



Tokyo Tech

InSARによる都市地震被害の把握

SARカンファレンス2019, 2019/7/25

東京工業大学 環境・社会理工学院

松岡昌志

賀川健人, カリムザデ サドラ

被害建物におけるSAR画像の特徴

マイクロ波の反射（後方散乱強度）

建物 > 被害を受けた建物や空地

後方散乱強度の差分（地震後－地震前）

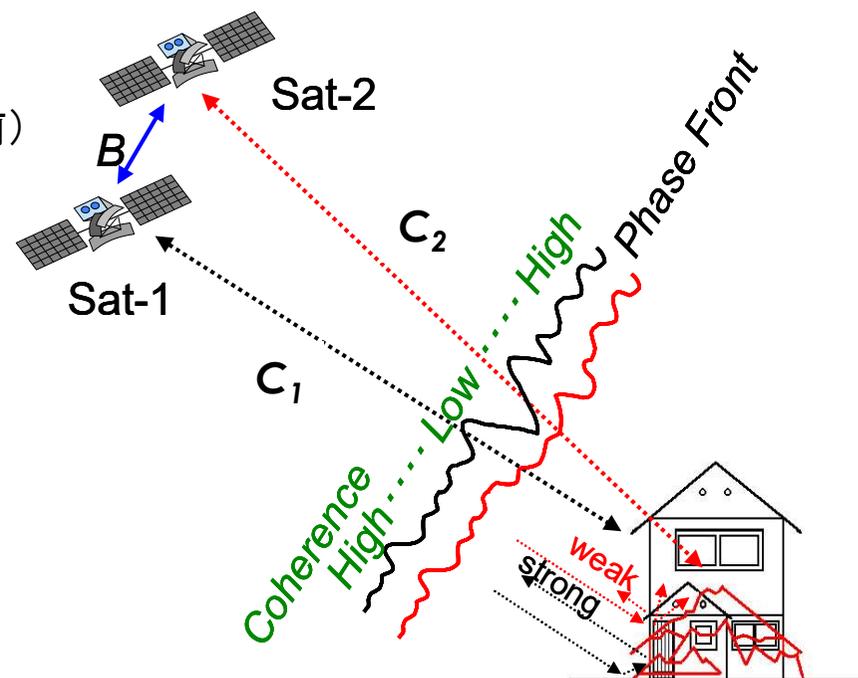
被害 < 無被害

後方散乱強度の相関

被害 < 無被害

コヒーレンス（位相の干渉性）

被害 < 無被害



被害/無被害建物の後方散乱特性

SAR画像と建物被害に関する研究

- 黎明期 -

- 米澤・竹内：ERS-1/SAR強度画像を用いた兵庫県南部地震による建造物被害地域の抽出，写真測量とリモートセンシング，Vo.37, No.4, 57-61, 1998. (強度相関，時系列)
- 松岡・山崎：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, 55-61, 2001. (強度差分，強度相関，被害データ)
- Yonezawa and Takeuchi: Decorrelation of SAR data by urban damages caused by the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, Int. J. Remote Sensing, Vol.22, No.8, 1585-1600, 2001. (強度相関，時系列，コヒーレンス)
- 伊藤・細川：干渉SARデータを用いた地震被害度推定モデル，電気学会論文C, Vol.122, No.4, 617-623, 2002. (コヒーレンス，時系列，被害データ)
- Matsuoka and Yamazaki: Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, Earthquake Spectra, Vol.20, No.3, 975-994, 2004. (強度差分，強度相関，被害データ)
-
-

SAR画像による被害抽出手法の特徴

- 黎明期 -

- 強度相関（ベースライン長や観測間隔にそれほど依存しない，変化抽出の感度は低い）
- コヒーレンス（変化抽出の感度が高い，ベースライン長や観測間隔に依存する）
- 時系列処理（季節変動等で変化している地域をマスクして被害による変化を抽出，ベースライン長による影響を軽減）

人工衛星の軌道制御の高精度化により，ベースライン長が短くなり干渉性が向上 → コヒーレンス利用が実用的に

Simon Plank: Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR – A comprehensive review and outlook to Sentinel-1, Vol.6, No.6, 4870-4906, 2014.

- 成長期 -

多偏波，機械学習，……

強度相関とコヒーレンス

強度相関

$$r = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2 \rangle \langle I_2^2 \rangle}} \quad r = \frac{Cov(I_1 I_2)}{\sqrt{Var(I_1) Var(I_2)}}$$

コヒーレンス

$$\gamma = \frac{|\langle C_1 C_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle C_1 C_1^* \rangle \langle C_2 C_2^* \rangle}} \quad \leftarrow \text{位相差分の情報が含まれる}$$

I_1 : マスター画像の画素値(強度)

I_2 : スレーブ画像の画素値(強度)

$Var()$: 分散

$Cov()$: 共分散

c_1 : マスター画像の画素値(複素数)

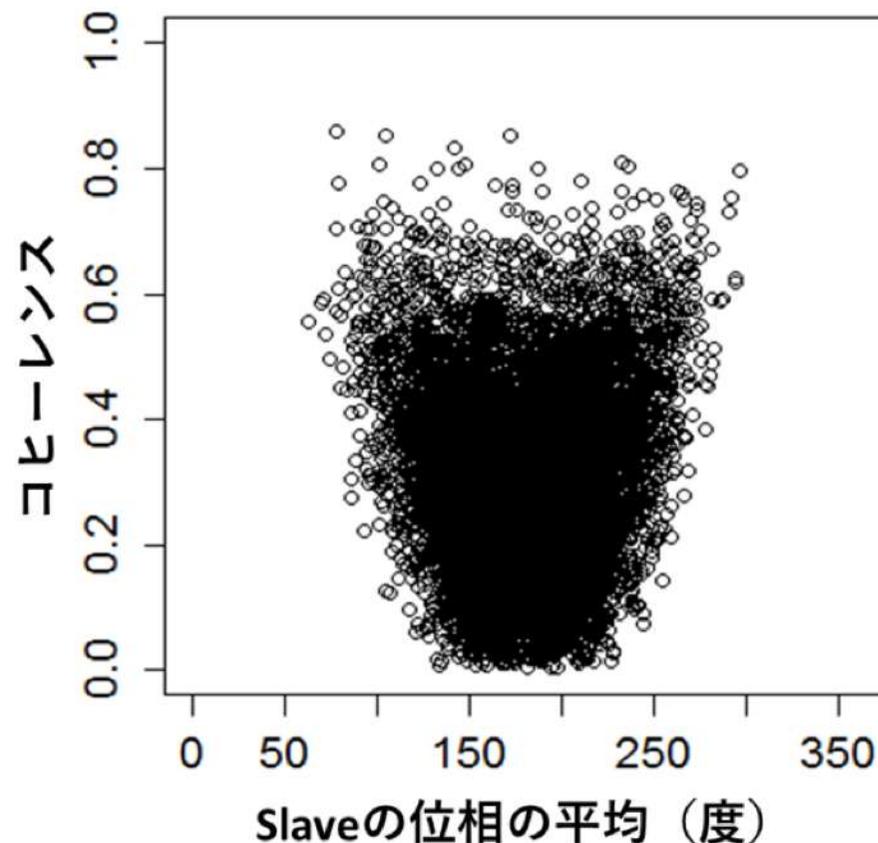
c_2 : スレーブ画像の画素値(複素数)

*: 複素共役

$\langle \rangle$: 局所領域内の期待値

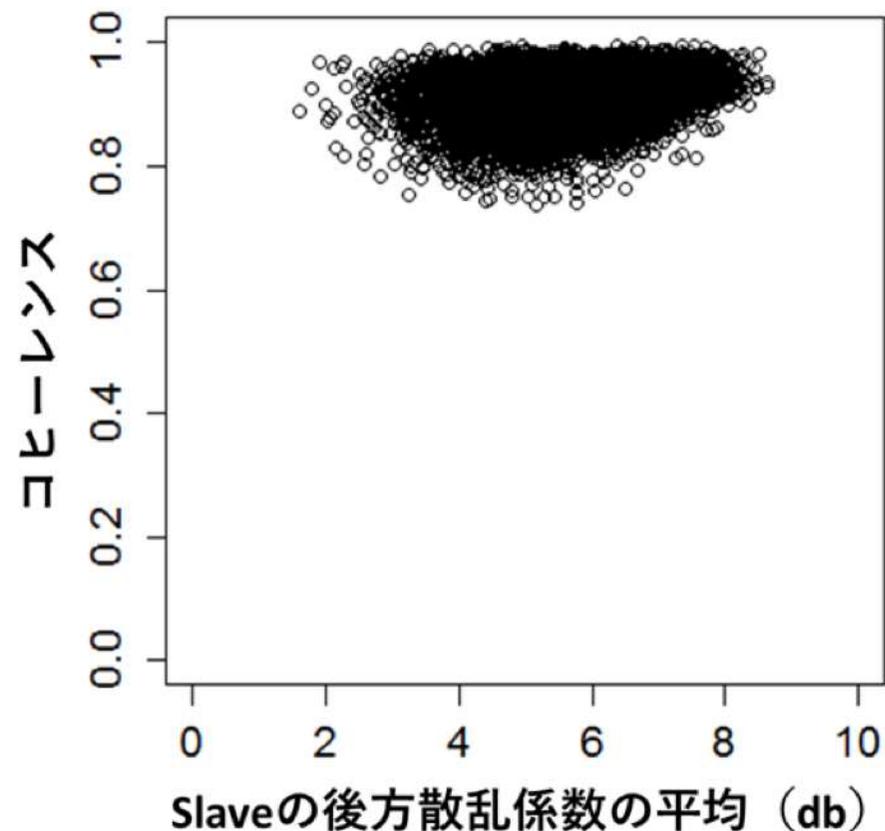
位相の変化がコヒーレンスに与える影響

- 2つの 3×3 ピクセルの配列を1回目の観測と2回目の観測で得られたSAR画像と考え、それぞれをMaster画像、Slave画像として両者の各ピクセルに任意の振幅と位相を与える。
- 振幅を変化させずに位相のみが変化した場合を考える。Masterの各ピクセルの位相を 0° とし、Slaveの各ピクセルの位相を $0^\circ \sim 360^\circ$ の間になるようにランダムに変化させる。その際、MasterとSlaveのすべてのピクセルの振幅（後方散乱係数）は10 dBに統一する。コヒーレンス計算は10,000回実施。



振幅（強度）の変化がコヒーレンスに与える影響

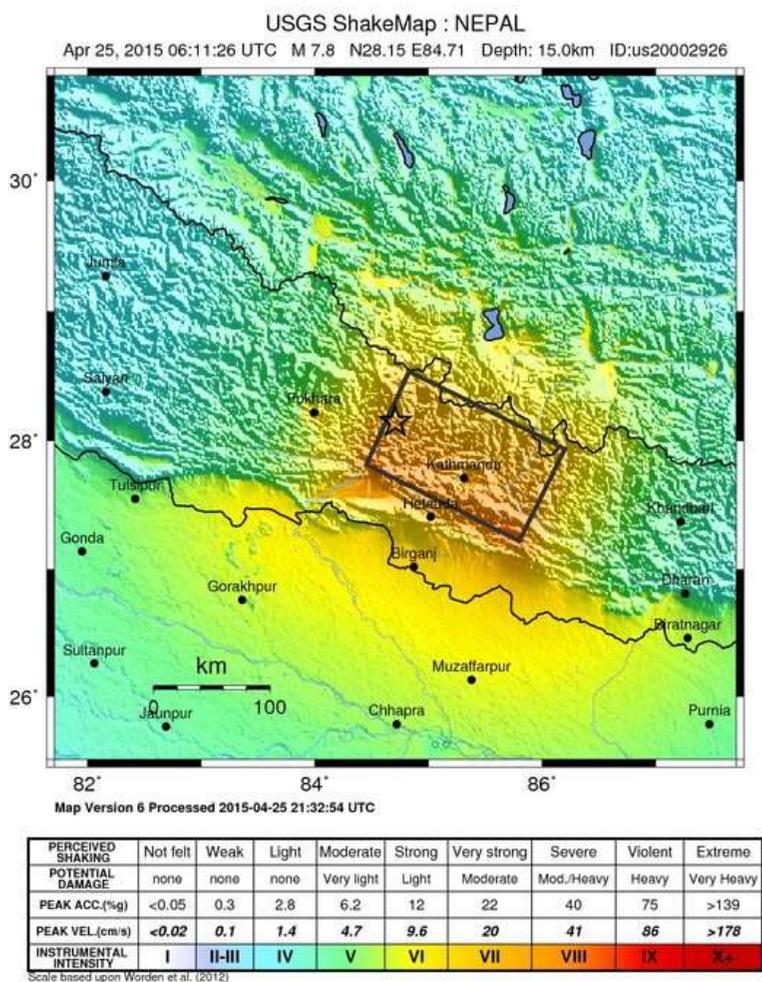
- 2つの3×3ピクセルの配列を1回目の観測と2回目の観測で得られたSAR画像と考え、それぞれをMaster画像、Slave画像として両者の各ピクセルに任意の振幅と位相を与える。
- 位相を変化させずに振幅のみが変化した場合を考える。Masterのすべてのピクセルの振幅（後方散乱係数）を10 dBになるように固定し、Slaveの各ピクセルの振幅（後方散乱係数）を0～10 dBの間になるようにランダムに変化させる。その際、MasterとSlaveの位相をすべてのピクセルにおいて 0° に統一する。コヒーレンス計算は10,000回実施。



2015年ネパール・ゴルカ地震

2015/4/25, M7.8, 震源深さ15km
 死者・行方不明者 > 8,964

PALSAR-2による観測
 2014/10/04, 2015/02/21, 2015/05/02

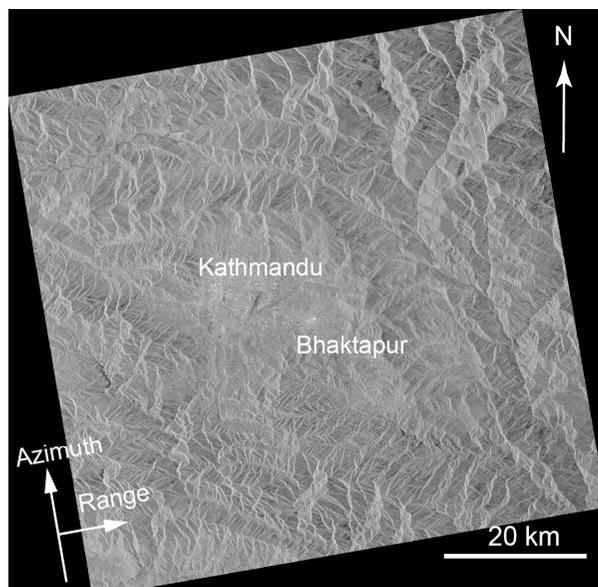


(USGS 2015)

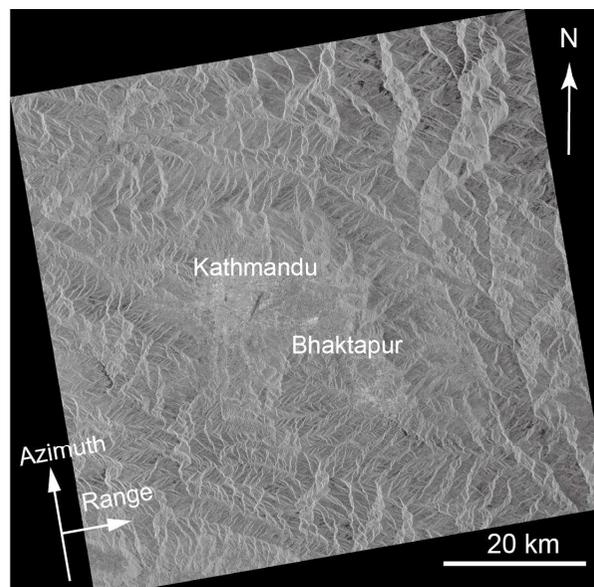


ALOS-2 PALSAR-2画像

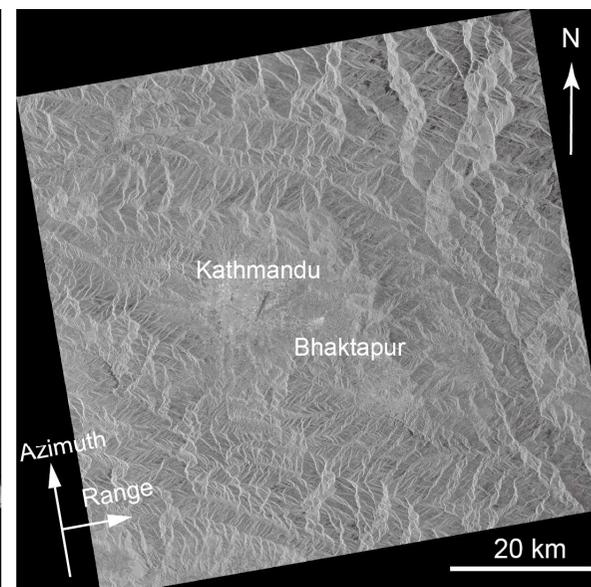
昇降軌道，右側観測，HH + HV 偏波
オフナディア角: 36.3° ピクセル分解能: 6.25m



地震前: 2014/10/04



地震前: 2015/02/21

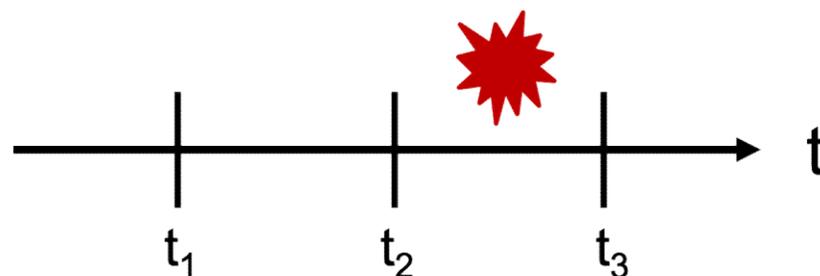


地震後: 2015/05/202

被害(変化)抽出手法

2つの方法

- ✓ 地震前のペアと地震前後のペアのそれぞれの強度相関の差分を使う [1]
- ✓ 地震前のペアと地震前後のペアのそれぞれのコヒーレンス比を使う [2][3]



[1] M. Matsuoka: Use of ALOS/PALSAR imagery for monitoring areas damaged due to recent natural disasters, Disaster Forewarning Diagnostic Methods and Management, Proc. of SPIE, Vol.6412, ID641204, 7p., 2006.11.

