実施
 - 航空写真での実用性の検証
- 学習モデルの汎用性の検証
- 試験運用モードへの移行（2021年9月予定）

上から観る技術

航空写真からの建物被害解析技術

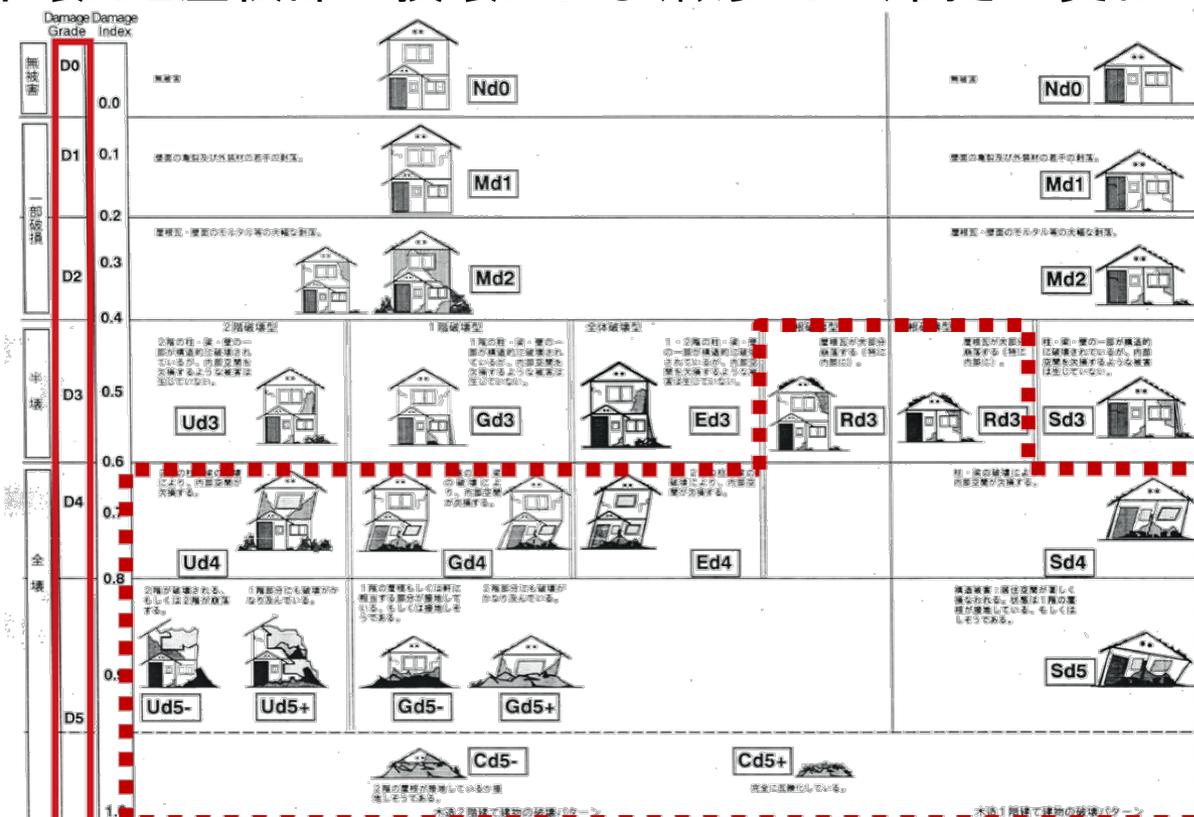
建物被害のモデル化

- 迅速さ優先で、建物高さの変化のみに着目した被害検出



岡田・高井のダメージグレードによれば

- 全壊だと概ね高さが変化
- 半壊だと屋根部の損壊による(微小だが)高さが変化が見られる



【図出典】 岡田成幸・高井伸雄:地震被害調査のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造系論文報告集、第524号、pp.65-72、1999年10月。

- 建物の高さをデータから取得するには
発災前: 建物ポリゴン(平面形状)基盤地図情報
+ 階数情報(基礎調査等) or レーザー計測結果
発災(直)後: レーザー計測等での高さ情報, or
モデリング手法の活用

