

## 衛星SAR画像を用いた2011年 クライストチャーチ地震における 地殻変動の検出と液状化地域の抽出

東京工業大学 大学院総合理工学研究所  
リュウ・ウエン

千葉大学大学院 工学研究科  
山崎 文雄

### 背景と目的

- 2011年2月21日にニュージーランドのクライストチャーチ市郊外でMw 6.1の地震が発生した。
  - この地震は、2010年9月2日に発生したMw 7.0のダーフィールド地震の余震である。
  - 断層による地殻変動が観測された。
  - クライストチャーチ中心部に広域の液状化現象が起きた。
- 合成開口レーダを用いた差分干渉法は、広域の地殻変動を観測する有効な手法と知られている。



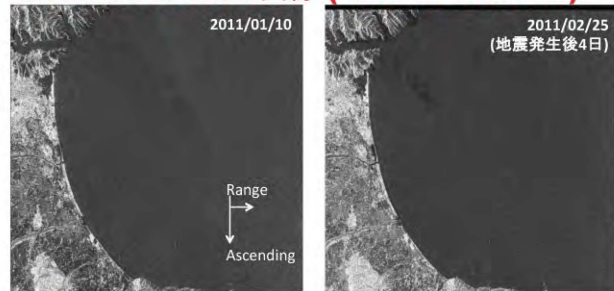
- ALOS/PALSARとTerraSAR-X (TSX), 2つのセンサが撮影した地震前後の画像を用いて、地殻変動量の検出と液状化地域の抽出を試みた。

### 対象地域



- 被害が大きかったクライストチャーチ市の周辺を対象地域にした。
- 上昇と下降軌道で撮影された地震前後のALOS/PALSARとTerraSAR-X画像を用いた。

### ALOS/PALSAR画像 (SLANT RANGE)



撮影日	2011/01/10	2011/02/25
観測角度		38.95°
進行方向		344°
解像度(R x A)		4.7 m x 6.2 m
軌道間距離		364 m

### TERRASAR-X画像 (SLANT RANGE)

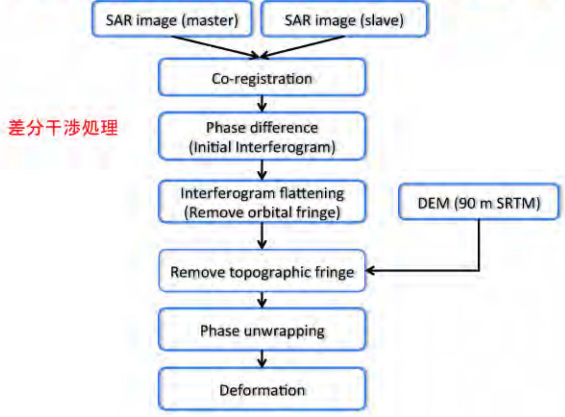


撮影日	2010/09/18	2011/03/02
観測角度		44.51°
進行方向		196.74°
解像度(R x A)		2.8 m x 3.1 m
軌道間距離		284 m

### 地殻変動の推定

差分干渉処理

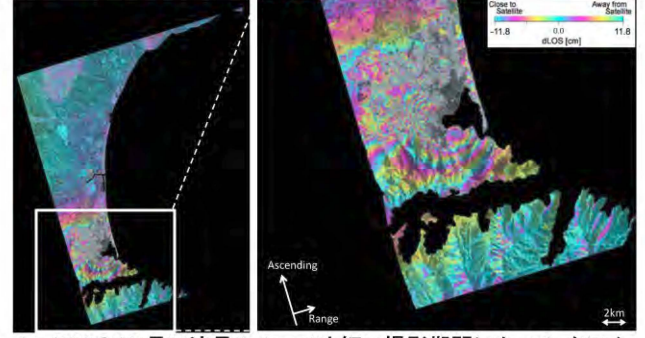
### 干渉処理の流れ (ENVI/SARSCAPE)