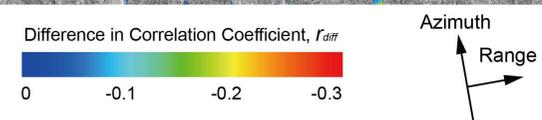
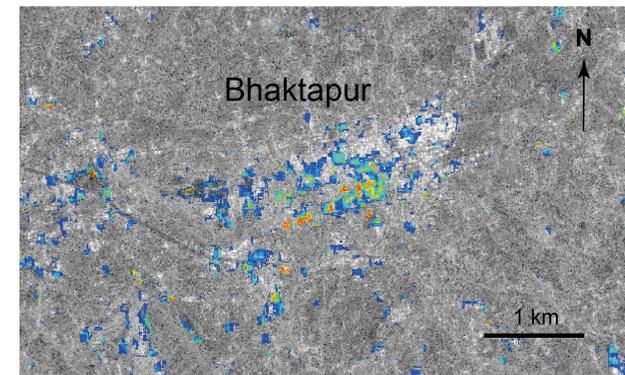
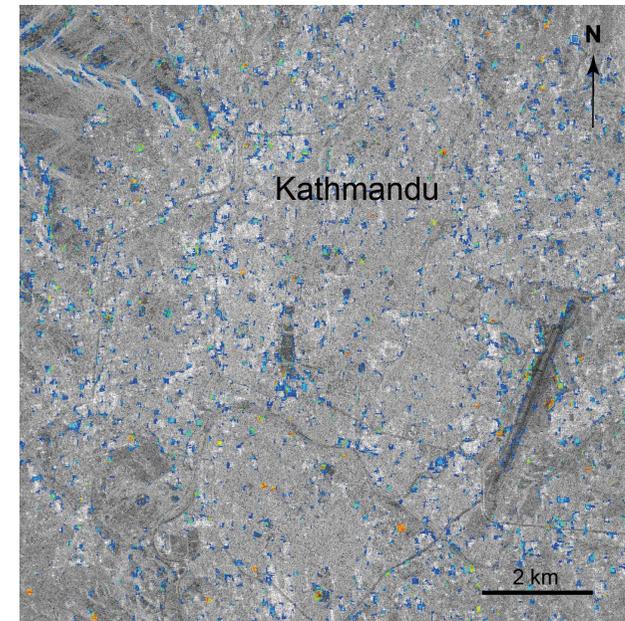
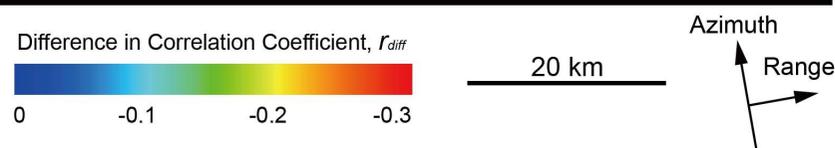
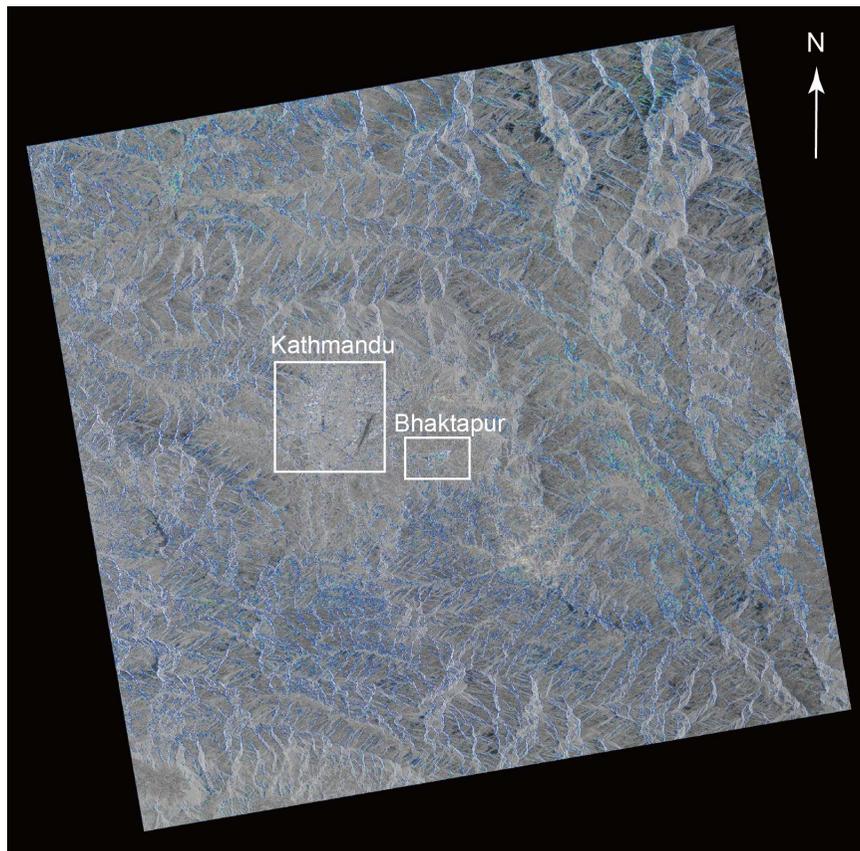
[2] 伊藤陽介, 細川直史: 干渉SARデータを用いた地震被害度推定モデル, 電気学会論文C, Vol.122, No.4, pp.617-623, 2002.

[3] Y. Ito, M. Hosokawa, M. Matsuoka: A degree estimation model of earthquake damage using temporal coherence ratio, Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Vol.4, pp.2410-2412, 2003.7.

計算の流れ - 強度相関の差分 -

- 地震前2時期, 地震後1時期の強度画像にスペックルノイズ低減フィルタ (Leeフィルタ) を施す。 (21 x 21 ピクセルウィンドウ)
- 地震前ペアおよび地震前後ペアからそれぞれ相関係数 r (r_{bb} , r_{ab}) を計算する。 (13 x 13 ピクセルウィンドウ)。
- 相関係数の差分 r_{diff} ($= r_{ab} - r_{bb}$) を算出。なお, r_{bb} が0.7以下の地域はマスクする。 (季節等による変化が小さい地域を計算対象にする)
- r_{diff} の値が小さいほど地表の変化が大きい。 (被害の可能性が高い)

被害(変化)抽出結果 - 強度相関の差分 -



計算の流れ - コヒーレンス比 -

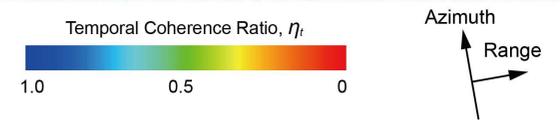
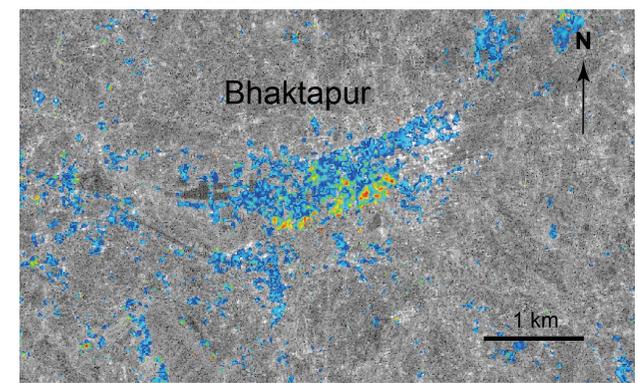
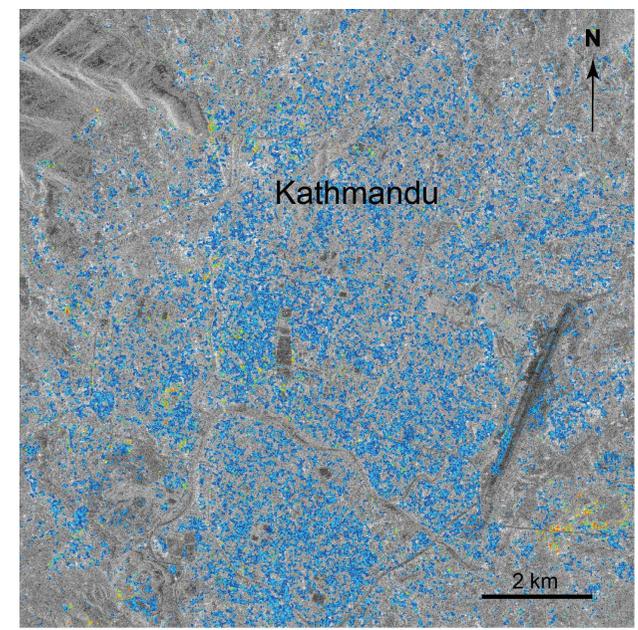
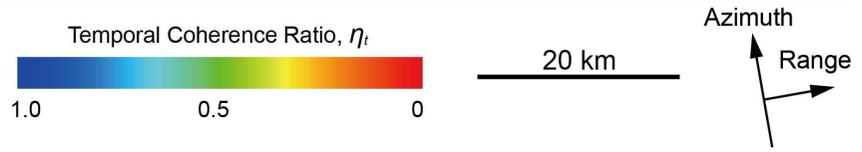
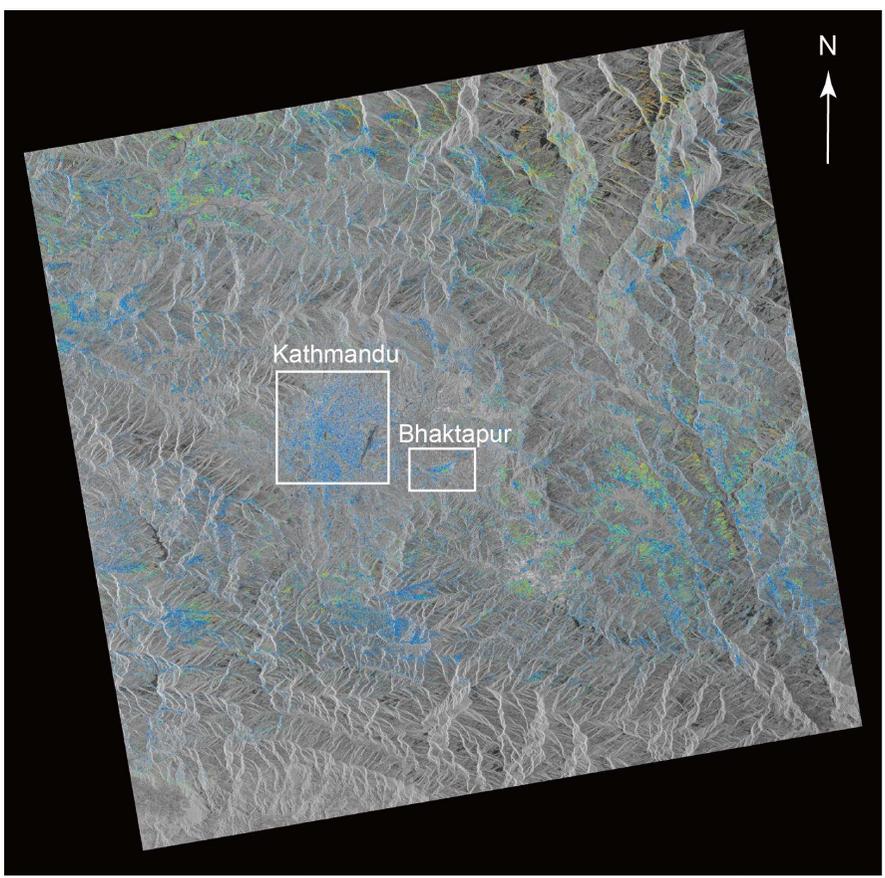
- 地震前2時期，地震後1時期のSLC画像を用意して，地震前ペアおよび地震前後ペアからそれぞれコヒーレンス Y (Y_{bb}, Y_{ab}) を計算する。（アジマス $6 \times$ レンジ 3 ピクセルウィンドウ）
- 地震前ペアおよび地震前後ペアに対して，センサの仕様およびベースライン長から理論的なコヒーレンス (ρ_{bb}, ρ_{ab}) を計算する。
- 以下の式よりコヒーレンス比を算出。

$$\eta_t = (Y_{ab} / Y_{bb})(\rho_{bb} / \rho_{ab})$$

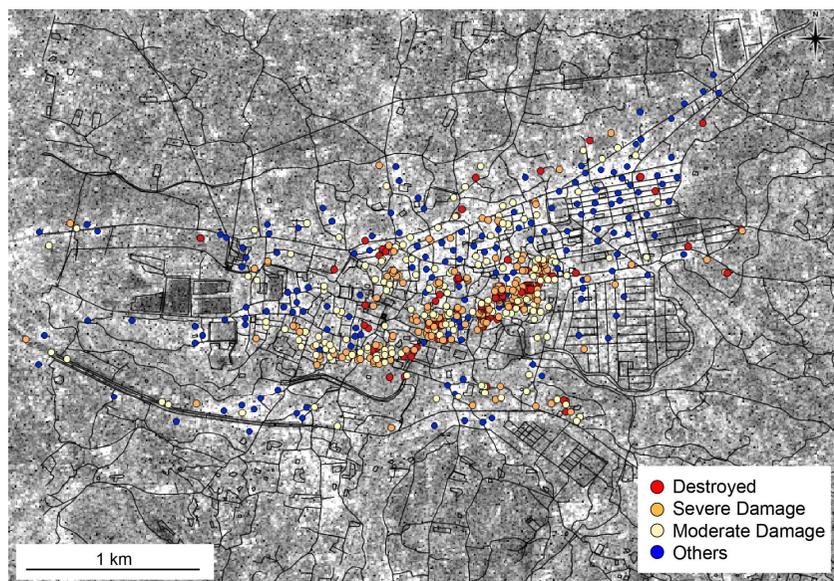
なお， Y_{bb} が閾値より大きい地域を対象にする。（このデータセットの場合には0.41）

- η_t の値が小さいほど地表の変化が大きい。（被害の可能性が高い）

被害(変化)抽出結果 - コヒーレンス比 -

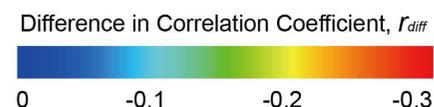
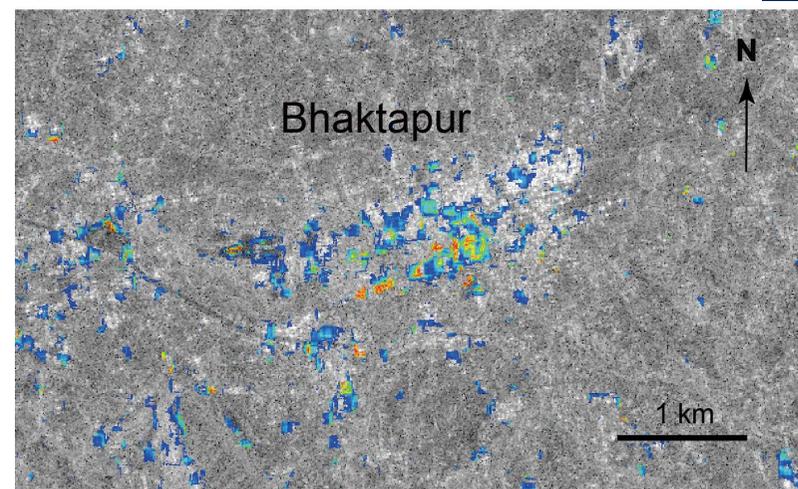


UNOSATとの比較

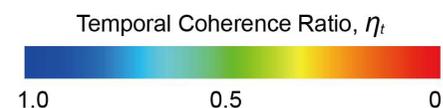
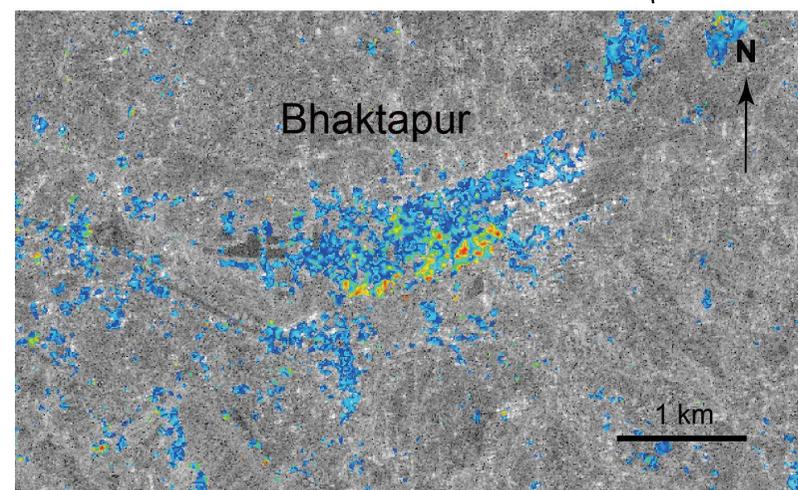


光学衛星画像からの目視判読により
(Destroyed, severe and moderate) の被害建物を抽出
(UNOSAT)

