



# ニュージーランド南島における2010年ダーフィールド地震による地表地震断層及び2011年クライストチャーチ地震による被害

吉岡, 祥一  
太田, 陽子  
片岡, 香子

---

**(Citation)**

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 18:1-15

**(Issue Date)**

2014-03

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/81011437>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011437>



# ニュージーランド南島における2010年ダーフィールド地震による地表地震断層, 及び2011年クライストチャーチ地震による被害

Surface fault associated with the 2010 Darfield earthquake and disasters by the 2011 Christchurch earthquake, South Island, New Zealand

吉岡 祥一<sup>1)</sup>

Shoichi Yoshioka

太田 陽子<sup>2)</sup>

Yoko Ota

片岡 香子<sup>3)</sup>

Kyoko Kataoka

概要: ニュージーランド南島で, 2010年9月4日にダーフィールド地震 (Mw7.1) が, 2011年2月22日にクライストチャーチ地震 (Mw6.1) が発生し, クライストチャーチ地域に大きな被害をもたらした. 本稿では, まず, 同地域のテクトニクスと地震学的背景, 歴史地震について概観する. これら二つの地震は, 過去15000年間活動の記録がない未知の活断層で発生した. 上下成分を含む, 右横ずれが支配的な地震時の地表地震断層 (グリーンデール断層) がダーフィールド地震に伴って出現した. 本稿では, 我々が計測したこの断層を横切る地形断面の例を二つ示す. クライストチャーチ地震では, クライストチャーチ中心部で震動による被害が顕著であった. ここでは, 斜面崩壊, 落石, 液状化, 建物の性質の違いによる被害の差異など, これら二つの地震によってもたらされた被害について述べる. 特に, 大きな斜面崩壊の場所と地形の関係について着目する.

キーワード: ニュージーランド南島, 地表地震断層, ダーフィールド地震, クライストチャーチ地震, 斜面崩壊, 落石, 液状化

## 1. はじめに

ニュージーランド南島の最大都市クライストチャーチ地域で発生した二つの地震 (2010年9月4日, ダーフィールド (カンタベリー) 地震 (M<sub>w</sub>7.1) と2011年2月22日, クライストチャーチ地震 (M<sub>w</sub>6.1) は, 前者では地表地震断層の発生, 後者では多数の死者を伴う被害の発生という点で注目された. これらの地震については多数の論文が公表されており (たとえば, Beavan et al., 2010; Barrell et al., 2011; Dellow et al., 2011; Hancox et al., 2011; Holden et al., 2011; Quingley et al., 2010, 2012; Van Dissen et al., 2011; Villamor et al., 2012; 池田他, 2012; 遠田, 2011), また地震による地表変位や災害の写真なども公表されている (たとえば, The Press, 2011a, b). 著者らは2011年6月上旬にこれら両地域の現地観察を行った. ダーフィールド地震から9ヶ月が過ぎ, 地表地震断層の跡はかなり修復されていた. クライストチャーチ地震による被害は地震後3カ月経った後でも生々しい被害の跡が残り, 立入り禁止区域もあった. 観察期間が短く, 観察場所も限られているが, 本稿では観察から得られたいくつかの知見と問題点を, 日本の最近の被害地震との比較を含めて述べる.

### (1) ニュージーランドの地震テクトニクス

ニュージーランドは北島と南島に分かれ、北東から南西方向に向かってプレート境界が走っている(図1)。北島では、太平洋プレートがヒクランギ海溝に沿ってオーストラリアプレートの下に西南西方向に沈み込んでおり、西に行くに従って徐々に震源の深さが深くなっている。同島の東部には北北東-南南西方向の走向を持つ活断層が多数存在している。一方、南島の