- 本研究では、モデリング手法として

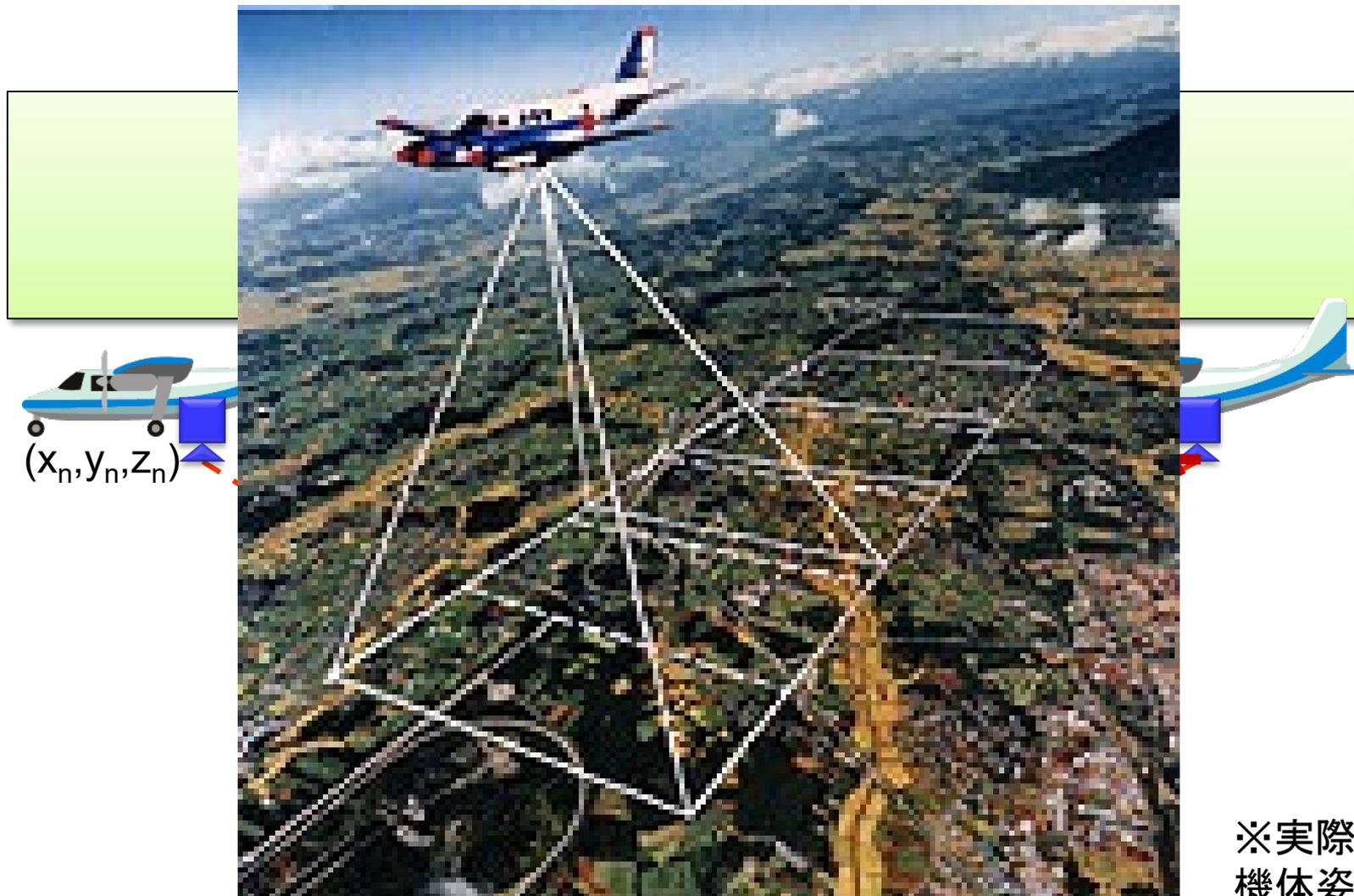
Structure from Motion : SfM

に着目

- 様々な視点から撮影された画像等から、3次元構造を復元する手法(多視点画像解析)
 - ☺ 近年では、UAV(ドローン等)の普及により注目

SfM(Structure from Motion) ー基本原理

■ 空中写真の場合のイメージ



※実際は位置と機体姿勢を併せて計算

• 3次元化の例：点群データでの表示例（熊本地震）

- 元の写真の画素色（RGB）をつけた点群データ
- SfMソフトPix4Dmapperで処理



・ 益城町市街地（本震後）での被害状況の復元

変化率DH 25%以上

高さの変化率 $DH=(H1-H2)/H1$

H1=被災前の建築物ポリゴンの階数情報×平均階高

H2=建築物ポリゴンに含まれる点群高さの中央値-建築物ポリゴン近傍の地盤面の点群高さの5%ile 値

– 2016年4月16日11時頃撮影の画像（36枚）を使用して
作成

被災前の建物高さを階数×用途別平均階高で算出していることから、用途によっては被害があったことになっている事例もある

- 応急危険度判定との比較

- 正解率は概ね**7割**

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 (調査済み: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%