軽微あるいは無被害 (Others) は建
物域からランダムに抽出

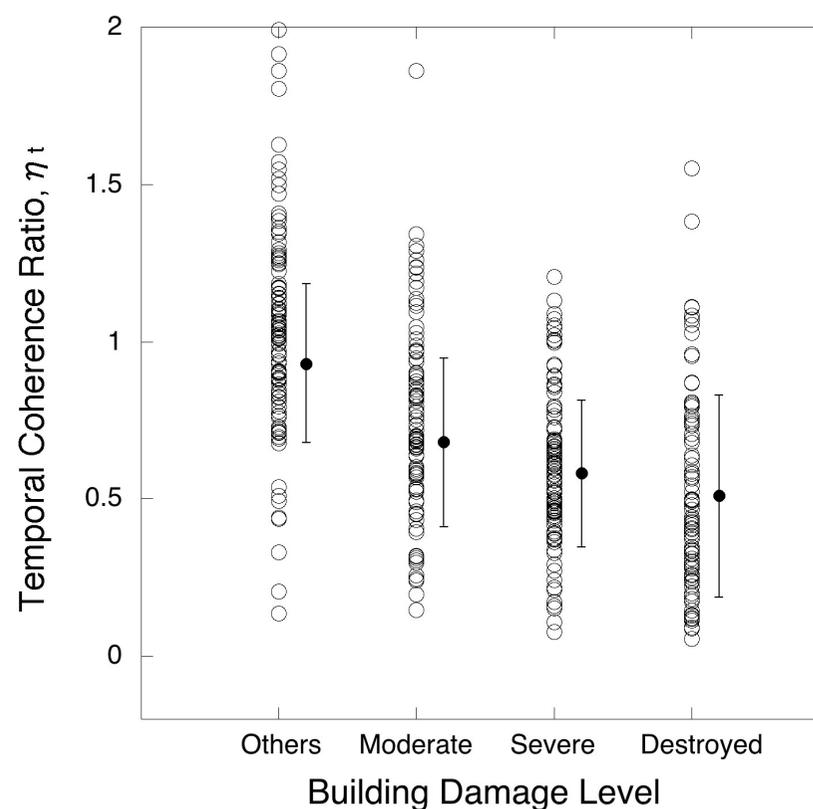
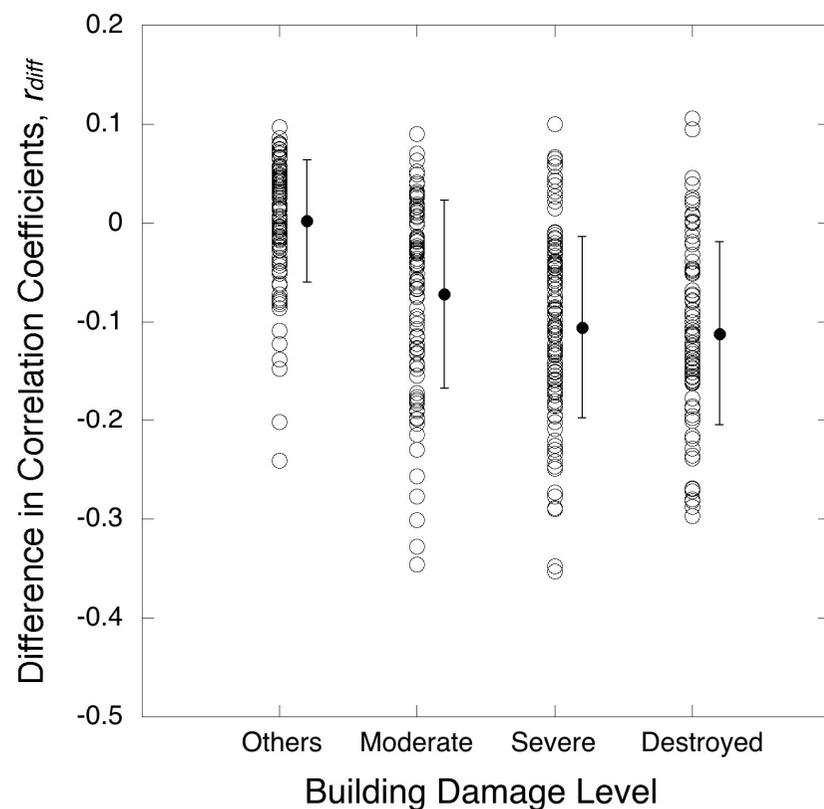


Azimuth
Range



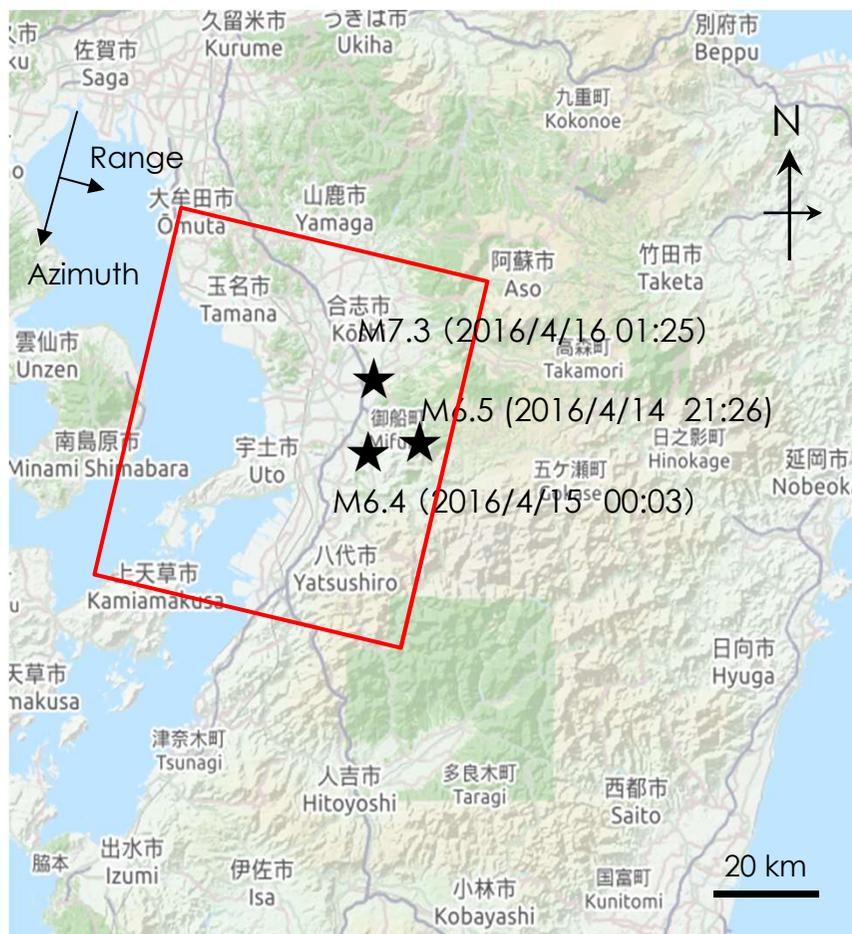
Azimuth
Range

被害程度 VS 強度相関の差分, コヒーレンス比

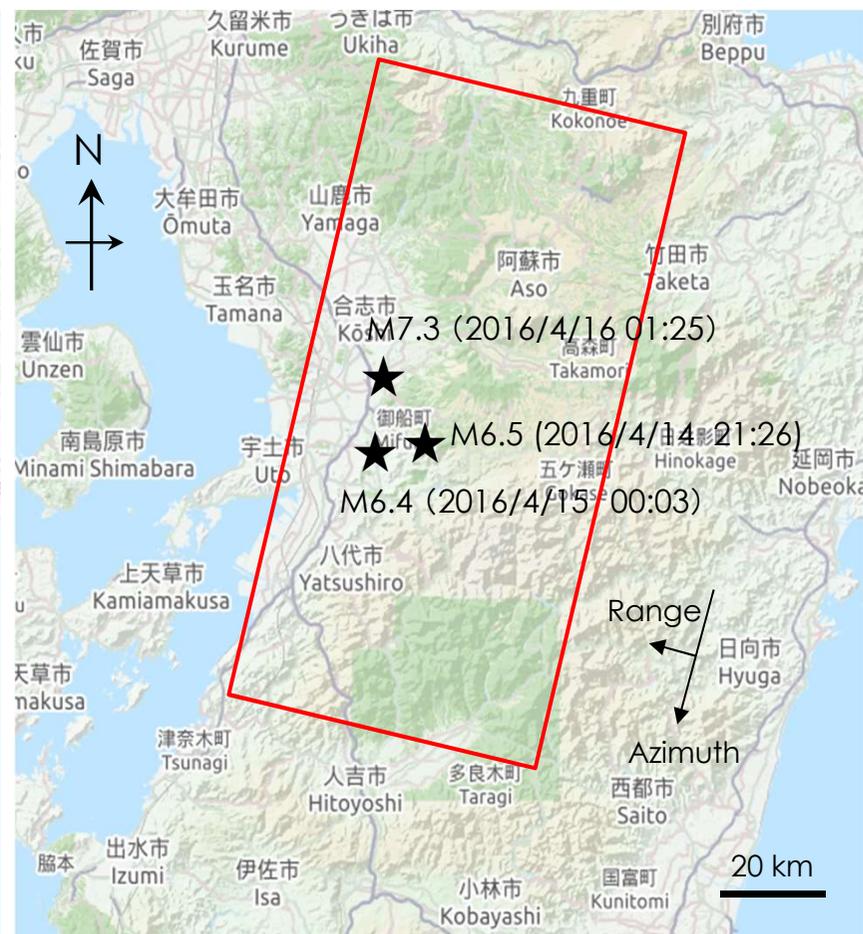


被害程度が大きいくほど, r_{diff} , η_t の値は小さくなる傾向がある。

2016年熊本地震



ペア①



ペア②

PALSAR-2データセット

高分解能モード，HH偏波，Lバンド（波長：約23.6cm），
 回帰日数：14日，ピクセル分解能：5m

- ペア① 地震の前後

ディセンディング，左照射，オフナディア角：37.9度

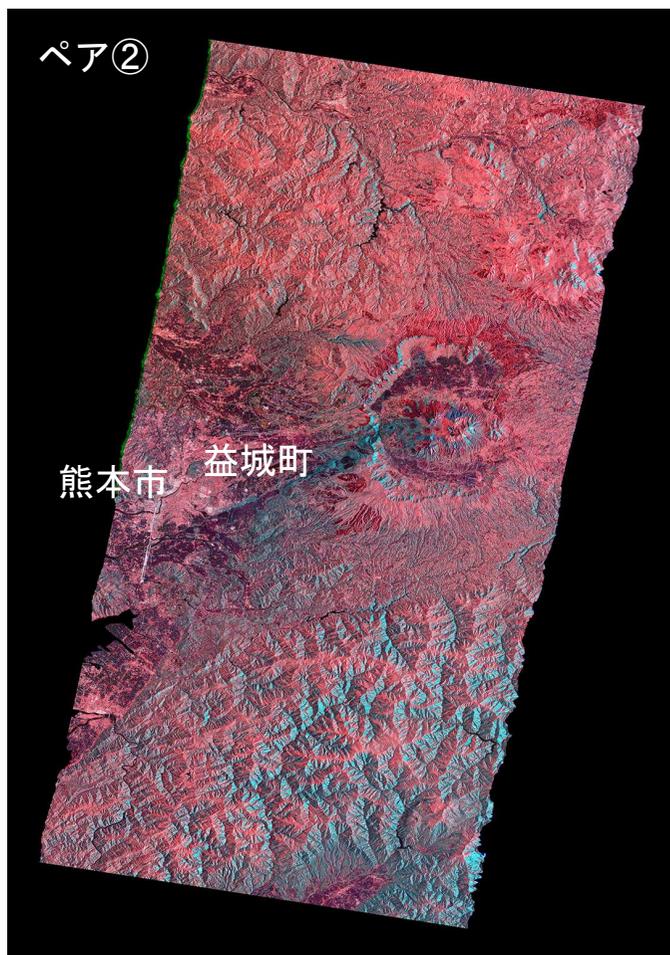
- 2015年01月14日
 - 2016年04月20日
- 基線長：22.6m
 日数間隔：462日

- ペア② 地震の前後

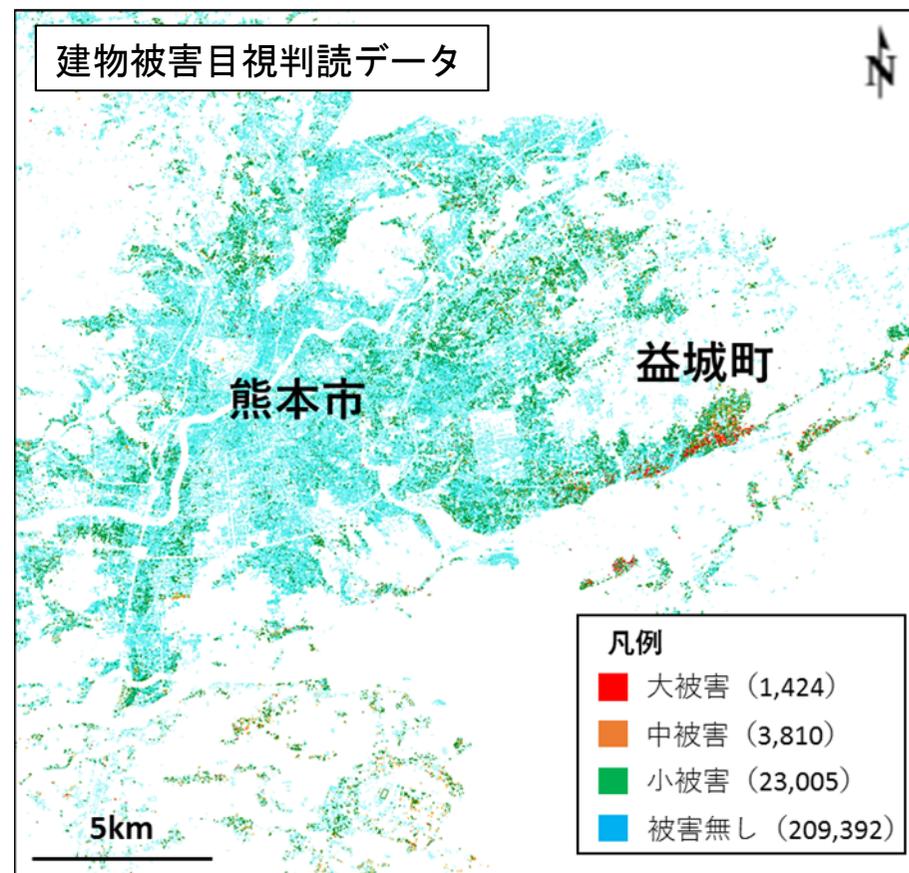
ディセンディング，右照射，オフナディア角：32.8度

- 2016年03月07日
 - 2016年04月18日
- 基線長：123.5m
 日数間隔：42日

SAR画像と建物被害データ



コヒーレンス (R) : 0.022~0.79
 後方散乱係数 (G, B) : -17.3~8.3 dB
 G: 地震前, B: 地震後

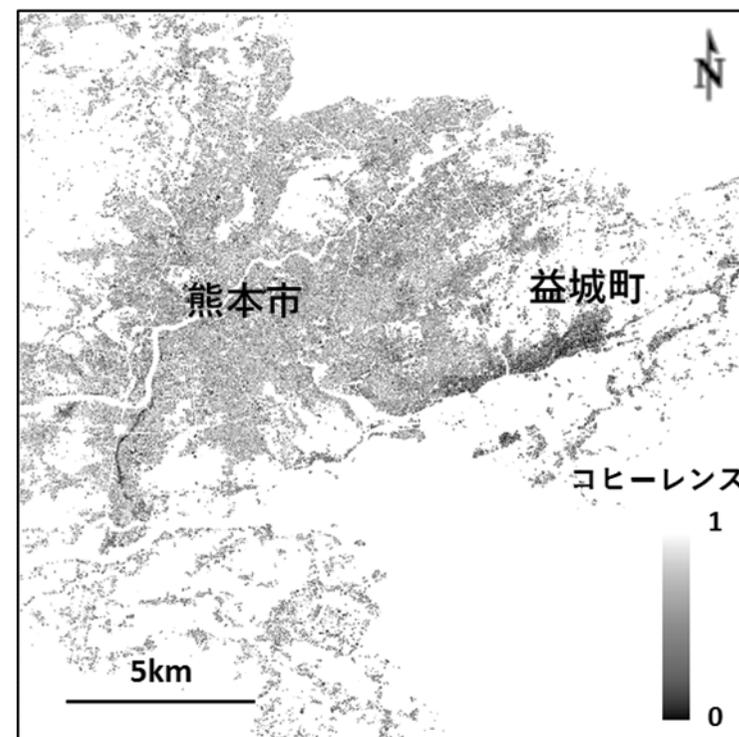
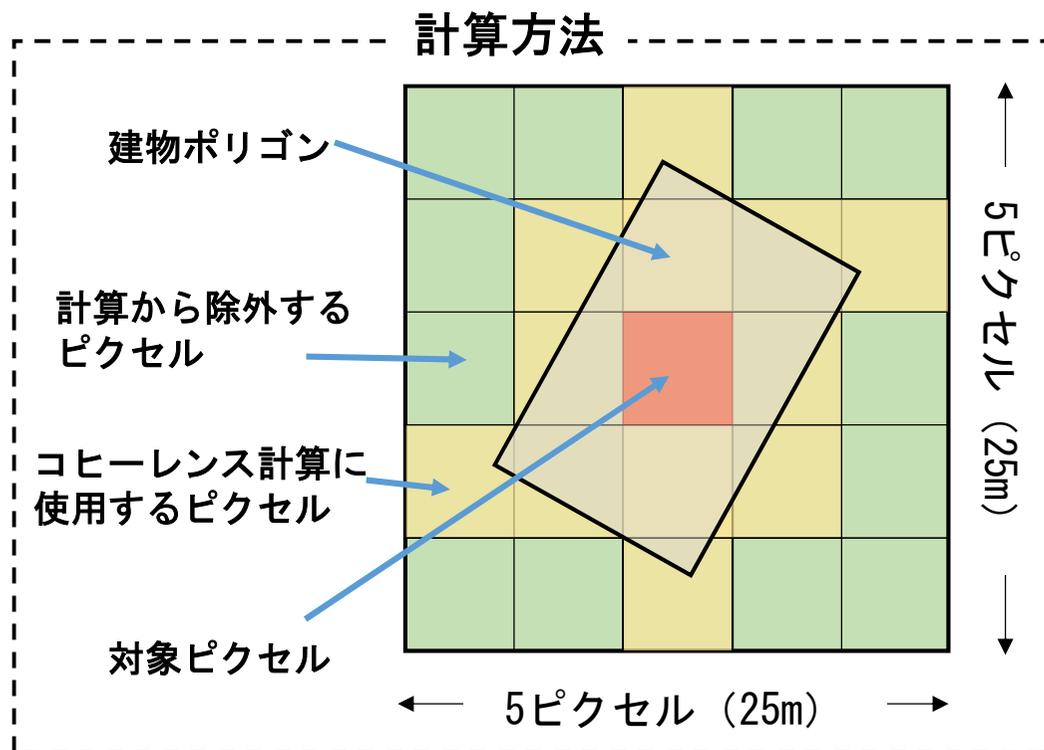