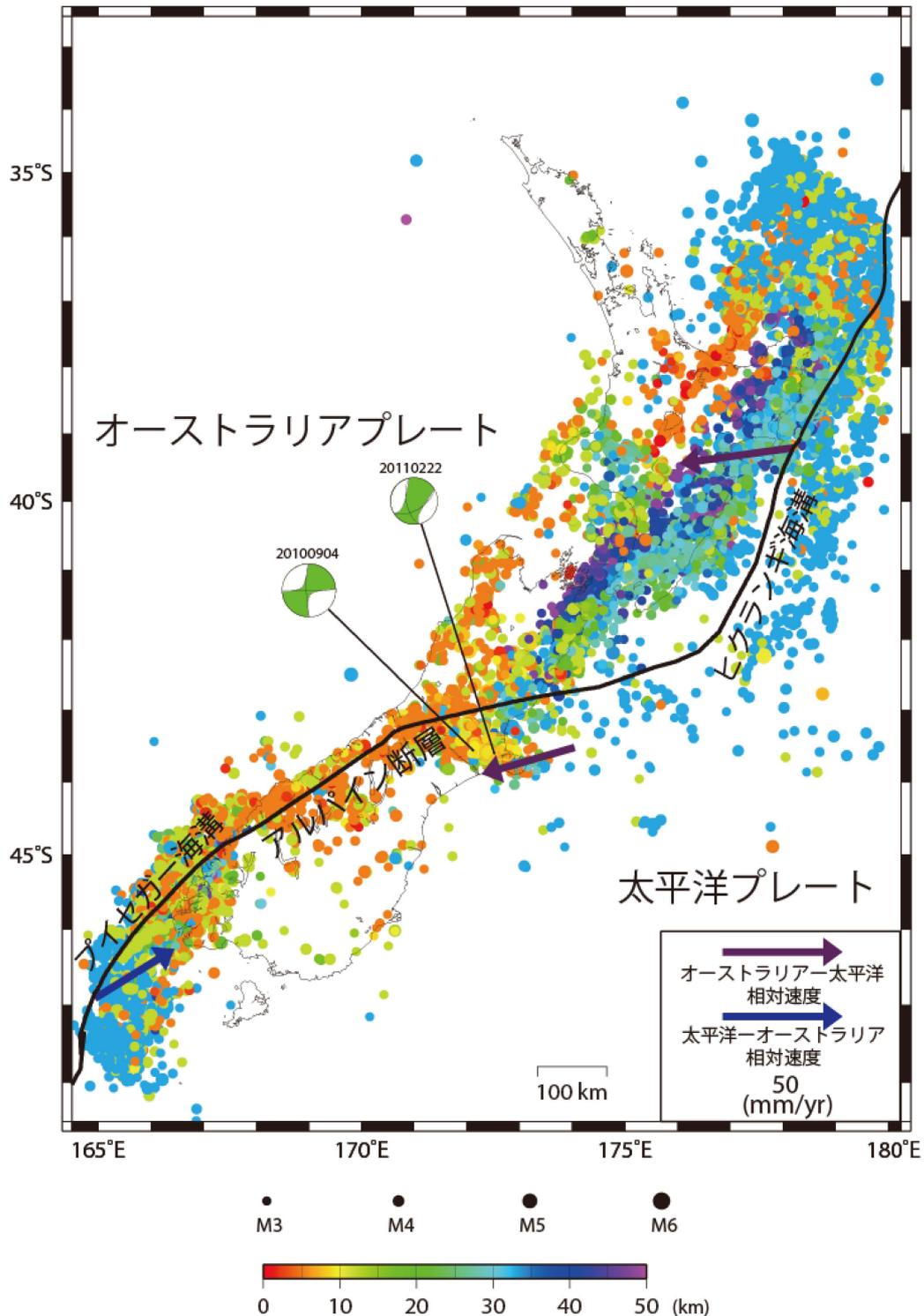


図1 ニュージーランドの地震テクトニクス図。

ニュージーランドのGeoNetによって決定された2001年1月1日から2011年6月12日までに発生したマグニチュード2.0以上、深さ50 km以浅の地震を丸印でプロットしている。丸の大きさは地震のマグニチュードの違いを、カラーで深さの違いを表している。黒い実線は地表での太平洋プレートとオーストラリアプレートとの境界線を表す。ハーヴァード大学による2010年ダーフィールド地震と2011年クライストチャーチ地震のCMT解も示す。

南西沖では、オーストラリアプレートがパイセガー海溝に沿って、太平洋プレートの下に北東方向に低角で沈み込んでいる。これら二つの沈み込み帯を繋いでいるのが右横ずれのトランスフォーム断層であるアルパイン断層である。この断層は南島の北西部を走り、地震活動も活発である。アルパイン断層下では、深さ 40km を超えるような地震はほとんど起こっていない。南島の北東部におけるプレート相対運動速度は 4.0cm/yr で、西南西方向を向いている。

2010 年 9 月と 2011 年 2 月の地震によって大きな被害を受けたクライストチャーチは、アルパイン断層から約 70 km 離れた南島の東海岸沿いに位置するニュージーランド第 2 の都市であり、これらの地震はアルパイン断層の活動とは関係のない地震であった。以下、これら二つの地震の概要とクライストチャーチに被害をもたらした過去の地震について述べる。

## (2) 2010 年ダーフィールド (カンタベリー) 地震

ニュージーランド地質・核科学研究所 GNS Science

(<http://www.Geonet.org.nz/earthquake/historic-earthquakes/top-nz/quake-13.html>) によれば、ダーフィールド地震は 2010 年 9 月 4 日、現地時間午前 4 時 35 分に発生した。震源の緯度、経度はそれぞれ、43.53° S, 172.17° E、震源の深さは 10 km であった。地震のマグニチュード(Mw)は 7.1 で、ハーヴァード大学の CMT 解を図 1 に示す。メカニズム解は、ニュージーランドの GeoNet によるものが逆断層型、USGS によるものが横ずれ断層型となっているが、両者とも P 軸が北西—南東方向を向いている。この地震により、東西方向の地表地震断層が生じた(後述)。余震分布は、本震の当日、東西方向に 22km の長さにわたって線状に広がったが、時間とともに徐々に東西方向に広がり、長さ 60km を超えた(図 2)。多くの余震のメカニズム解も決定されており、ほとんどの余震が横ずれ断層運動を示している。地震の最大震度は改正メルカリ震度階(MM)で 9 を示しており、震央付近での最大加速度は 1.3g で、クライストチャーチ中心部では 0.3g 以下であったが、クライストチャーチの建物の被害は甚大であった。Beavan et al. (2010) は、GPS データと ALOS/PALSAR 画像のデータを用いて、断層モデルを推定した。彼らは走向、傾斜の異なる 6 枚の断層面を配置し、各断層面上でのすべり分布を求めた。東西方向に近い走向を持つ 3 枚の高角な断層面では右横ずれが卓越し、残りの 3 枚の断層は北東—南西方向の走向を持ち、逆断層すべりが支配的であり、複雑な破壊過程を示している。これらの断層のうち、高角な断層面をもつダーフィールド断層深部で右横ずれ成分を持つ最大すべり量が求められており、その量は 5 m を超えている。