差分干渉処理

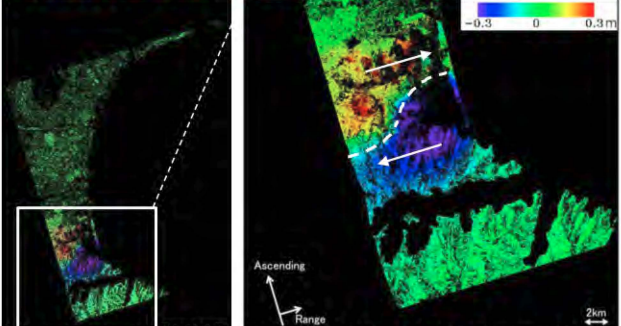
6

### 差分干渉の結果 (PALSAR)



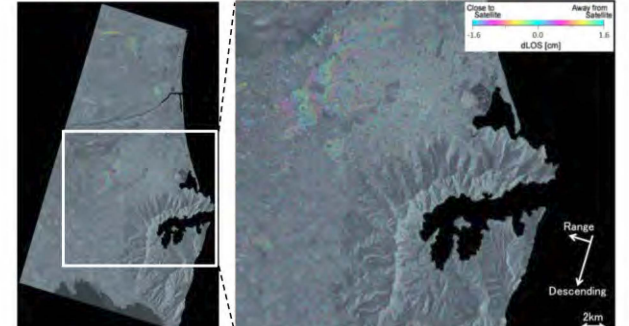
- PALSAR長い波長(L-band)と短い撮影期間によって、クライストチャーチ周辺で明確なフリンジが得られた。
- 市の中心部では相関が低いため、フリンジが得られなかった。

### 観測方向の地殻変動量 (PALSAR)



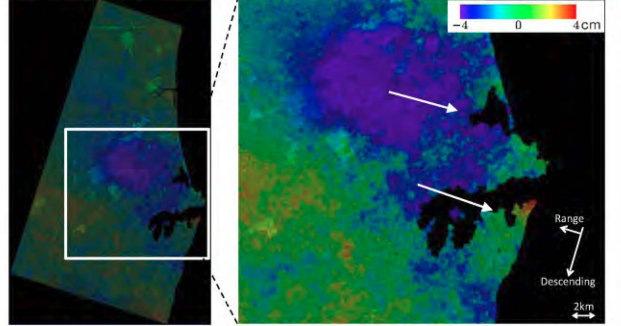
- 相関係数(コヒーレンス)が0.5以上の部分において、フリンジのアンラップ処理を行って、変動量に変換した。
- 検出された地殻変動量は-0.64 mから0.58 mまでであった。

### 差分干渉の結果 (TERRASAR-X)



- TSXの短い波長(X-Band)と長い撮影期間によって、地殻変動が大きいクライストチャーチ中心部では干渉縞が得られなかった。

### 観測方向の地殻変動量 (TERRASAR-X)



- 相関係数(コヒーレンス)が0.5以上の部分において、フリンジのアンラップ処理を行って、変動量に変換した。
- 検出された地殻変動量は-0.10 mから0.06 mまでであった。

10

### 3次元の地殻変動とSAR画像上の移動量

立体図

観測方向の断面図

上面図

$M_{S1} = L_{S1}' - L_S = D_R \sin \theta$   
 $M_{S2} = L_{S2}' - L_{S1}' = D_Z \cos \theta$   
 $M_S = M_{S1} + M_{S2}$

$$M_S = (D_E \cos \alpha - D_N \sin \alpha) \sin \theta - D_Z \cos \theta$$

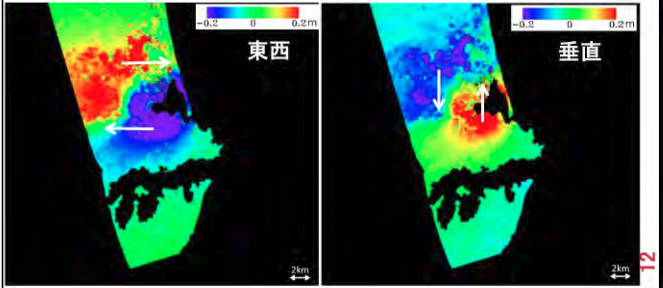
Ascending (PALSAR)  
Descending (TerraSAR-X)

$$\begin{cases} M_{SA} = (0.96D_E + 0.28D_N) \times 0.63 - 0.78D_Z \\ M_{SD} = (-0.96D_E + 0.29D_N) \times 0.70 - 0.71D_Z \end{cases}$$