本震後の航空写真, 高分解能衛星画像
 より目視判読した建物被害
 (株式会社パスコ)

コヒーレンス（建物領域）

建物被害とコヒーレンスの関係を詳細に検討するために、建物被害データを使ってSAR画像から建物領域を抽出し、コヒーレンスを再計算

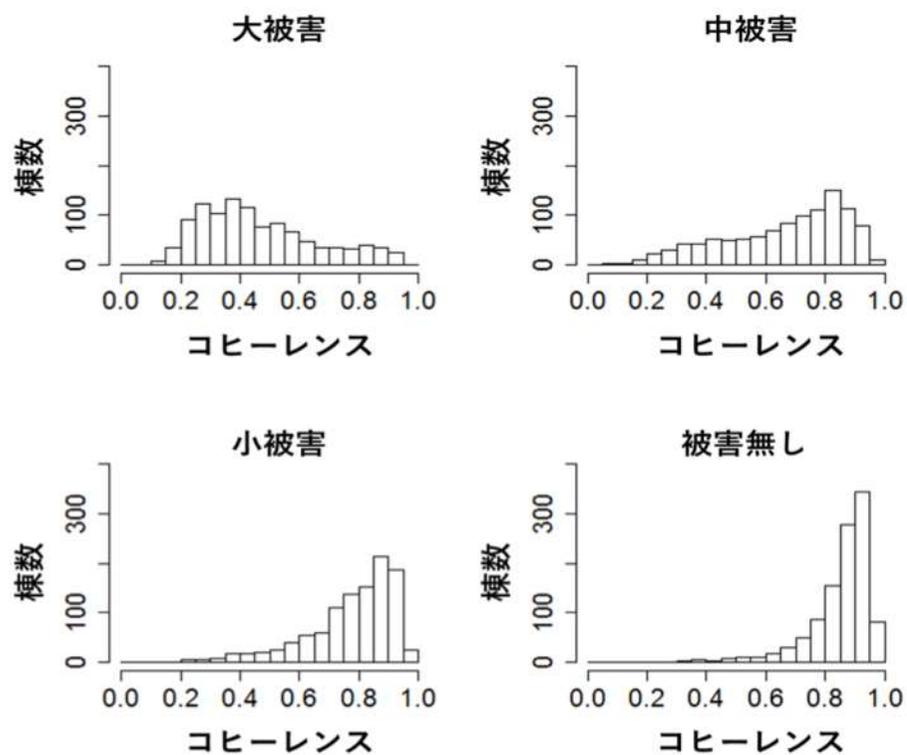
↓
建物コヒーレンス



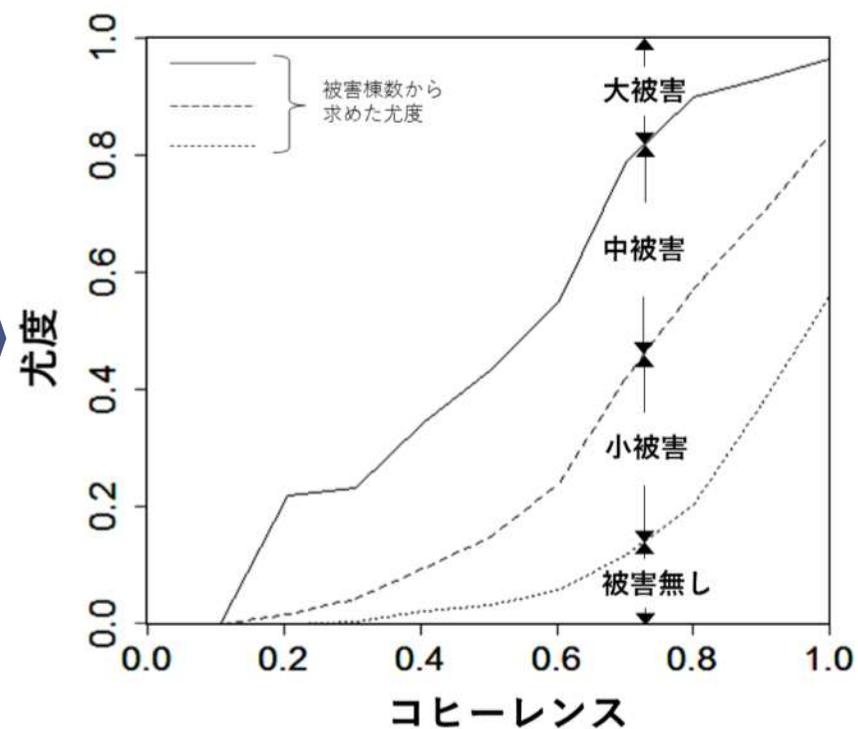
建物コヒーレンスの分布

被害推定モデル

- ・ 各被害レベルの棟数を抽出
- ・ 抽出した建物コヒーレンスの頻度分布から各被害レベル間で有意差を確認
- ・ 建物コヒーレンスごとの建物棟数割合から尤度を求めてモデルを作成

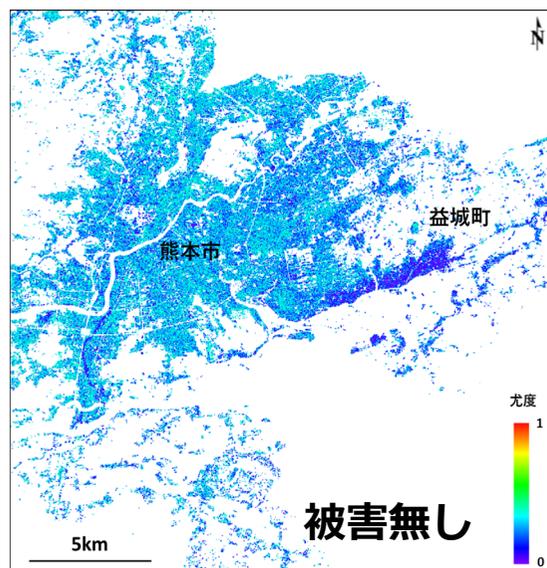
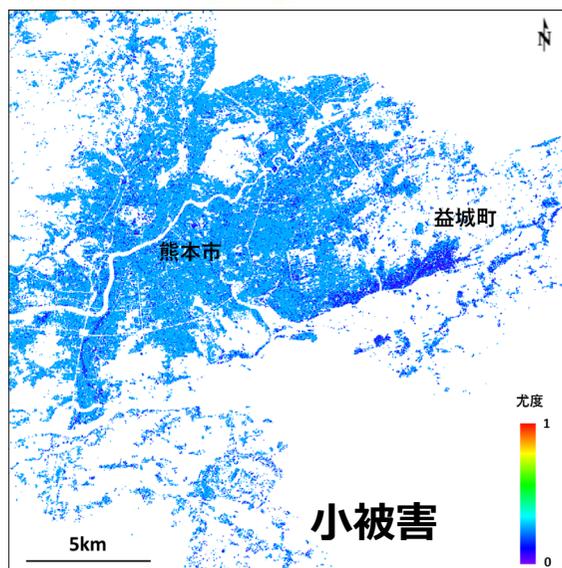
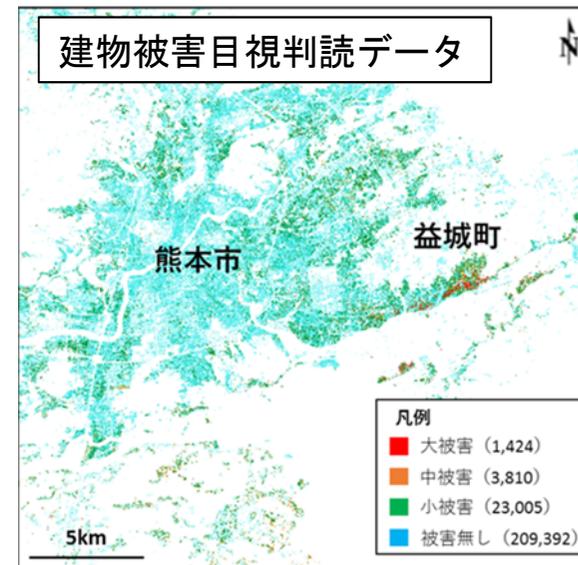
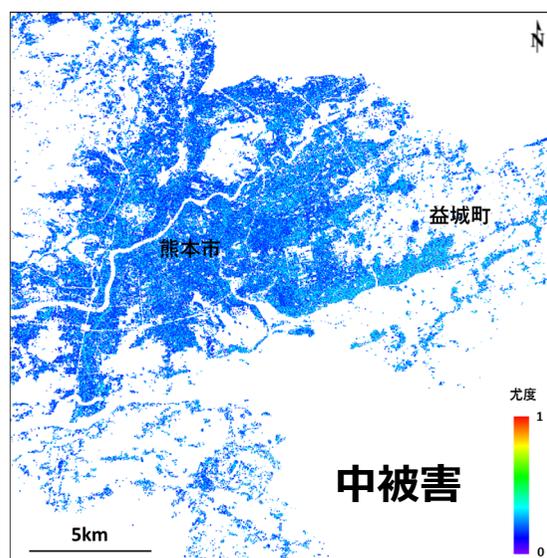
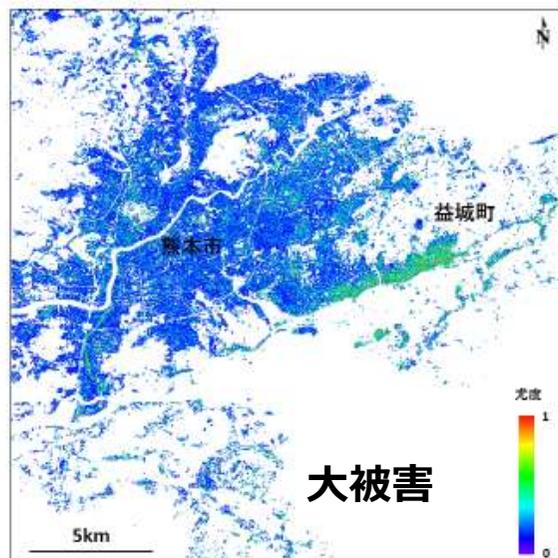


コヒーレンスの頻度分布
(無作為に被害ごとに1,083棟を抽出)



建物被害の尤度関数

建物被害推定



建物被害データは航空写真等による目視判読なので主に建物上部の揺れによる損傷被害

一方、コヒーレンスは地盤変状や建物基礎の被害なども含むのでは？

液状化の帯

熊本市南区近見・刈草・川尻



鹿児島街道に沿って大量の噴砂が見られ、両側の住宅や店舗が著しく傾斜

緑マーク：噴砂確認撮影地点
 黄マーク：Google Earth画像（2016/4/15）判読

朝日新聞(5/4)

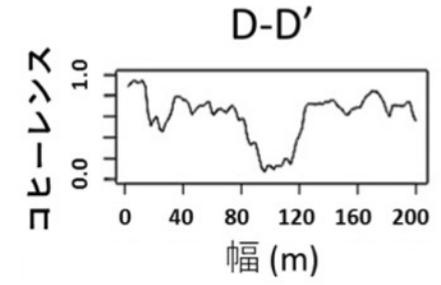
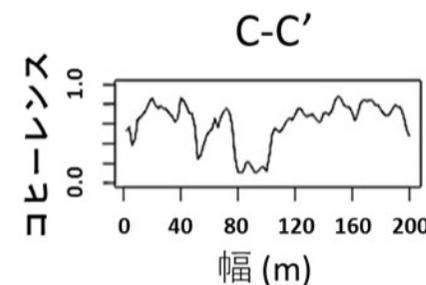
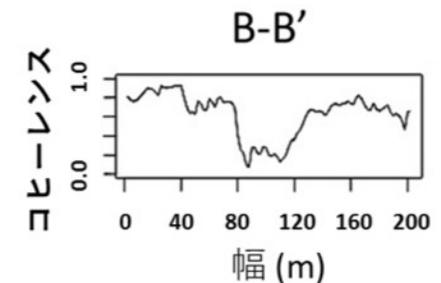
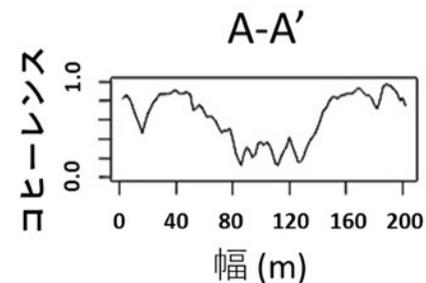
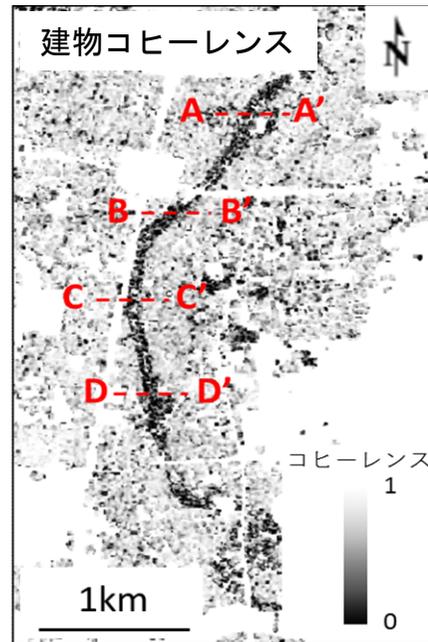
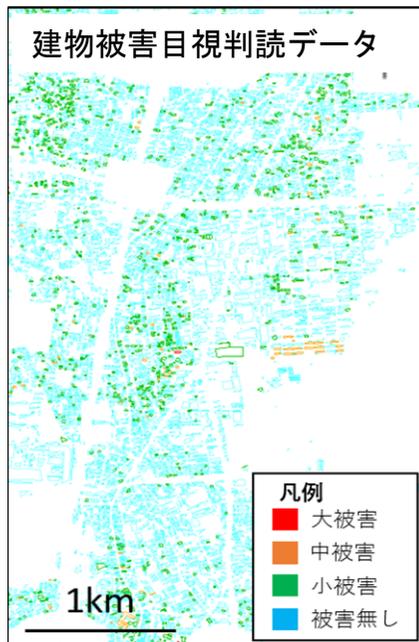
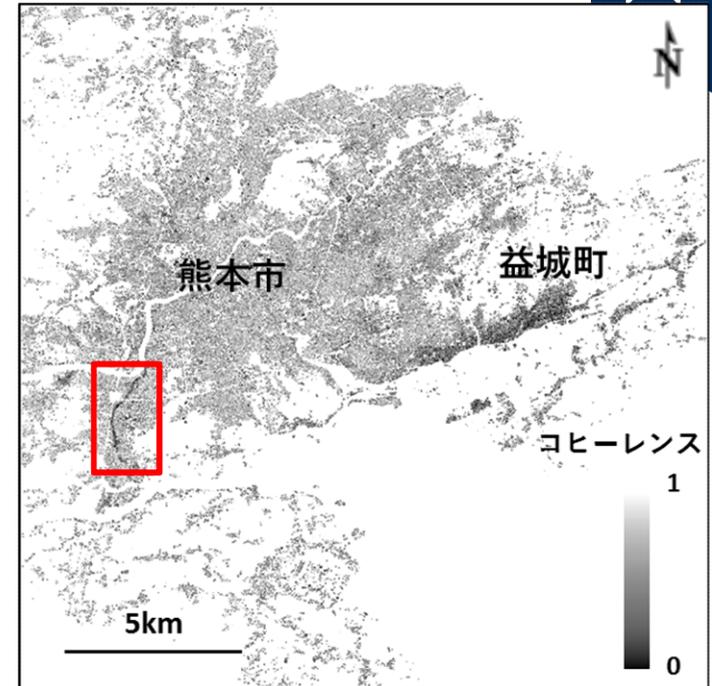


若松(関東学院), 先名・小澤(防災科研)