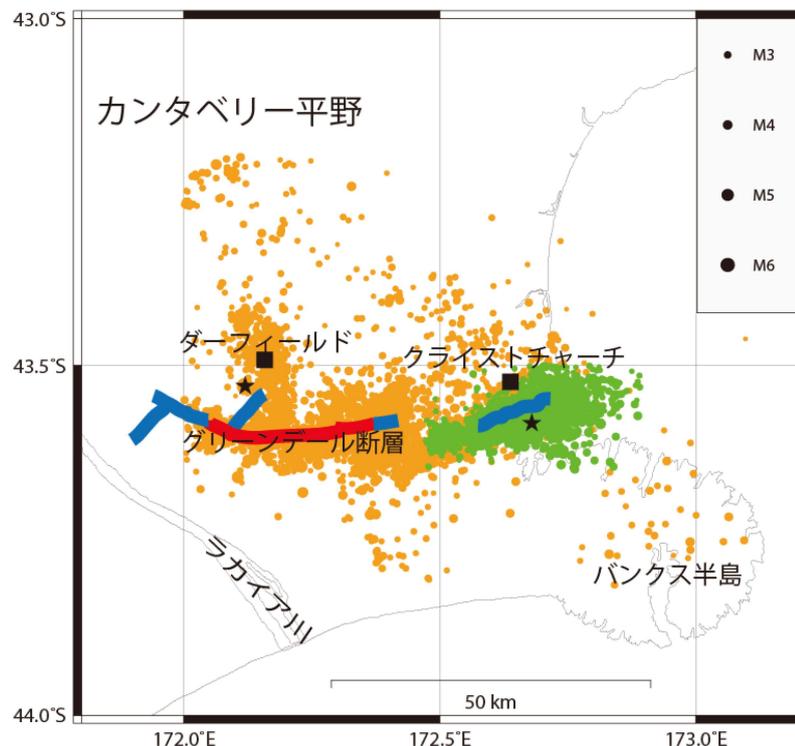


図 2 2010 年ダーフィールド地震および 2011 年クライストチャーチ地震の震央および余震の分布。

2つの地震の震央を黒色の星印で示している。オレンジ色の丸がダーフィールド地震(2010年9月4日~2011年2月21日)の震央を、緑色の丸がクライストチャーチ地震(2011年2月22日~2011年6月12日)の震央を表している。丸の大きさが地震のマグニチュードの違いを表している。青色の太線は推定された断層面上端の地表投影を、赤色の太線は地表地震断層を表している。

### (3) 2011年クライストチャーチ地震

この地震は2011年2月22日、現地時間の12時51分に発生した (<http://www.Geonet.org.nz/earthquake/historic-earthquakes/top-nz/quake-14.html>)。震源の緯度、経度はそれぞれ、43.58° S, 172.68° E, 震源の深さは浅く5 kmで、震央はクライストチャーチの中心部から約7 km南東に離れたところに位置していた。この地震の地表地震断層は見つかっていない。地震のマグニチュード(Mw)は6.1、ハーヴァード大学による地震のCMT解は横ずれ成分を含む逆断層型を示し、P軸は東南東-西北西方向を向いていた(図1)。余震は約20 kmの長さにわたって発生し、その分布は東北東-西南西方向であることから、本震は右横ずれ成分を含んでいると考えられる。比較的大きな余震のメカニズム解も決定されており、ほとんどが東南東-西北西方向にP軸を持つ、横ずれ断層であった。最大震度はMM9であった。重力加速度は震央付近で2.2gであったが、クライストチャーチ中心部では、0.5~0.8g程度であった。橋本(2011)はALOS/PALSARの画像解析を行い、この地震の断層パラメーターを推定している(表1)。得られた値は地震のメカニズム解とも調和的であり、平均すべり量は1.6 mと推定された。クライストチャーチ地震は、2010年ダーフィールド地震から5カ月後に発生したとはいえ、クライストチャーチ地震の震源域で2010年ダーフィールド地震の余震が2011年2月22日以前に発生していることから、2010年の地震の余震と考えられる(Beavan氏 私信)。遠田(2011)もこれをダーフィールド地震の最大余震とみなしている。