- 処理時間は、今回の試作箇所**で約17分程度**

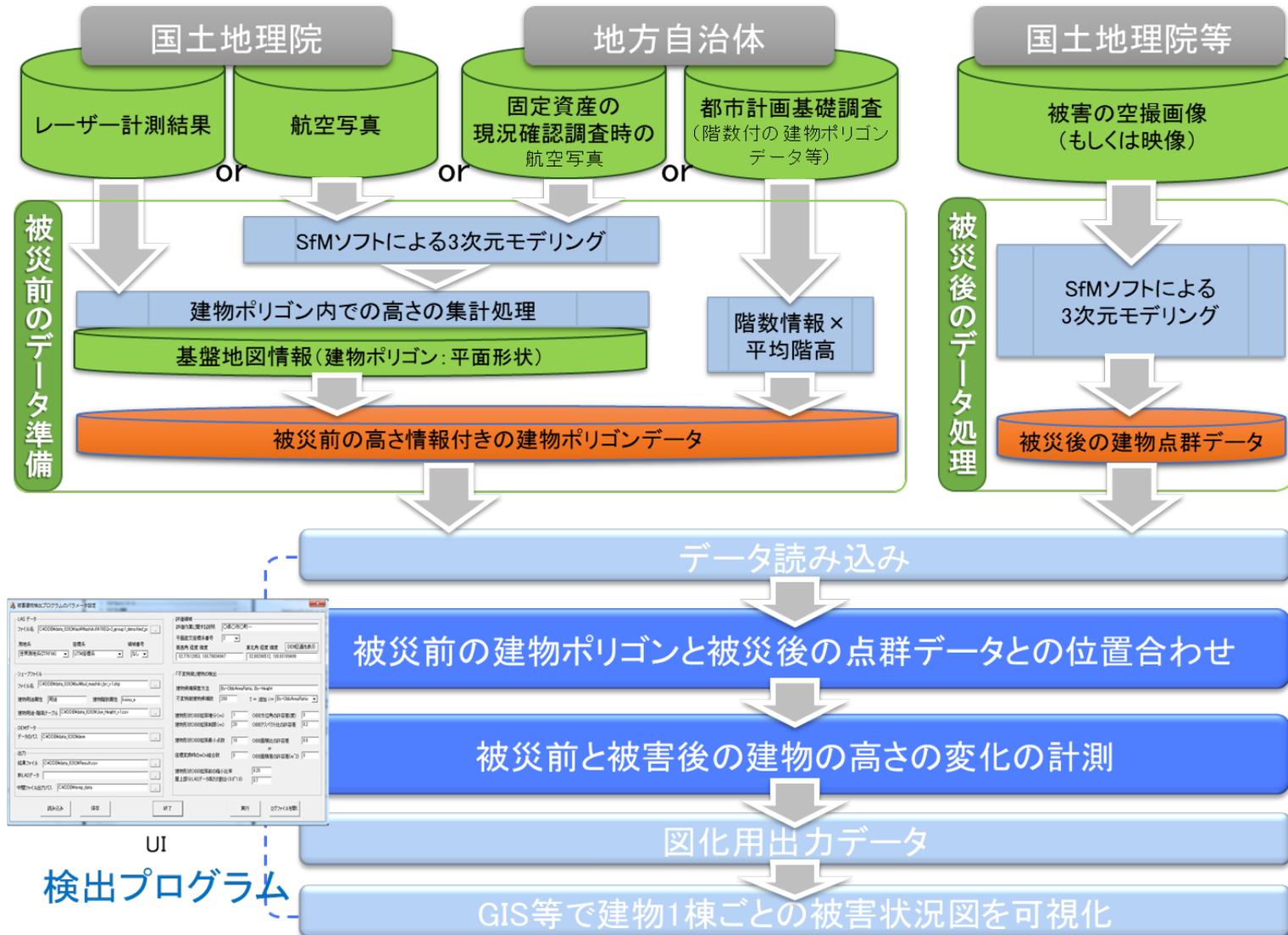
- “迅速さ”という観点からは**実用時間内に収まっている**

- 本震後約12時間程度経過した段階でのブルーシートがかかっている建物の推定
 - 547箇所／6573棟(約8%)
 - 航空写真から目視で探索したブルーシートがかかった建物はほぼ網羅

RGB=0:191:255 diff=25

- 問題点:色設定の微妙な違いで結果が異なる

自動処理化へ



現段階の到達点

- 発災直後の市街地の被害状況を撮影した空撮画像等からSfMを活用して迅速に建築物被害図を作成する方法についての報告
 - 正解率約7割, 処理時間14分程度 ⇒場面によっては, 有用か
- 現段階
 - クラウド上に実装し, 画像が入力されれば, ほぼ自動処理が可能
 - 被災前の3次元建物データの整備(首都圏は概成)

まとめ

横からも上からも＝新しい展開へ

観測・調査タイミング＝リードタイム

発災

1日

2日

10日

衛星SAR

建物被害が発生しているエリアを
広域的に把握

帰日数: 12日

帰日数: 14日以下
緊急観測モードの場合

被害発生エリアの
漏れがないかの確認

可視光衛星

解析エリアは限定される

帰日数: 1日以下
(夜間でないこと, 天候が悪くないこと)

航空機
(航空写真)

撮影や調査の実施が
されない場合もある

~2日程度

応急危険度
判定

調査開始のタイミングの幅: 最大4日

2.13福島宮城地震でのリードタイム

SAR

Sentinel-1: 発災後の観測が、21日深夜
(日本時間22日早朝)に実施