## 2次元変動量の推定

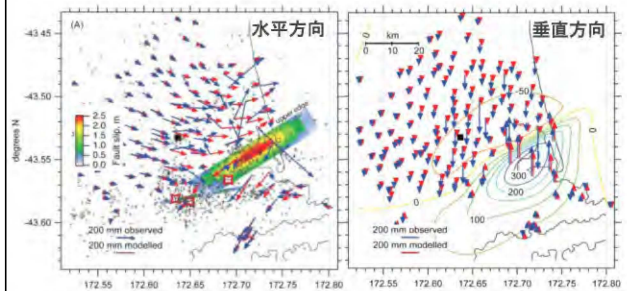
- $D_N$ の係数が小さいため、 $D_N$ が0と仮定すれば $D_E$ と $D_Z$ が推定できる。
- 推定された $D_E$ が-0.40 mから0.44 mまで
- 推定された $D_Z$ が-0.35 mから0.45 mまで



12

## GPSデータと断層モデル

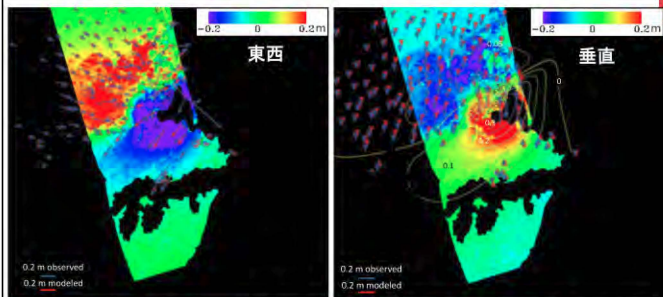
- Beaven et al. (2011)がC-bandのSAR干渉処理と136ヶ所のGPSデータに基づき、2断層のモデルを構築した。



(cited from : Beaven, J., Fielding, E., Motagh, M., Samsonov, S., Nonnelly, N., 2011, Fault location and slip distribution of the 22 February 2011 Mw 6.2 Christchurch, New Zealand, earthquake from geodetic data, *Seismological Research Letters*, 82(6) 789-799. )

13

## 推定結果の検証



- 推定された東西と垂直方向の変動は、GPSの観測データや2断層モデルによる結果と概ね一致した。
- $D_N$ を無視することで、推定された $D_E$ と $D_Z$ がGPSの観測データより大きい傾向がある。

14

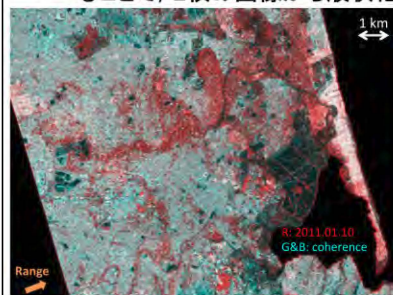
## 液状化地域の中抽出

- コヒーレンスによる抽出
- 地殻変動による抽出

15

## コヒーレンスと強度画像の組み合わせ

- 液状化地域の抽出は主に、スタッキングした事前のコヒーレンスとイベント前後のコヒーレンスの差分を取ることで行っている → 2枚以上の事前画像が要する
- 事件事後のコヒーレンスと事前の強度画像を組み合わせることで、2枚の画像から液状化地域の特定を試みた。

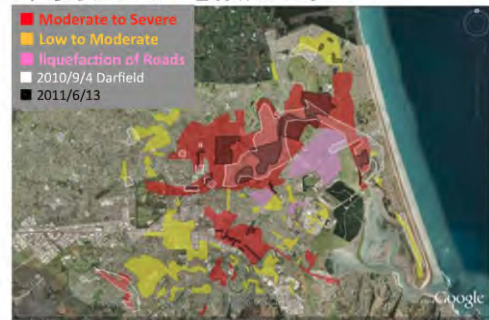


- シアン: 高コヒーレンス低後方散乱係数
- 赤: 低コヒーレンス高後方散乱係数 → 液状化地域

16

## 液状化マップ

- Curbinovski et al. (2011)が現地調査の結果をもとに、液状化マップを作成した。



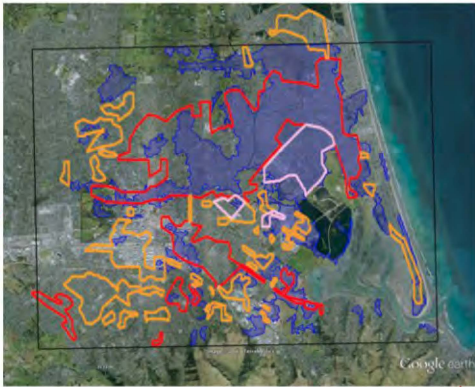
(cited from: Curbinovski, M., McCahon, L., 2011, Foundations on Deep Alluvial Soils, *Technical Report of Canterbury Earthquakes Royal Commission*.)