表1 2011年クライストチャーチ地震の断層パラメーター(橋本(2011))

長さ(km)	幅(km)	断層上端までの深さ(km)	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)	すべり量(m)
8	8	2	59	64	143	1.6

### (4) クライストチャーチに被害をもたらした過去の地震

Brown and Weeber(1992)によれば、1853年のヨーロッパ人のクライストチャーチへの入植以来、クライストチャーチに揺れをもたらした地震は10回程度知られており、その要約は以下のようである。主な地震は、1869年6月5日、1870年8月31日、1888年9月1日、1929年3月9日に発生した。1869年の地震では、MM7の揺れをクライストチャーチにもたらし、政府系のビルで煙突が崩落し、漆喰にひびが入った。セントジョーンズ教会の石造りの尖塔全体にひびが入ったが、これは市内でもっとも大きな被害であった。1870年の地震は、1869年の地震より震源が深く、より広い範囲に揺れをもたらした。クライストチャーチでの震度(MM)はせいぜい6であり、家や店の中のもの落下するなどの被害があった。また、鉄道駅の近くでいくつかの煙突の上部が回転した。1888年の地震(北カンタベリー地震)は4時15分にクライストチャーチの約100 km北で発生し、震源の緯度、経度はそれぞれ、42.6° S, 172.55° E, 深さは12 kmであった。この地震は、マルバラ断層帯のホープ断層で発生し、最大2.6 mの右横ずれを記録した。地震のマグニチュード(Mw)は7.1、最大震度(MM)は震央付近で9であった。クライストチャーチでは、クライストチャーチ大聖堂の石造りの尖塔の最上部が崩落し、多くの家で、煙突やガラスが壊れた。1929年の地震(アーサーズパス地震)は、現地時間の22時50分にクライストチャーチの約100 km北西で発生した。震源の緯度、経度は、それぞれ、42.84° S, 171.83° Eで、深さは11 kmであった。地震のマグニチュード(Mw)は7.0、最大震度は震央付近でMM9であった。震央付近では、煙突や家具が転倒した。クライストチャーチでの震度(MM)は6であった。

以上のように、クライストチャーチでは歴史地震による被害が数回記録されており(池田他, 2012)、最近の二つの地震による被害がはじめてもたらされたものではない。しかし、地表地震断層の発生(2010年ダーフィールド地震)や大規模な災害(2011年クライストチャーチ地震)という点からみると、これら二つの地震は重要な意味をもっている。

## 2. 2010年ダーフィールド地震による地表地震断層(グリーンデール断層)

### (1) グリーンデール断層の概要

2010年のダーフィールド地震により、クライストチャーチの西方で、砂礫層からなる沖積低地を横切るほぼ東西方向、長さ29.5±0.5 kmの地表地震断層(Quingley et al., 2012)が現れた(図2)。地表地震断層の出現は北島の火山帯で起こった1987年のエッジカム地震(Mw6.5)以降ニュージーランドではじめての出来事である。本地表地震断層はグリーンデール断層と呼ばれる(Quingley et al., 2010; Van Dissen et al., 2011)。本断層は、後氷期の沖積低地を切る右横ずれを主とし(平均2.5 m, 最大5 m)、縦ずれ(おもに南上がり、最大1.5 m)を伴う。雁行する地表地震断層群は左ステップを示す(図3)。地表変形の状態はLiDAR画像によって明瞭に示され、バルジ状の高まりを伴う(図4)。本地表地震断層は、現地の研究者により詳しく記載されている(Quingley et al., 2010; Quingley et al., 2012; Van Dissen et al., 2011, Barrell et al., 2011など)。本地表地震断層は、牧草地を通っているため人的な被害はなかった。ただ、断層上の家屋の土台がずれた場所があるが倒壊家屋はない。家屋の被害と構造との関係についても論じられている(Van Dissen et al., 2011)。

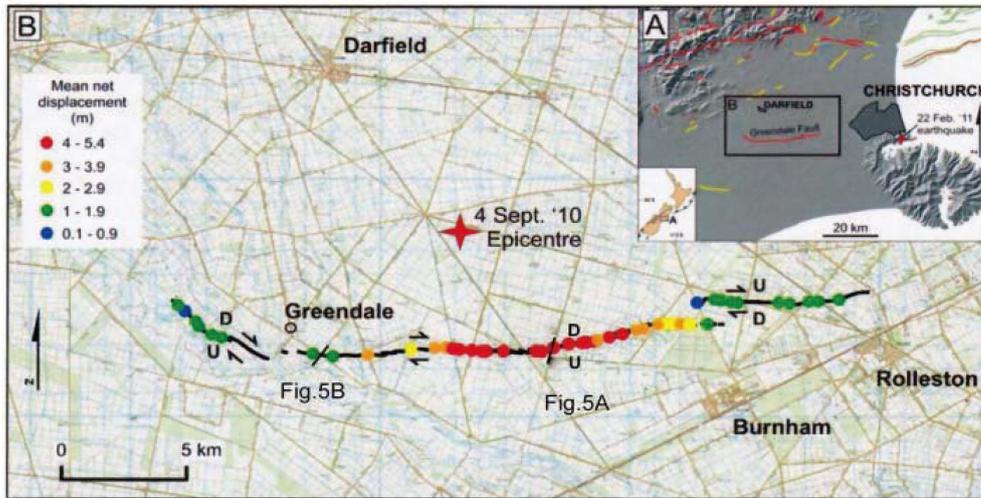


図3 グリーンデール断層の地表トレースと水平変位量の分布. U, D 上下ずれのセンスを示す. Uは隆起側, Dは低下側を示す (Holden et al., 2011). 図5A, Bの位置も示す. 挿入図はクライストチャーチ地域および海域での既知の活断層 (赤) および活褶曲 (黄色) (上記文献による).