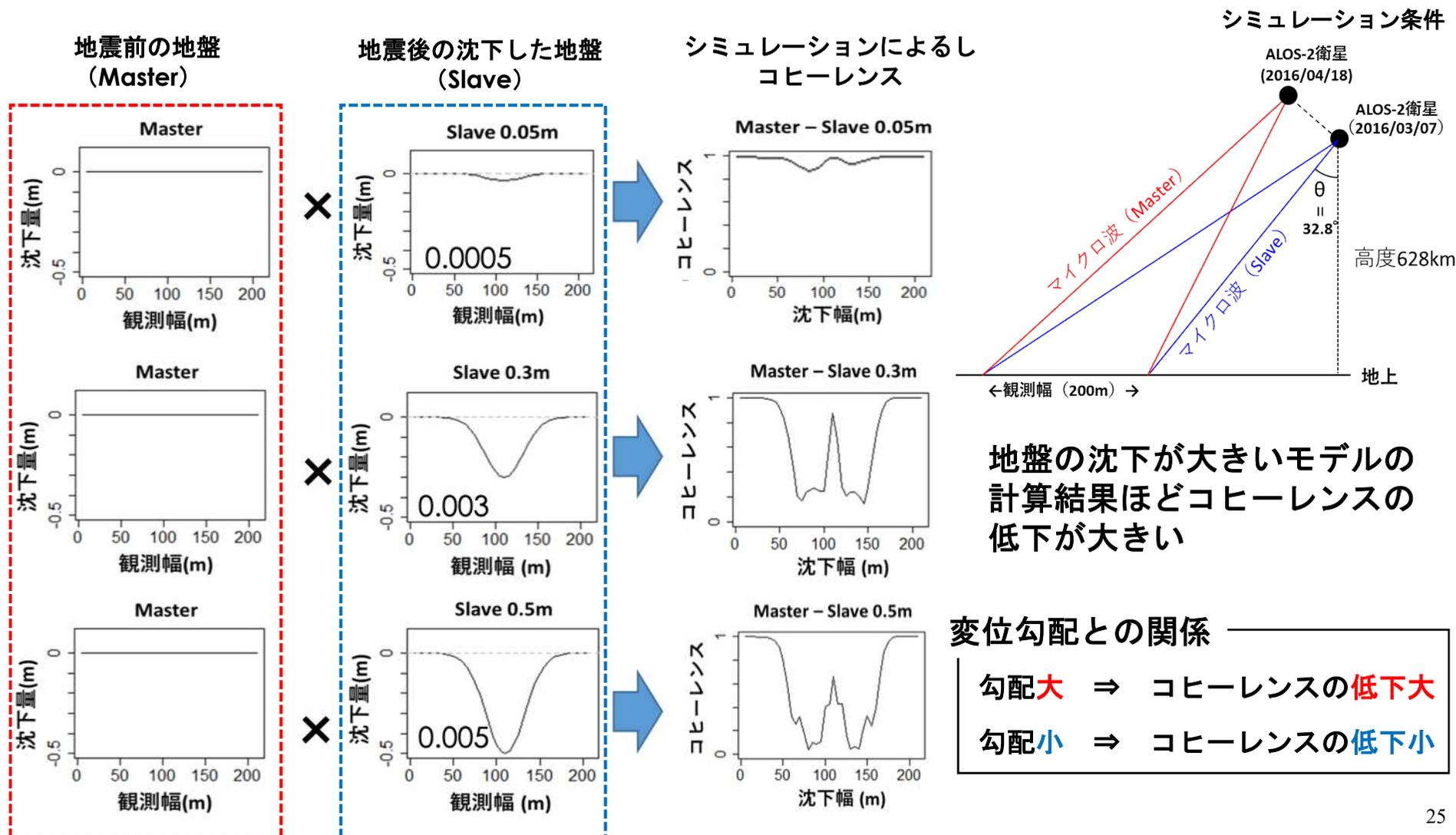
液状化の帯における コヒーレンス

- 現地調査によると、地盤の沈下はみられたが倒壊等の大きな被害はほとんどない。
- 航空写真による外観目視判読データからも大きな建物被害がみられない。
- さらに時期をあけた観測ペアの解析でも同様。（噴砂の影響ではない）



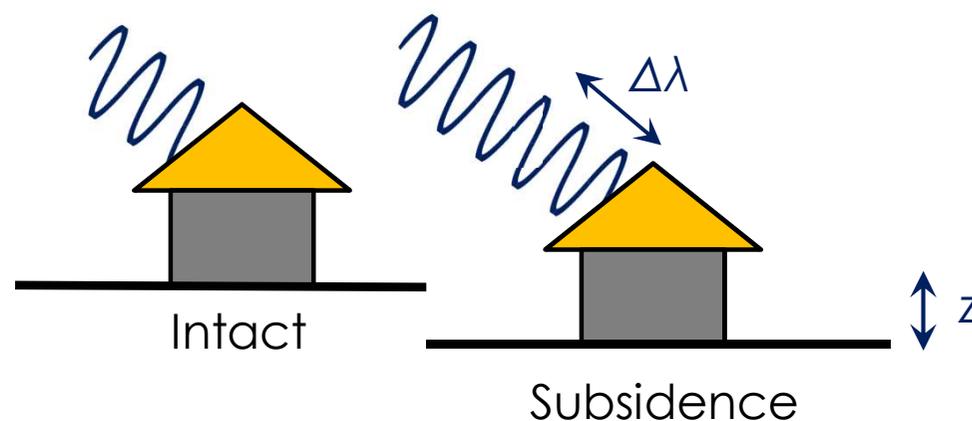
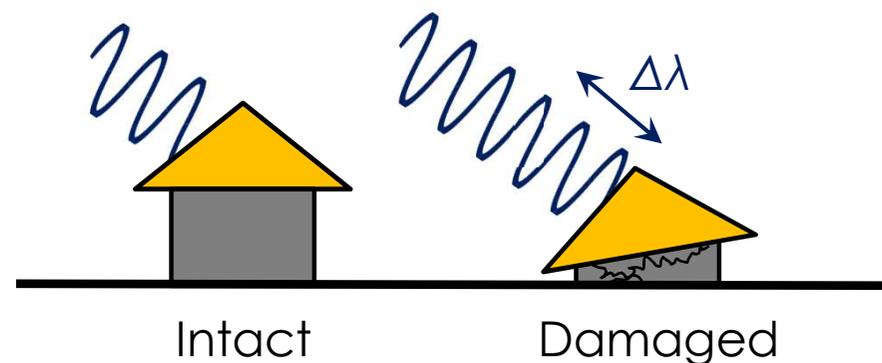
地盤沈下とコヒーレンスの関係

振幅の変化はコヒーレンスに大きな影響を与えないことから、沈下のみを考慮したシミュレーションを行った。



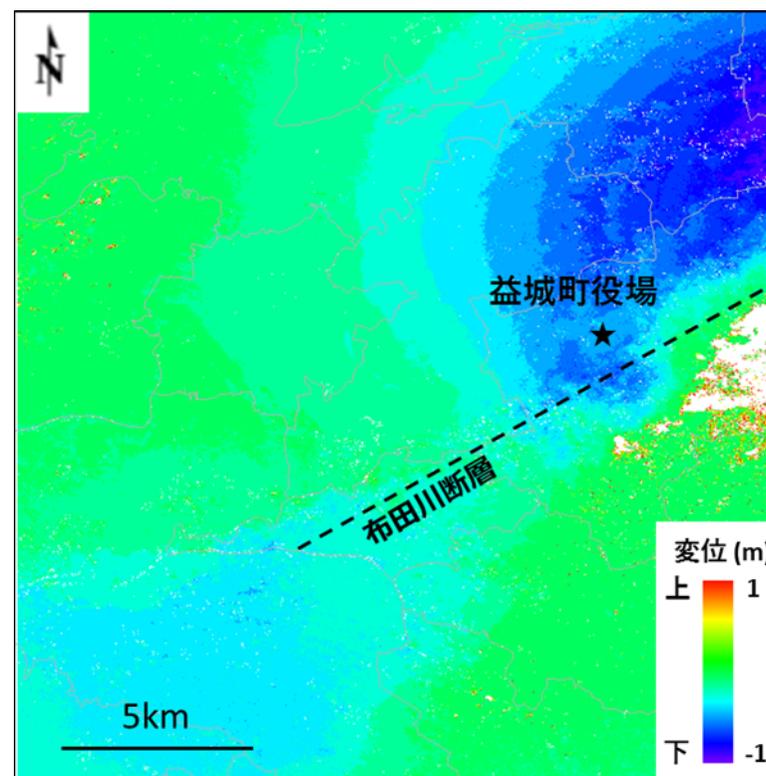
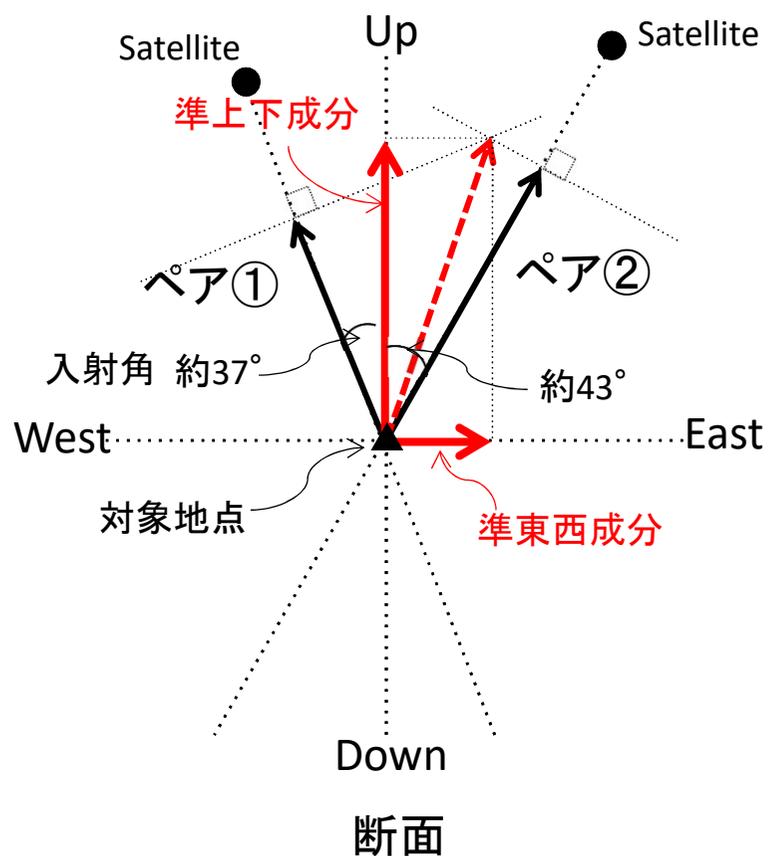
被害建物および地盤沈下におけるレンジ（位相）の変化

地震の被災地では揺れによる建物被害と地盤沈下が混在し、それぞれがコヒーレンス低下をもたらす。



熊本地震の上下方向の変位

ペア①とペア②の2方向（おおよそ東，西）からの視線（LOS）が作る平面における変位（赤点線）を，2つのLOS変位から求め，さらに，準上下成分と準東西成分（赤実線）に分離する。2つの観測の照射角および入射角がそれぞれ異なり，画像内の地点においても異なることから，上記の平面は完全な東西方向を示さず，かつ，垂直にはならないため，「準」という表現を使う。



準上下方向の変位量

地盤沈下に伴うコヒーレンス低下地域を除く

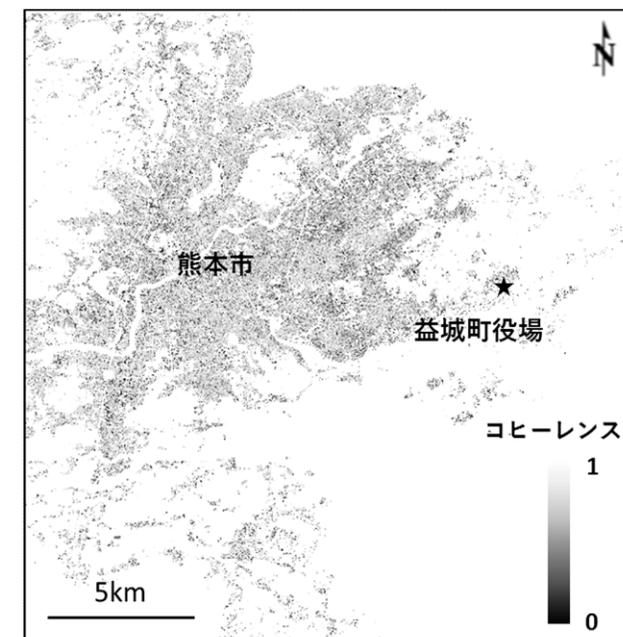
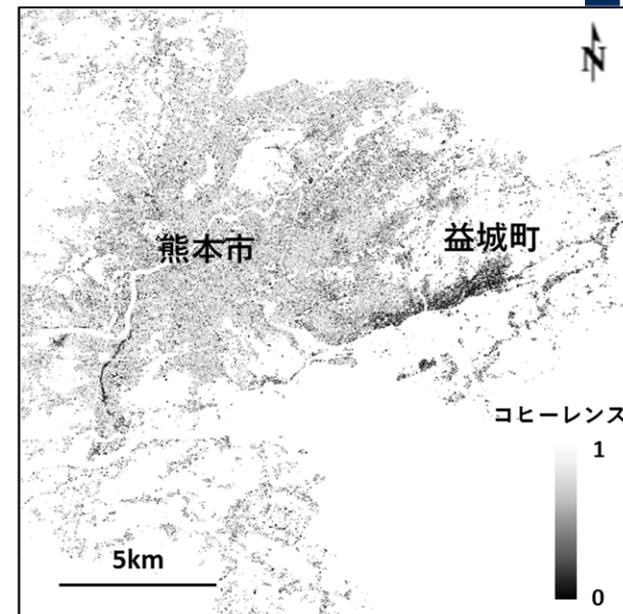
準上下方向の地盤変位について、周辺ピクセルから勾配を算出



傾斜が約 0.0009 （勾配角 0.05° ）を閾値として地盤変位勾配が大きい地域と地盤変位勾配が小さい地域に分ける

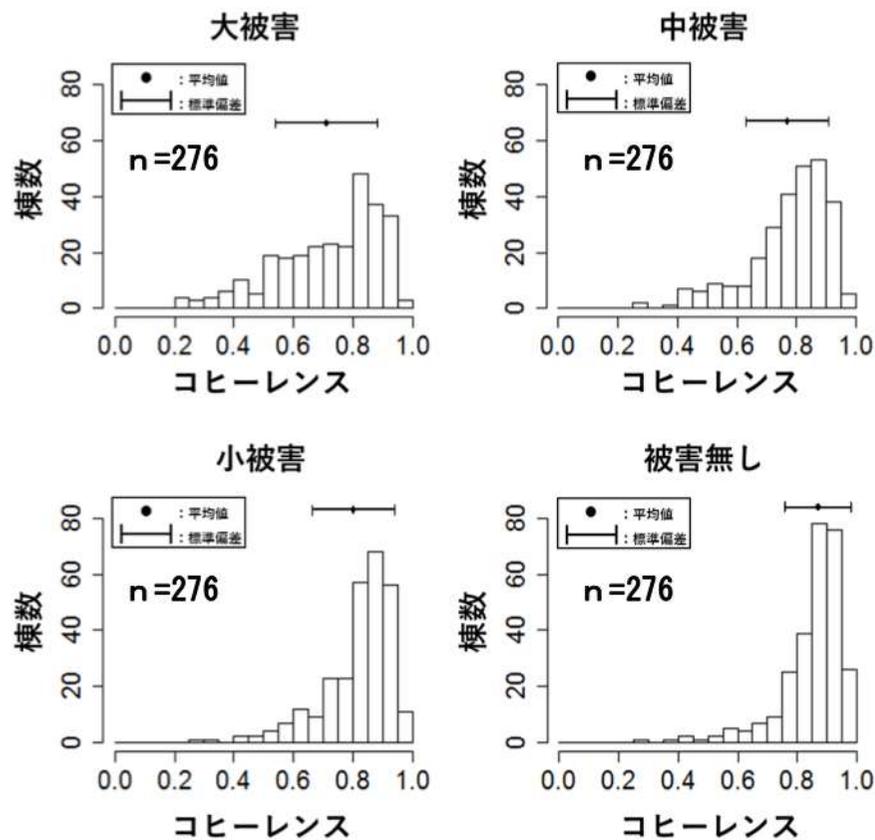


地盤の変位勾配が小さい地域におけるコヒーレンスと建物被害の関係を検討

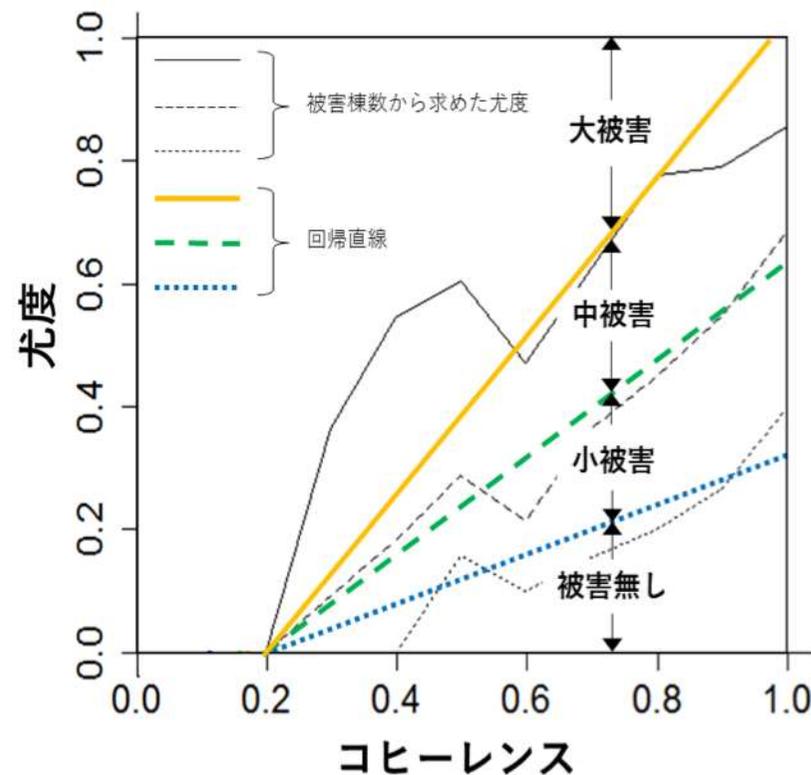


揺れによる損傷被害推定モデル

- ・ 各被害レベルの棟数を抽出
- ・ 抽出した建物コヒーレンスの頻度分布から各被害レベル間で有意差を確認
- ・ 建物コヒーレンスごとの建物棟数割合から尤度を求めて線形回帰によるモデルを作成