17

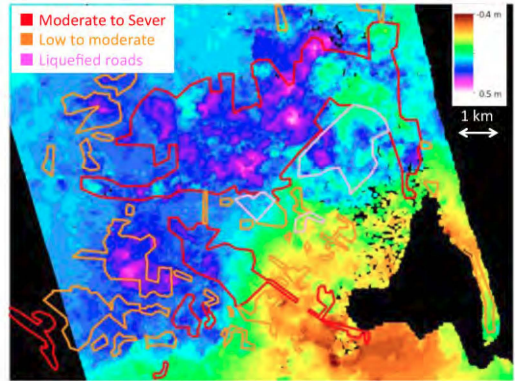
### 抽出結果と液状化マップの比較

Liquefaction Map  
 ■ Moderate to Severe  
 ■ Low to Moderate  
 ■ Liquefaction of Roads

Extracted result  
 ■ liquefaction



### 沈下量と液状化の比較

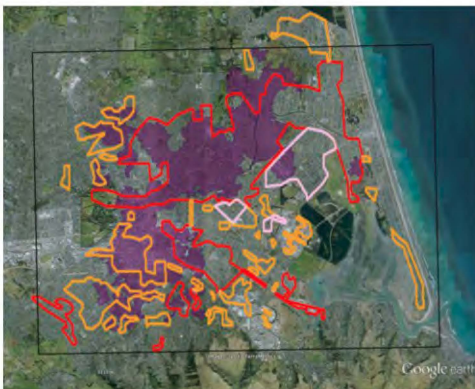


激しく沈下した地域は、液状化マップと一致している。

### 抽出結果と液状化マップの比較

Liquefaction Map  
 ■ Moderate to Severe  
 ■ Low to Moderate  
 ■ Liquefaction of Roads

Extracted result  
 ■ liquefaction (subside > 0.1 m)



### 抽出結果の検証

➤ 液状化マップを正解にし、2つの手法で抽出された結果の精度をピクセルベースで評価した。

Coherence [%]		Field survey results					
		Liquefaction			No liquefaction	Total	User accuracy
		Severe	Moderate	Road			
PALSAR	Liquefaction	10.04	0.90	2.28	9.64	22.86	57.83
	No liquefaction	6.79	6.20	0.36	63.78	77.14	82.69
	Total	16.83	7.10	2.64	73.43	100.00	
	Producer accuracy	59.66	12.68	86.40	86.87		77.01

Displacement [%]		Field survey results					
		Liquefaction			No liquefaction	Total	User accuracy
		Severe	Moderate	Road			
Subsidence	Liquefaction	8.24	2.85	0.40	5.43	16.92	67.89 ↑
	No liquefaction	8.61	4.24	2.23	68.00	83.08	81.85
	Total	16.85	7.09	2.63	73.43	100.00	
	Producer accuracy	48.89 ↓	40.17 ↑	15.30 ↓	92.60		79.49 ↑

### まとめ

- 2種類のSARセンサの画像を用いて、2011年クライストチャーチ地震における地殻変動量を推定した。
  - ALOS/PALSARとTerraSAR-X画像から差分干渉処理よりセンサ観測方向における変動量を検出した。
  - 南北方向の変動を0に仮定して、東西と垂直方向における変動量を推定した。
  - GPS観測データと断層モデルと比較すると、概ね一致した。
- 都市域における液状化した地域を、2つの手法を用いて抽出した。
  - 干渉処理で得られたコヒーレンスと地震前の画像における後方散乱係数を組み合わせることで、60%以上の重度な液状化地域と86%道路における液状化被害が抽出できた。
  - 推定された沈下量を使って、40%以上の中程度の液状化地域を抽出できた。
- 今後では、断層モデルを用いてより詳細の検討を行う予定である。

ご清聴、ありがとうございます

### ACKNOWLEDGMENT

PALSAR data are owned by the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) and Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). TerraSAR-X data are the property of German Aerospace Center (DLR) and the Inforterra GmbH, and provided by PASCO Corporation.