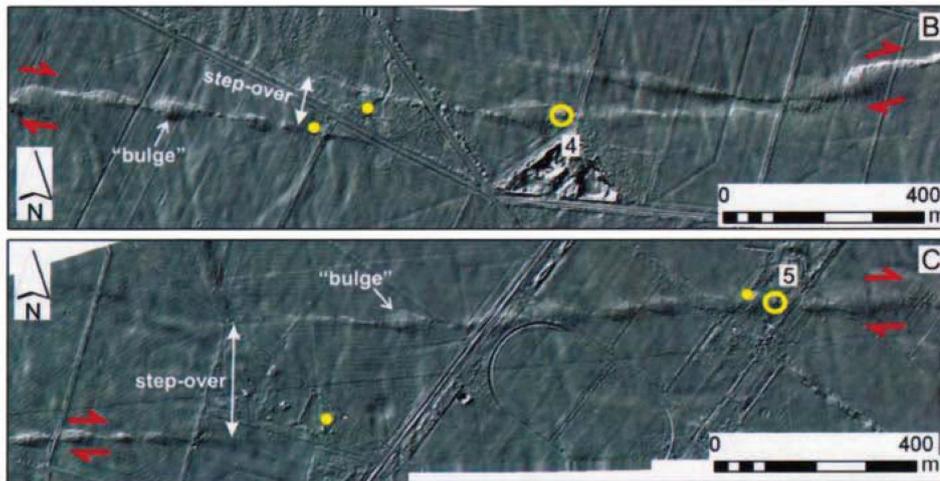


図4 グリーンデール断層の地表トレース例. 細長いバルジの存在と雁行する断層の左ステップを示す. LiDAR ライダーに基づく. 黄色の印は被害を受けた建物の位置 (Van Dissen et al., 2011).

著者らが訪れたときには地表地震断層による食い違いによる道路のずれの跡は補修され、黒々としたアスファルトがそこで起こったずれの跡を示していた (写真 1A). 道路上的での縦ずれはある程度平滑化されていたが、横ずれの跡は電柱の配列の異常、水路のねじれなどとして明瞭であった (写真 1B). 現地の研究者によりこの地表地震断層の平面形は詳しく記載され、LiDAR 画像も多く示されている (たとえば (図 3)), しかし、断層を横切る断面形は図示されていなかったため、断層崖の形状を知る一助として断層崖を横切る 2 測線で計測を試みた (図 5). 測線位置は図 2 に示す. いずれも断層を横切る道路上での簡易計測で、距離は巻尺で 5m 間隔、高さは眼鏡つきハンドレベルとテープによって cm 単位まで読み取った. 測定誤差は、位置で  $\pm 10$ cm, 高度で  $\pm 5$ cm 程度である. 断面 A はもっとも変位量が大きかったグリーンデール断層中央部の地点で、断面 B は西端に近い地点である. 両断面形はなだらかな凸形を呈し、一見逆断層による撓曲崖のように見える. しかし、既存研究で示されているように、断層の配列および右横ずれ量は縦ずれ量より大きいことから、主成分は右横ずれ断層である. 上下変位の量は、最大変位を示す中央部の断面 A 付近で 95cm, より変位量の小さい西部の断面 B 付近では 55cm とされ (Qingley et al., 2012), 著者らの計測結果よりかなり小さい. 著者らの計測に関して、どれを変位量とみなすかについての地形学的検討、地震前と地震後の比較などについての考察が欠けているが、一つの資料として提示した.

地表地震断層による変位が右横ずれを主とし、縦ずれを伴うという点では、1995 年兵庫県南部地震 (M7.3) の際に活動した野島断層による地表地震断層の場合と同様であるが、野島断層ではシャープな断層崖がより明瞭に現れていた (たとえば Ota et al., 1997) のに対し、グリーンデール断層の場合は図示したようななだらかな断面を呈していた. これは、野島断層