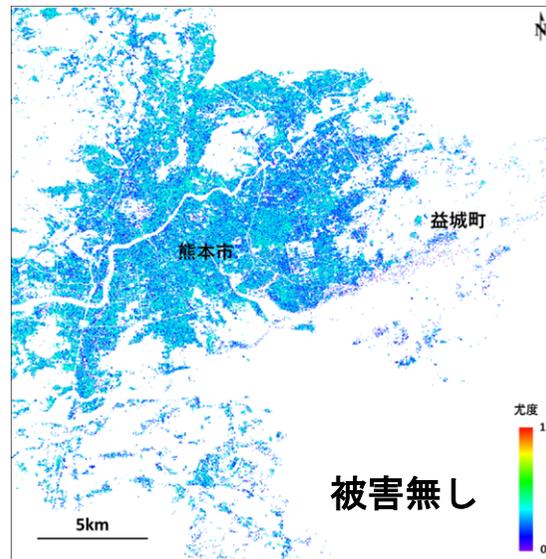
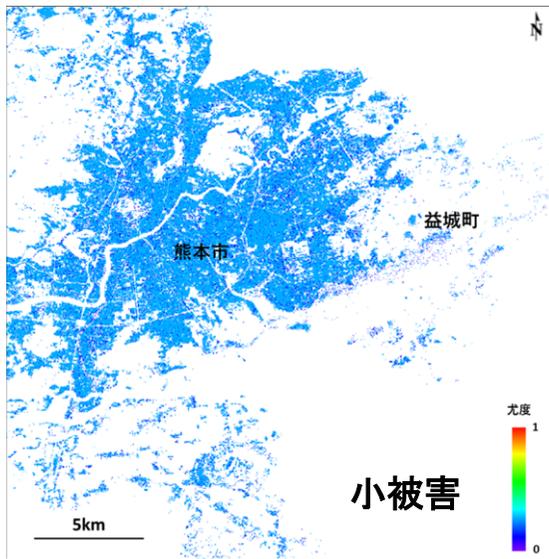
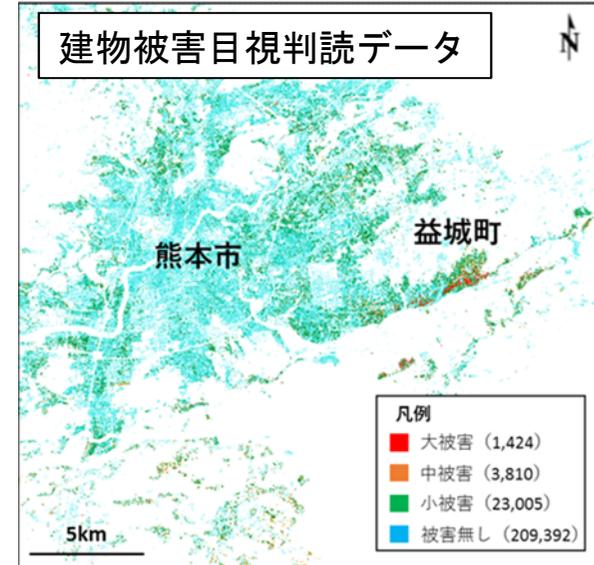
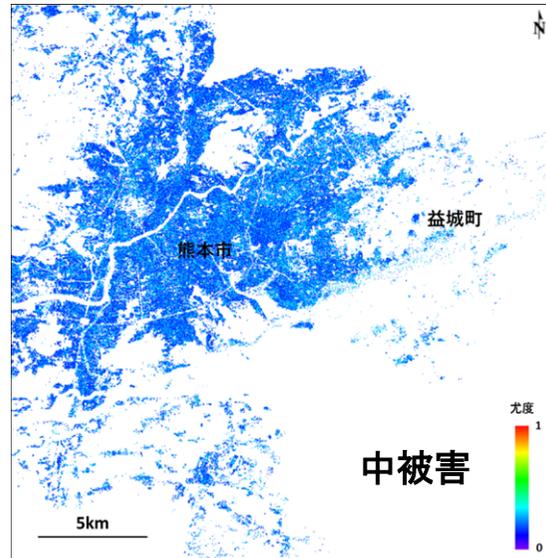
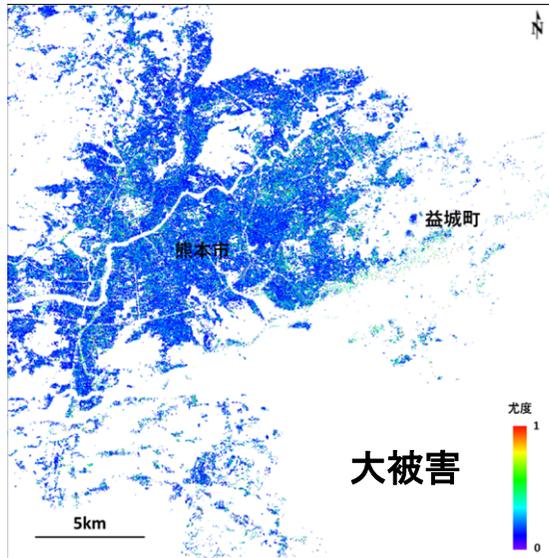


コヒーレンスの頻度分布
(無作為に被害ごとに276棟を抽出)



建物被害の尤度関数

地盤変位勾配が小さい地域における 建物被害推定



熊本地震のガス管被害（西部ガス）

ガス低圧本支管の被害数

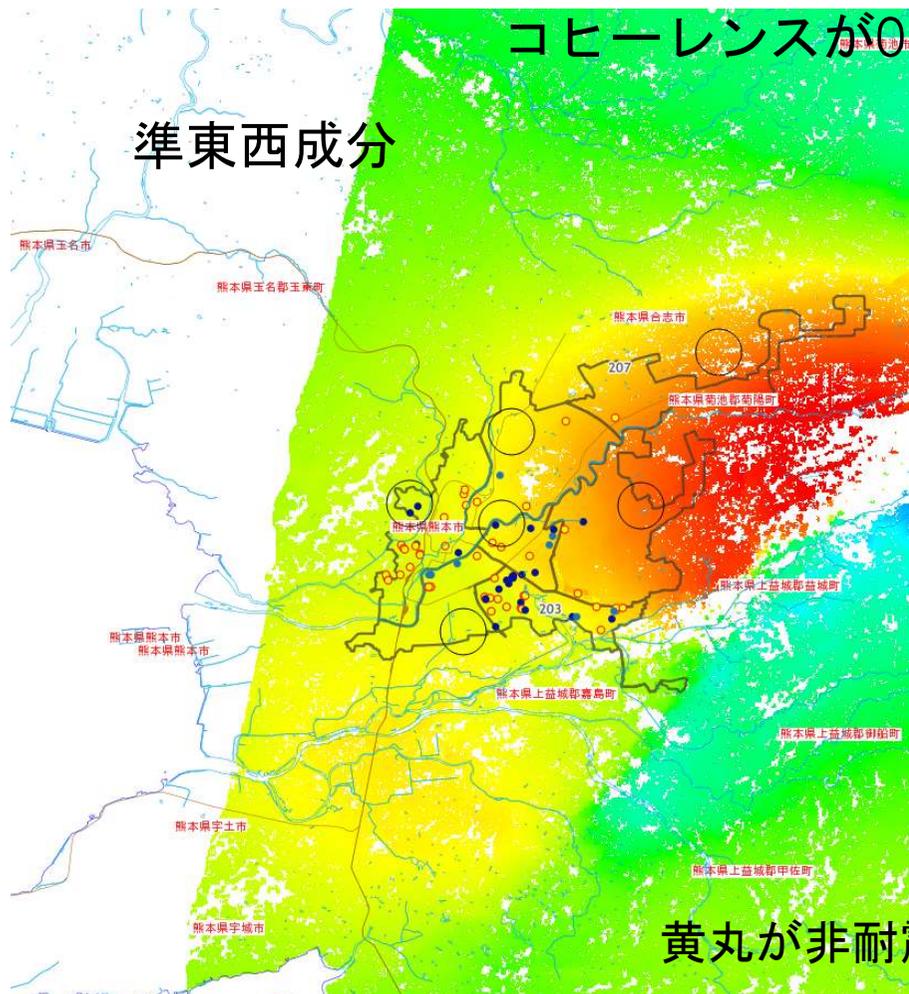
管種	鋼管ネジ (非耐震)	鋼管SGM (耐震)	ダクタイル鋳鉄管 (耐震)	計
本管	1	0	10	11
支管	45	23	0	68

- 非耐震管については継手の亀裂や折損等が発生
- 耐震管については全て継手の緩みによる微小なガス漏れで、継手破損は発生していない

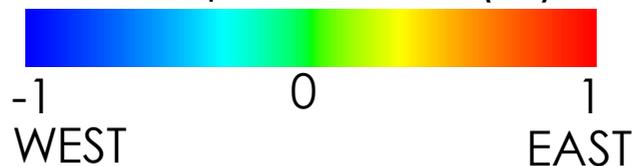
ガス本支管被害の分布

コヒーレンスが0.1以上の地域を可視化

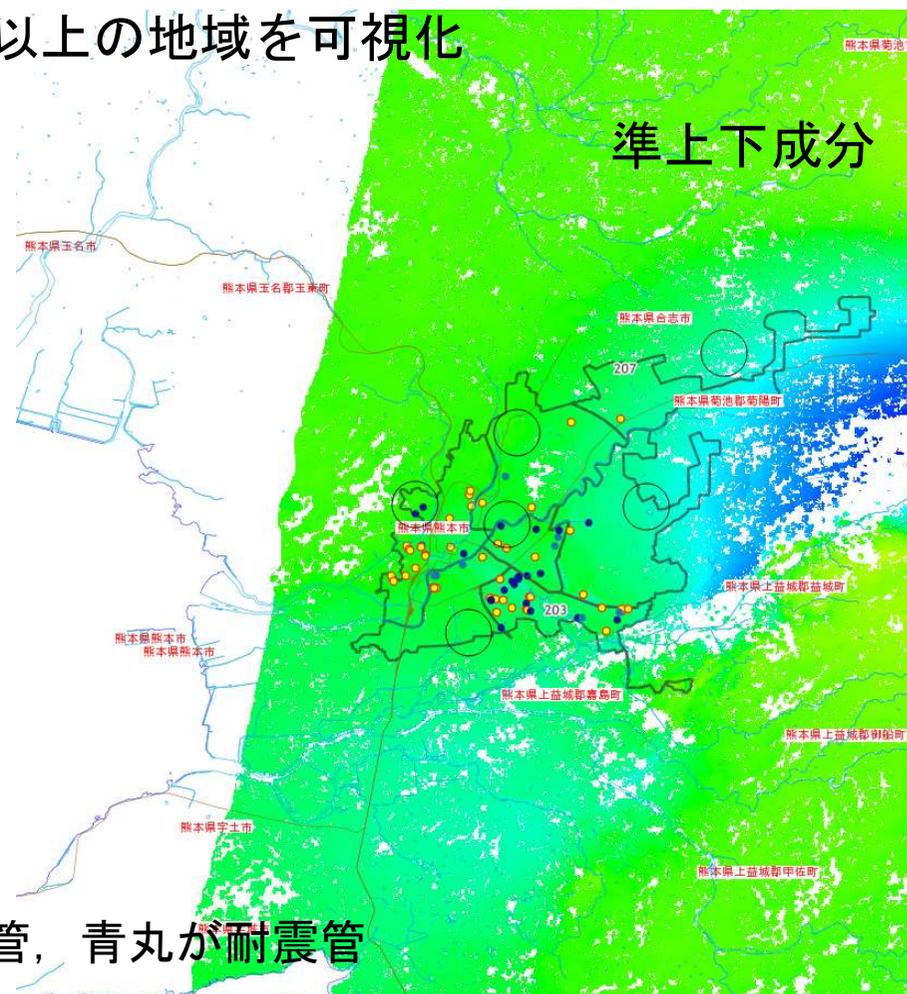
準東西成分



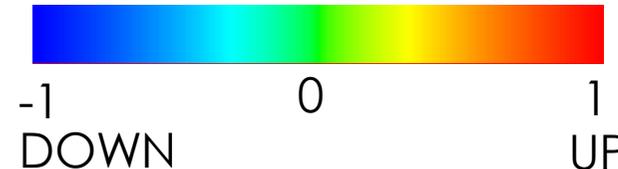
Displacement (m)



準上下成分



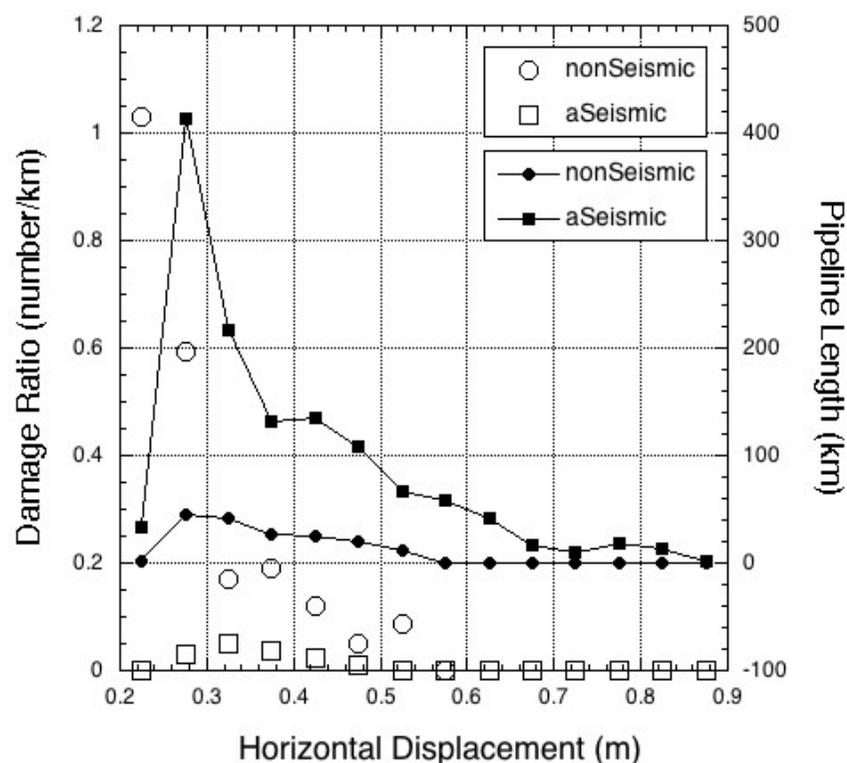
Displacement (m)



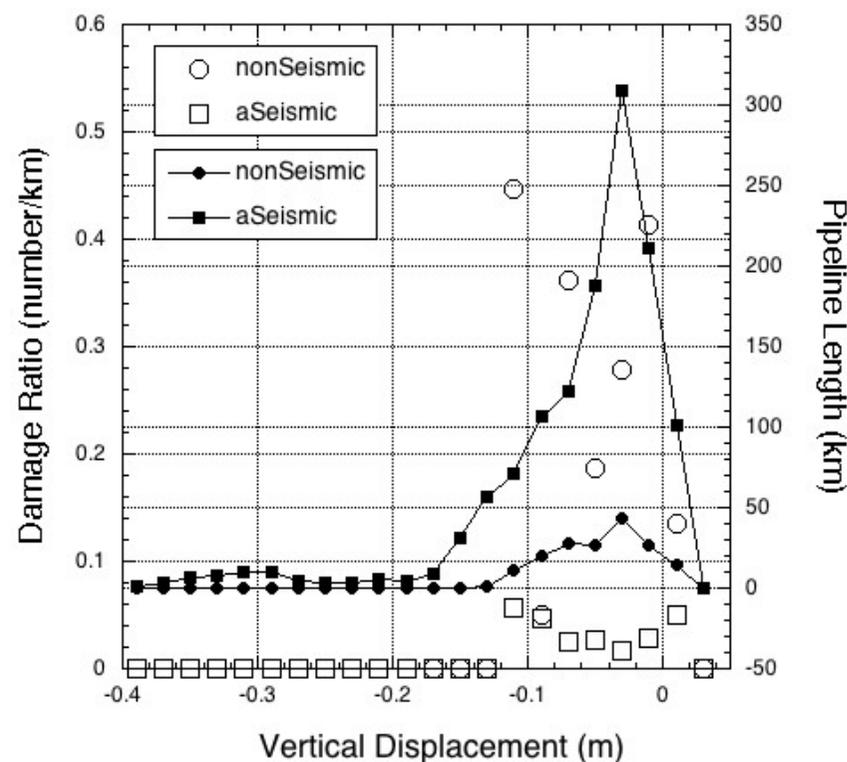
黄丸が非耐震管，青丸が耐震管

ガス本支管被害率と地盤変位の関係

被害率 = 被害箇所数 / ガス管延長 (km)