Sentinel-1日本付近観測スケジュール

可視光

14日10時30分頃にWorldview-3が日本域の撮影を実施

航空機

垂直写真の撮影は無し

解析結果の相互補完(ハイブリッド運用)

SAR解析

3Dモデリング解析

「発災前との変化率」を「被害の発生エリア」と見なしている。
⇒「率が大きい」=「被害が大きい」までは言えるが、全壊・半壊等の区分は出来ない

可視光解析

応急危険度判定

個別建物の被害を全壊・半壊・無被害といった区分けをしている

被害小

被害大

被害度合いのグラデーション

無被害

半壊

全壊

被害のグレーディング

可視光衛星画像から出てくる個別建物被害のグレーディングを使って、SARから出てくる被害度合いの計算式を更新することで、SARの被害度合いから被害のグレーディングができるようになる。

社会実装に向けた視点

- 災害時
 - システム運用体制, 費用, 役割分担
 - リードタイムの不安定性をカバーする技術開発
 - 人材育成
- 平時利用の推進
 - 衛星SARは衛星によっては常時観測が可能なので, 市街地の変化を捉えるのに有効か

ご清聴ありがとうございました

Special Thanks to



戦略的イノベーション創造プログラム

衛星からの解析技術開発は「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」（2018～2022年度）」の一環として実施しています。



マルチプラットフォーム版応急危険度判定支援ツールは、ESRIジャパンが開発しています（建築研究所は技術協力）。

その他、プログラム開発等にご尽力いただいた企業の皆様