A 黒いアスファルトの部分が変位した幅を示す。



B 右横ずれ変位

写真1 グリーンデール断層中央部（いずれも2011年6月3日撮影）。

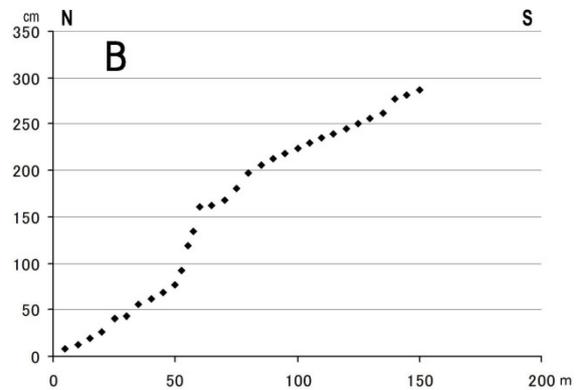
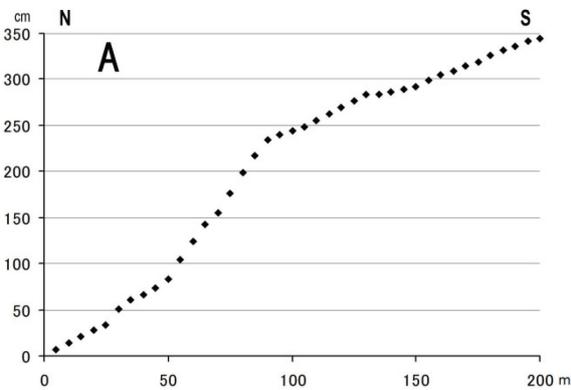


図5 グリーンデール地震断層を横切る実測断面図（2011年6月5日測量）。断面の位置は図3に示している。

による地表地震断層が固結した大阪層群を基盤とし、薄い砂礫層からなる段丘面を切っているのに対し、グリーンデール断層は厚い未固結の砂礫層を変位させていることによるためと思われる。

## (2) グリーンデール断層に関連する問題点

本地表地震断層が注目された理由の一つは、これが既知の活断層上で起こったものではないということである。最終氷期以降に堆積した平野上に何ら活断層を示す痕跡がなかったことから、最近約15,000年間動かなかった断層が長い静穏な期間の後で活動し、活断層の再来間隔がきわめて長いことを意味する。ニュージーランドでは他にも極めて長期間動かなかった断層が地震で動いた例もある。例えば、南島北西部のホワイトクリーク断層は地質境界の断層であるが、最終氷期の段丘群には何ら変形はなく、1929年の地震ではじめて河成段丘を横切る地表地震断層が現れた (Berryman, 1980)。これと似たようなことは日本でも言える。2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)の際には、今まで活断層のトレースが図化されていなかった場所に地表地震断層が生じ、既存活断層の存在が追認され、トレンチ調査によって複数回の古地震の跡が見出された (例えば、鈴木他, 2008)。最近の例では、2011年4月11日の福島県浜通り地震(M7.0)で、活断層として認定されてはいたが長期間活動のなかった井戸澤断層及び湯ノ岳断層が地表地震断層を生じさせた例もある。このように、既知の活断層はわからなかった、または変位速度が極めて小さい、あるいは活動間隔が長い断層でも地震活動の可能性があり、災害を起こすという認識は重要である。このことは、日本でも、今までで主な調査対象とされていた活動度の高い内陸の活断層 (活動度AまたはB級) だけでなく、数多い活動度C級の活断層にも注意を向ける必要があることを示唆している。

上記のように、グリーンデール断層は“未知の断層”が活動したわけであるが、カンタベリー平野または周辺には本当にまったく活断層がなかったのだろうか? 既存の活断層資料によると (図3, 挿入図) カンタベリー平野の周辺には段丘または丘陵地を切ってほぼ東西ないしは東北東～西南西に走る活断層があり、東方海底にも海底活断層がある。したがって、たとえカンタベリー平野自体に活断層が見つからなかったとしても、周辺活断層による地震の発生がまったく問題にならないはずはなかった。実際、1(4)節で要約したように、クライストチャーチに被害をもたらした地震は数回知られている。しかし、この

地域ではそのようなまれに起こる断層活動よりも、アルパイン断層の一部の活動によって発生するであろう大きな地震によって影響を受ける可能性の方が論じられていたのである (Brown and Weeber, 1992).

ところで、クライストチャーチ地震では地表地震断層は起こらなかったのだろうか？この地震の震央がクライストチャーチから7 kmしか離れておらず(図2)、地震による建物の被害が大きかったため、地震直後には地表地震断層が現れたかどうかについての情報が混乱していた。しかし、クライストチャーチ地震では地表地震断層は現れなかった。ではなぜ現れなかったのか？地震の被害の大きさを考えると現れていてもよさそうであるが、マグニチュード(Mw)が6.1と小さかったために地表地震断層は起きなかったとされる。マグニチュード(Mw)が6.5の1987年のエッジカム地震(震源の深さ8km)では地表地震断層を生じており、地表地震断層の出現に関しては、今後、マグニチュードや震源の深さの違いを考慮した検討が必要である。