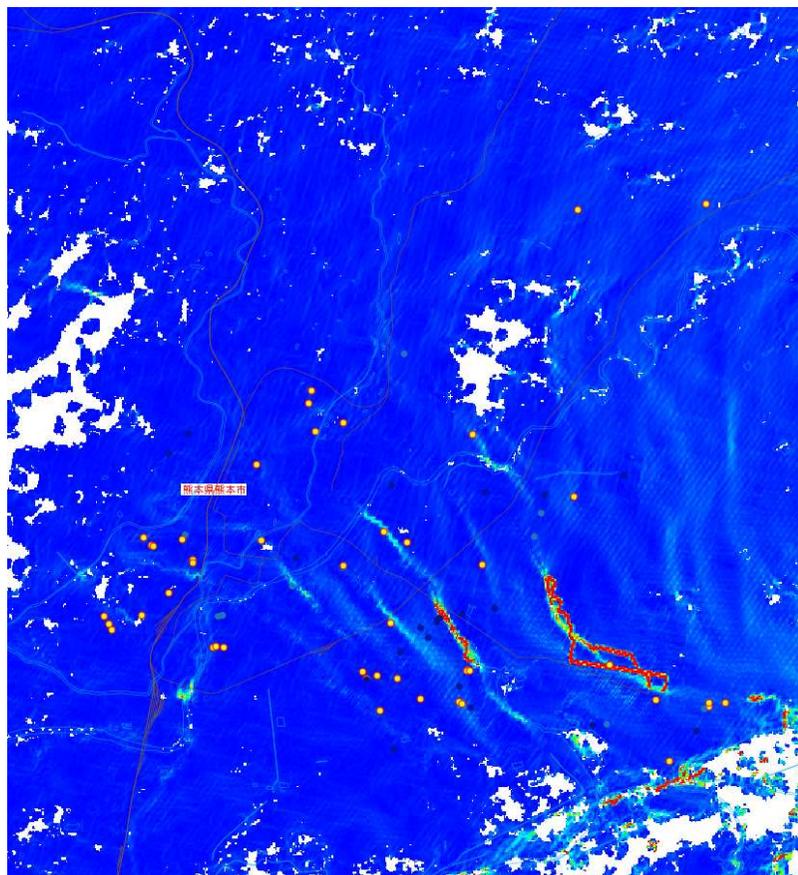
準東西変位



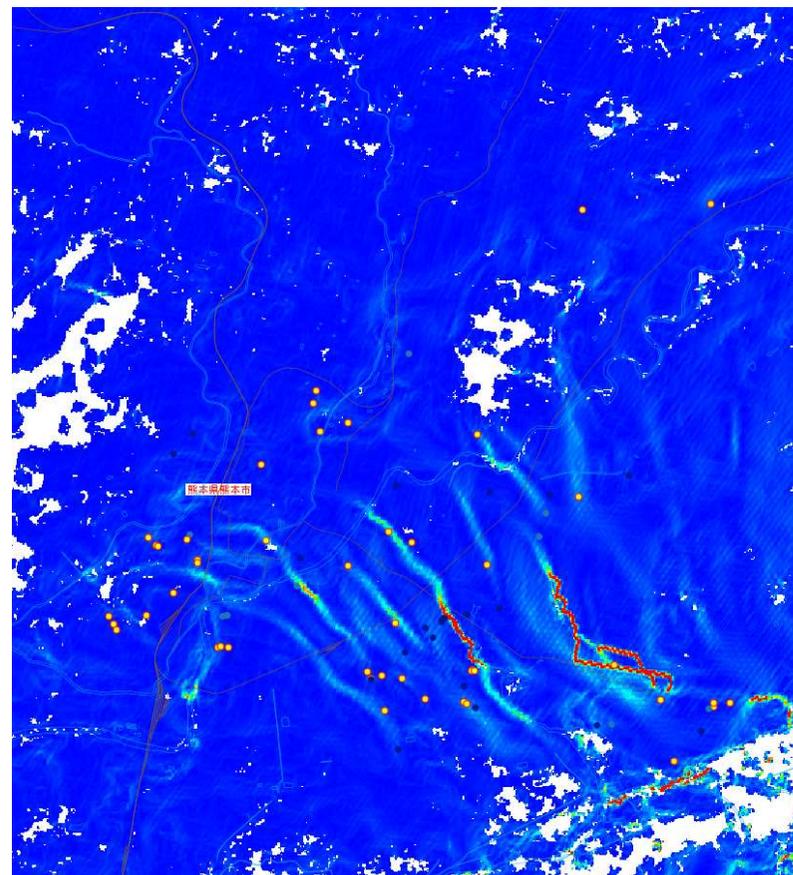
準上下変位

被害率と地盤変位との間には傾向がみられない

ガス本支管被害の分布 (地盤変位の勾配)



準東西成分

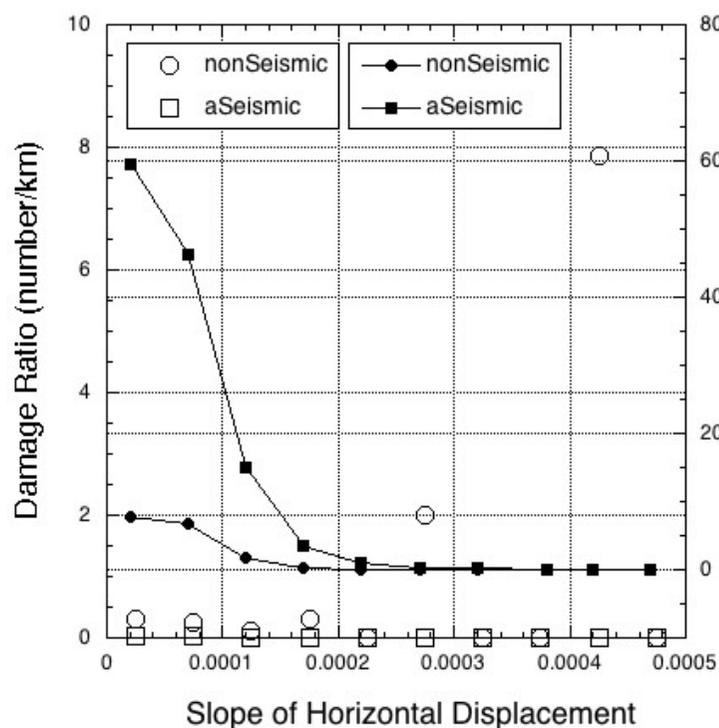


準上下成分

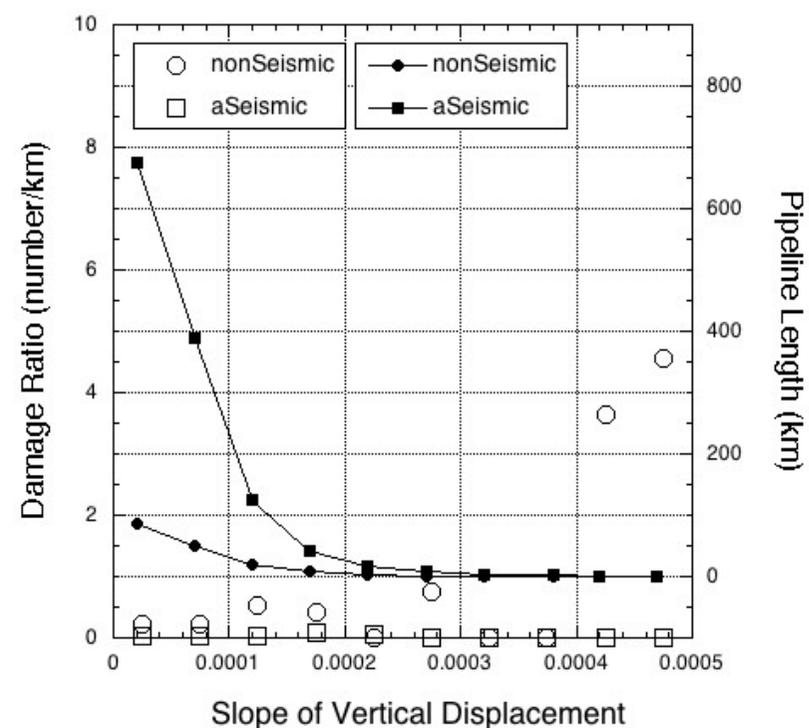


ガス本支管被害率と変位勾配の関係

被害率 = 被害箇所数 / ガス管延長 (km)



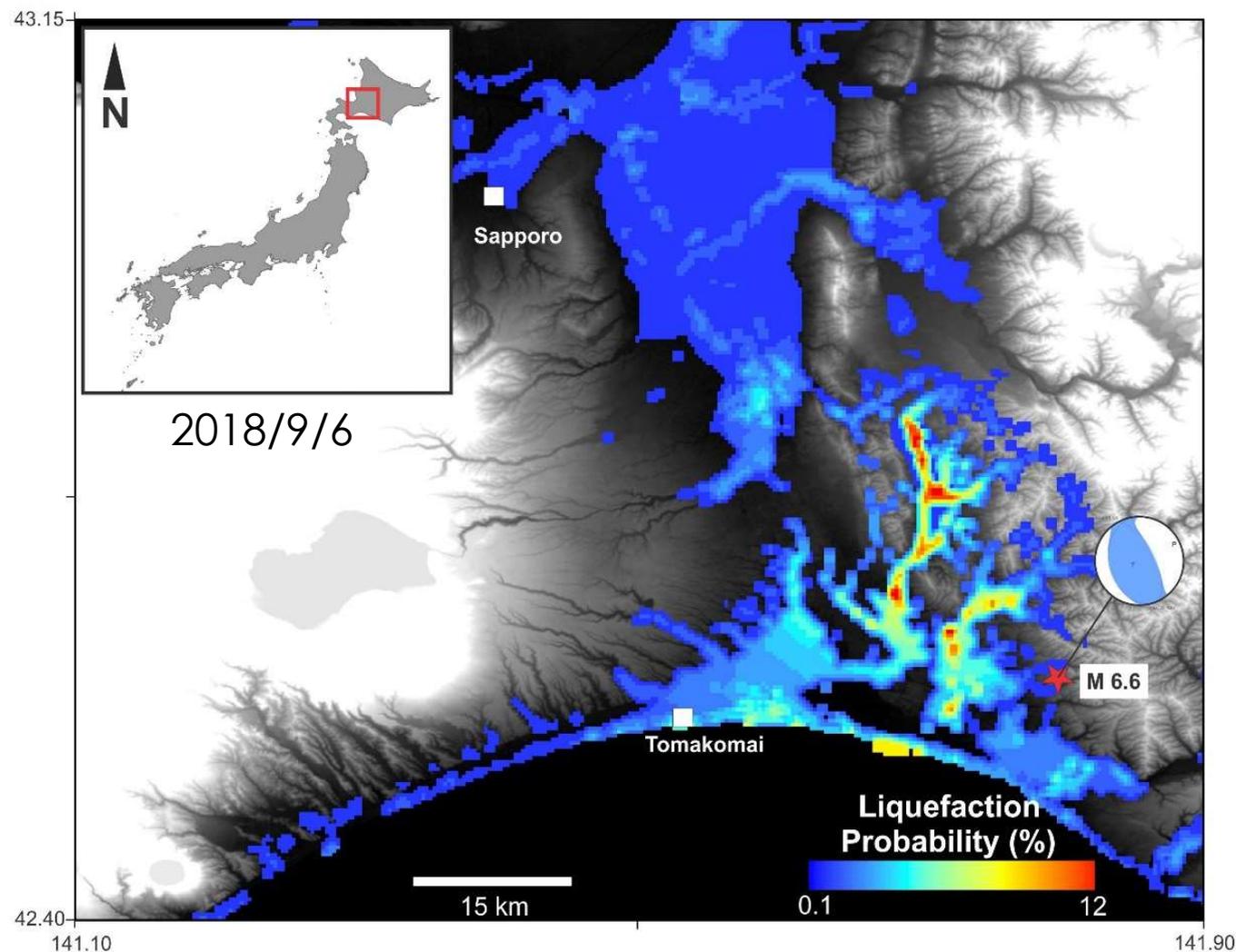
準東西変位



準上下変位

被害率と地盤変位の勾配には相関があり、勾配が大きくなるほど被害率が大きくなる傾向がみられる

2018年北海道胆振東部地震



液状化危険度マップ即時推定システム (LiquickMap - QuiQuake)
<https://gbank.gsj.jp/QuiQuake/LiquickMap/>

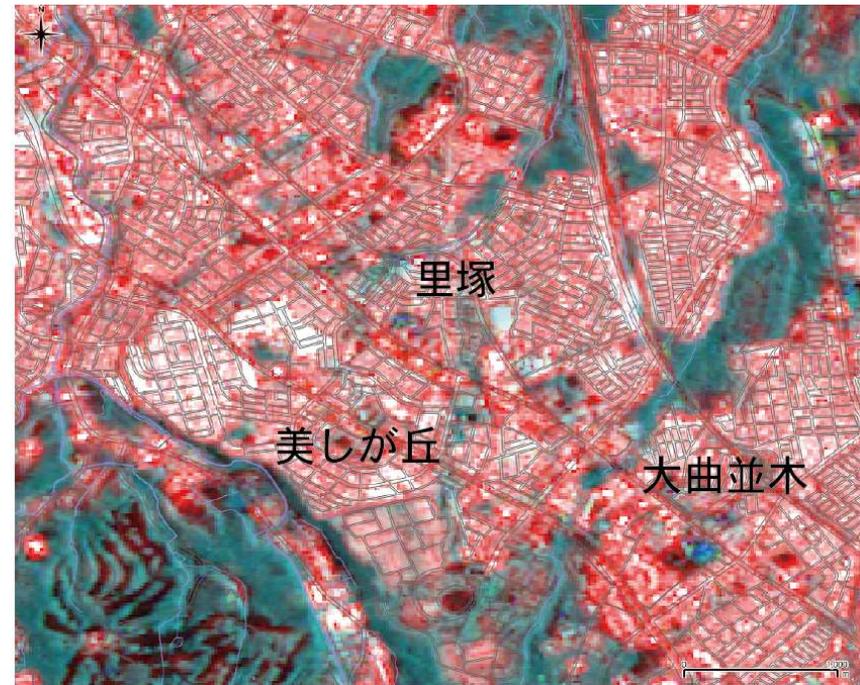
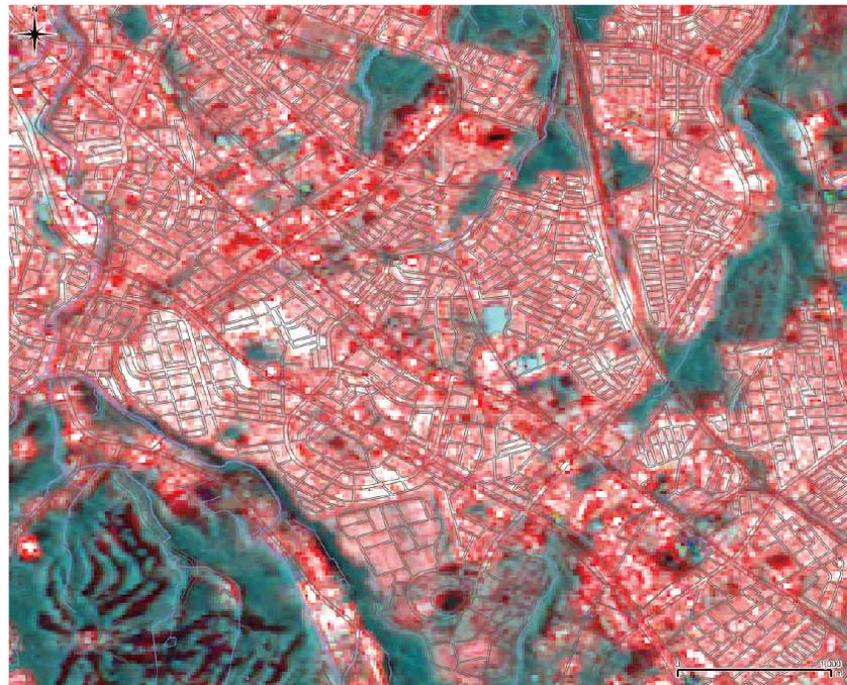
液状化被害に伴うコヒーレンス低下



2016年熊本地震

R: coherence
G: master
B: slave

2018年北海道胆振東部地震

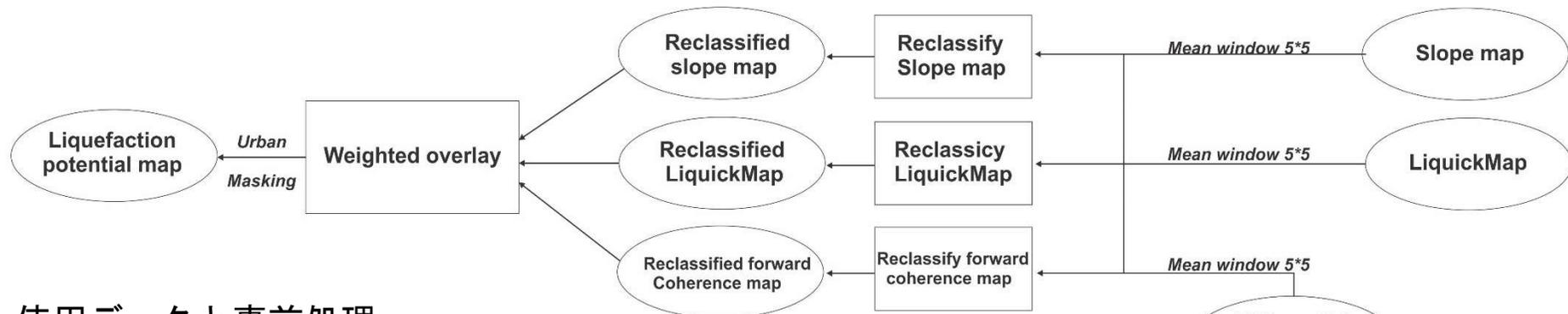


2018/8/23 - 2018/8/9

2018/8/23 - 2018/9/6

液状化ポテンシャル解析フロー

重み付け重畳 (Weighted Overlay, WO)

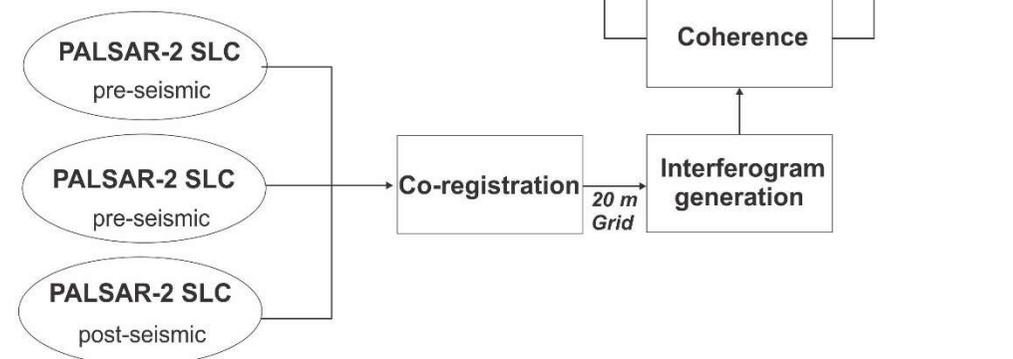


使用データと事前処理

- 液状化危険度マップ (LiquickMap), 平均傾斜量, コヒーレンス差分 (PC-CC), それぞれについて自然分類 (Jenks) に基づくレベルスライス (50クラス)

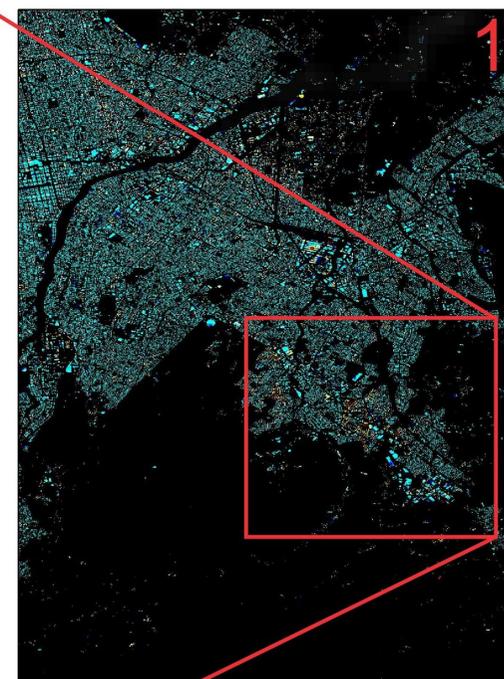
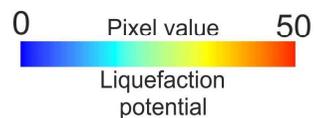
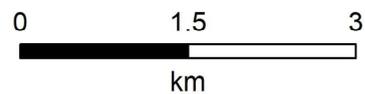
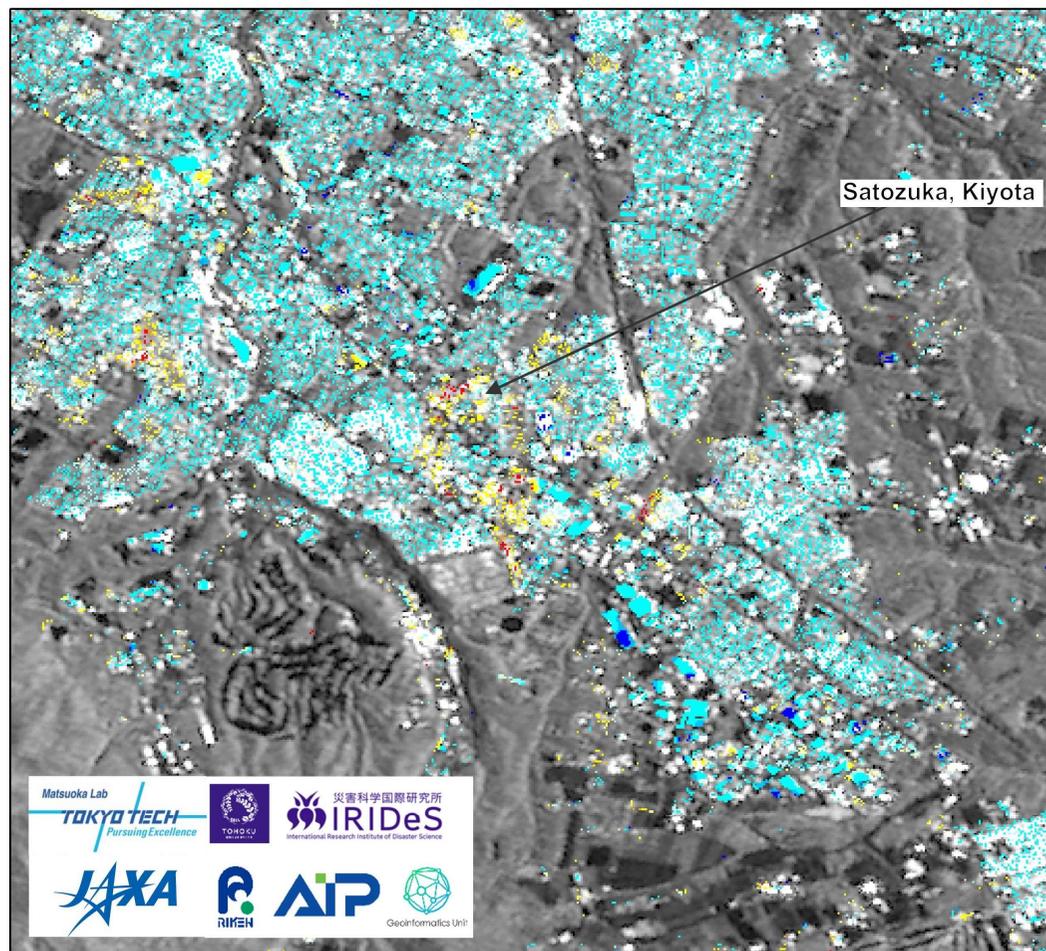
重み付け重畳解析による画像作成

- 建物ポリゴンの重心にあるピクセルを代表として抽出, 液状化危険度マップ : 平均傾斜量 : コヒーレンス差分 = 15 : 5 : 80による重み付けをして画像化 (weighted overlay, WO)



WOMマップ

札幌市南部と北広島市付近の拡大



GSI建物ポリゴンと重なるピクセルを抽出

WO Map

札幌市清田区里塚, 美しが丘を拡大



現地写真

大曲並木

里塚



大曲並木

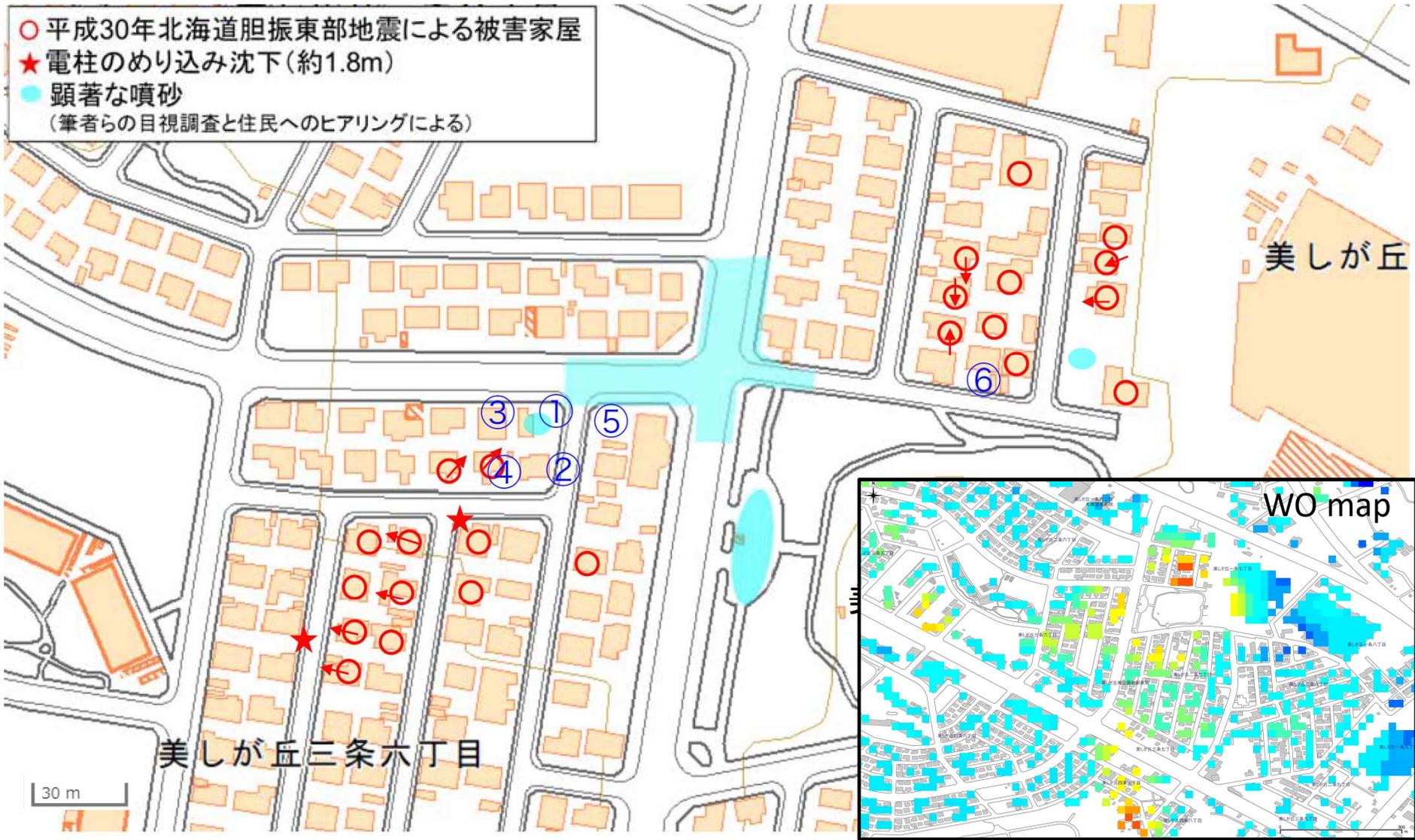


美しが丘

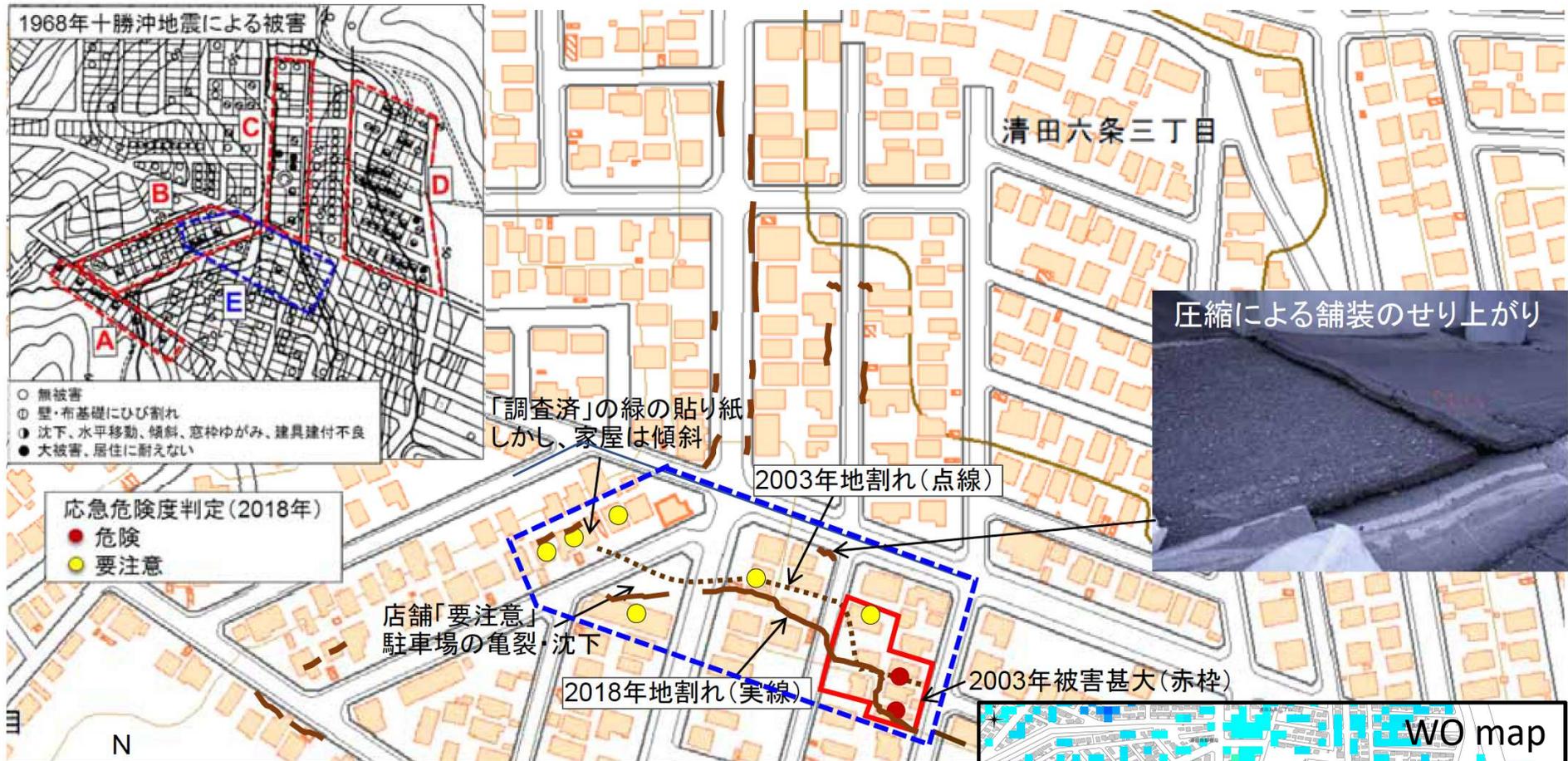


美しが丘の調査報告（若松・尾上, 2018）

2003年に傾斜が最も大きかった①の宅地は、現在は駐車場になっていたが、噴砂が認められた。住宅②③も2003年には①と同程度の傾斜した。建て替えの際に杭基礎にしたため今回は無被害とのこと。美しが丘南公園の北側の住宅地でも多数の家屋被害があった。

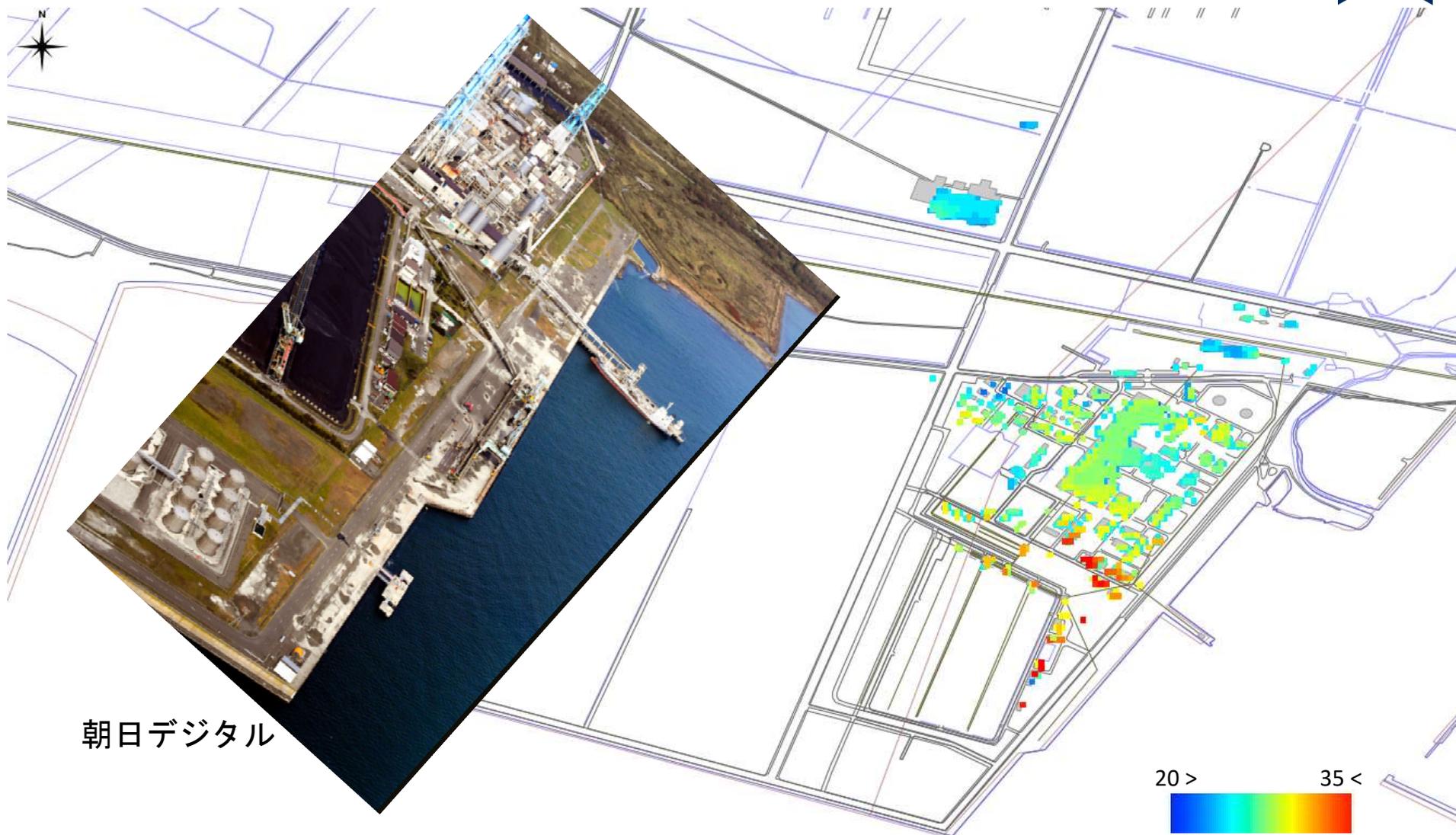


清田の調査報告 (若松・尾上, 2018)



2003年十勝沖地震で被害があったE地区の被害の概要を下図に示す。2003年地震の時とほぼ同じ位置に地割れが現れていた。地割れに沿った家屋が被害を受けていた。2003年に被害が顕著だった赤枠内では、2003年当時と同じ家が被害を受けていた。しかし、2003年以後に新築した建物自体には、地盤変状の影響は認められなかった。地割れが走った外構には損傷が見られた。時頁以降に地盤変状と建物被害の詳細を示す。

WO Map 苫東厚真火力発電所



朝日デジタル



まとめ

➤ SAR画像からの被害抽出手法

- 強度相関
- コヒーレンス

➤ 被害抽出の事例

- 建物被害
- ガス本支管被害
- 液状化

謝辞

PALSAR-2データはJAXAのWG活動の一環としてご提供いただいた。西部ガスのガス管被害データはADEP/東京ガスの委員会を通じて入手した。関係各位には記して謝意を表します。

ご清聴ありがとうございました