### 3. 地震による被害

#### (1) 両地震による被害の比較

ダーフィールド地震の際には地表地震断層が注目され、被害については十分に理解されていなかった。グリーンデール断層上には建物がわずか12戸しかなく、それらが倒壊しなかった、というニュースが印象的であったからであろう。しかし、震動による災害は、ダーフィールド地震の震央から東に位置するクライストチャーチ及びその東方でも大きく、煉瓦建ての建物の倒壊もあった。また、液状化による被害はエイボン川の沿岸に集中していた。それに対して、都市の直下に震源をもつクライストチャーチ地震による液状化は、都市内を横切る主要河川であるエイボン川、ヒースコート川などの河川沿岸だけでなく、極めて広範囲に発生し、建物や道路の被害も顕著であった(The Press, 2011a, b; カンタベリー地域局の非公開資料)。クライストチャーチ地震では市内でも建物が崩壊しており、特に煉瓦造りの建物の被害が顕著であった。また、ダーフィールド地震の際には部分的に被害を受けたが倒壊しなかった建物が、今回の地震で全壊したという話を聞いた(エイボン川下流での住民による聞き取り調査による)。同様に、2004年の新潟県中越地震(M6.8)では部分的な被害のみで持ちこたえた家屋が、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)では全壊したという話がある(柏崎市内での聞き取り調査による)。このように同じ地域で異なる地震を経験した場合、あるいは度重なる余震を経験した場合に、被害はどのように拡大されるのか、また地震の後、降水があった場合にどのような二次的な災害が起こるのか、を考えさせられる事象と言える。

#### (2) クライストチャーチ地震による被害

この地震によって地表地震断層は生じなかったため、地震による被害はもっぱら震動によるもので、それは、(1) 沖積低地での建物の倒壊、(2) 斜面崩壊や落石による被害、および(3) 液状化に伴う災害に大別される。図6は以下の本文に記した主な地名と写真の位置を示したものである。

##### a) 沖積低地上での建物の倒壊

震央直近では震動が激しく(震央から約1 kmの場所での震度(MM)は10に達した)、それによる建物の崩壊が目立った。市内の建物の崩壊による圧死者は182名に達した。報道でも注目された建物の倒壊は市の中心部にある大聖堂付近のCTV(カンタベリーTV)で顕著であり、ここでは28名の日本人を含む多くの方が倒壊した建物の下敷きになり亡くなった(写真2A)。この付近をはじめ都心部の倒壊した建物の跡は著者らが現地を訪れた2011年6月の時点で立ち入り禁止であったため詳細なことはわからないが、この建物の隣のビルや、道路を隔てた向かい側のビルは目立った被害が認められなかった。

このような選択的な建物の倒壊は市内の多くの地点で見出された。立ち入り禁止地域以外のところを多数東西方向あるいは南北方向に歩いたが、古い煉瓦造りの工場や教会などの全壊が目立った(写真2B, 3A)のに対し、すぐ隣の新しいビルは一見全く被害がなかった(写真3B)。一方、特に煉瓦造りの建物の倒壊は顕著で、これは2010年、2011年双方の地震に共通している。これらのことは、建物の倒壊は地盤の違いによるものではなく、もっぱら建物の強度の違いによることを意味する。このような現象は1995年兵庫県南部地震(M7.3)の際や、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)の際に都市部でみられた現象と似ており、耐震性のある建物の安全性があらためて認識された。

##### b) 斜面崩壊や落石による災害

クライストチャーチ地震による災害の特色の一つは斜面崩壊や落石によるものである。このような斜面災害が起こったのは震央直近のポートヒルズを中心とする地域である。図6はポートヒルズ周辺での落石と斜面崩壊の分布を示す(Dellow et al., 2011; Hancox et al., 2011)。これらは線状に分布し、海岸沿い及び谷沿いの沖積低地に沿って入り込んでいる。これらはポートヒルズ付近の地形と密接に関係している。すなわち、クライストチャーチ南東に突出するバンクス半島は新第三紀の玄武岩質の火山岩からなる古い火山で、それを刻んで多くの谷があり、谷は後氷期の海進によって大小の入り江となった。谷沿いには沖積低地が発達している。火山斜面の末端は後氷期海進によって急峻な海食崖(高さは70 mに達する)とその基部には



図6 本文で示した地名、写真の位置および主要な災害発生地点を示す図。元図はグーグルの図を使用。赤の星はクライストチャーチ地震の震央、赤の破線は斜面災害の起きた地域の北限を、青の丸はポートヒルズ北部における斜面崩壊と落石の分布 (Dellow et al., 2011, Hancox et al., 2011) を示す。



A 市の中心部。日本人を含む多くの死者が出た建物跡 (CTV)。倒壊した建物はすっかり取り除かれている。隣接する建物は無事であった。



B 倒壊した市内の煉瓦建ての教会(セントルクスアングレアン教会)

写真2 クライストチャーチ市内での建物の被害 (2011年6月4日撮影)

小規模ながら海成段丘が形成された。集落はこの火山斜面の末端まで発達し、崖下の低地にも家屋が密集している(写真4A, 4B, 4C)。落石と斜面崩壊の線状の分布はこのような地形を反映している。すなわち、火山斜面末端の海食崖やその延長の谷沿いの急崖で、多数の落石が起きたと考えられる。ポートヒルズ地域の海岸沿いの集落はこの急崖の直下であり、震動によって生じた落石により建物は崩壊し、または埋没し(写真5A, 5B)、場所によっては、崖下から70m程度の水平距離まで落石の影響を受けた。急崖の一部は1900年代に行われた道路資材採取のための採石によって人工的に急峻となり、落石や斜面崩壊の発生を促進したと考えられる。



A 全壊した煉瓦造りの工場。



B その隣で無傷であった新しい建物

写真3 建物の差異による被害の差を示す写真(2011年6月4日撮影)



A 遠景は火山斜面の末端まで連なる家屋群。近景はサムナーの沖積低地に密集する家屋群(2011年6月4日撮影)。



B 同地点付近での急斜面での崩落(読売新聞社, 2011年3月4日撮影)。



C 同地点付近 既存の急崖上に起こった斜面崩壊。崖直上の家屋は破壊した。崖下には崩落物質がたまり、一部の家屋は埋積された(読売新聞社, 2011年3月4日撮影)。

写真4 リッチモンドヒル付近の地形と建物の被害

斜面崩壊の関係する被害は崖下だけではない。郊外には古い火山斜面上に多数の新しい住宅地が発展し、それらは崖の真上まで達している。斜面上では海の見晴らしがよいために高級住宅地が展開したのであろう。この中で、急崖直上の家屋は新たに生じた崩壊によって家屋が全壊ないし半壊し、道路の破壊も著しかった(写真6A, 6B)。

また家屋が倒壊しないまでも崩壊の背後側には多数のひび割れが生じ、家屋に被害を与えていた。このような現象を見ると、地震時の災害は震動による直接の結果ではあるが、実は人災と言ってもよい。なぜなら、急斜面上端や崖直下に家を建てなければ、これらの災害は避けられた可能性があるからである。ニュージーランドの人々は一般に自然への関心が強いと聞くが、家を建てる時に急斜面付近での災害を考えなかったのが不思議である。同じ斜面上の災害でも、丘陵地の地すべりの跡しか居住に適した平坦な土地が得られなかった新潟県長岡市の旧山古志村とは大きく異なる。このように、建物の建築にあたって斜面崩壊を考慮した建物の建築規制が必要なことを著者らは痛感した。しかし、住民にとってなかなか活断層を考慮した土地利用規制が受け入れられないのと同じように、斜面災害の可能性を考慮した建築規制は、活断層を考慮した規制の実現が難しいと同様に実現は容易ではない。今回の災害を考慮してそれがどのように可能であるか、今後問題になろう。

なお、ポートヒルズ周辺でも、住宅地には多数の仮設トイレが設置されていた。地震後3カ月を経たのちでも色とりどりの仮設トイレが道路上に見られ、ドアには仮設トイレの業者の広告があった。一見建物に被害がないように見える場所でも、おそらく震動や液状化によって下水施設が使えなくなり、その影響が長期間及んでいることを示していた。



A ウェークフィールド ロード



B ラエクラプレース

写真5 レッドクリフ付近での急崖で発生した斜面崩壊による家屋の破壊 (2011年6月4日撮影)



A 家屋の倒壊



B 道路のひび割れ。一部の割れ目は2010年地震による。

写真6 レッドクリフの斜面末端での被害 (2011年6月4日撮影)

### c) 液状化

液状化はダーフィールド地震(Mw7.1)とクライストチャーチ地震(Mw6.1)の双方で、クライストチャーチ地域で発生し、建物や道路の被害が生じた。震源がクライストチャーチ市の直下であった後者の方がより広域に液状化が発生し、地震直後の写真を見ると噴出した水があふれ、道路はまるで川のような状態であった(The Press, 2011b) (写真7)。クライストチャーチ市内には、北にエイボン川、南にヒースコート川の二つの河川があり、それらは概ね東方へと流下し、太平洋に注いでいる。クライストチャーチ地域は、これら両河川が蛇行し埋積した平野上に立地する。また海岸域においては砂嘴の発達と共に、その内陸側に

形成されるラグーン（潟）がある。これらの河川の蛇行帯の移動やラグーンの発達・埋積に伴い形成された市内の地盤は、泥・シルトや細粒砂が空間的にパッチ状に分布し、軟弱である(Brown and Weeber, 1992)。

クライストチャーチ地震では、上記の両河川沿いにも広域にわたって液状化が発生したが、その被害の程度に差異が認められ、ヒースコート川よりもエイボン川沿いに液状化の被害が集中しているように見受けられた。両河川の下流域はより地下水面が高く (Brown and Weeber, 1992)、液状化のリスクが高いことを示唆しており、またより軟弱なシルトなどの堆積物の分布は下流域ほど多くなることが予測される。

エイボン川沿いのエイボンサイド周辺では、蛇行流路の内側において、液状化による側方流動とそれに伴う開口亀裂、噴砂によるマウンド地形が認められた。南岸のオックスフォードテラスで著者らが観察した中で最大の開口亀裂は、亀裂の長さ 18 m、幅 1.8 m、深さ 0.5 m であった (写真 8A)。亀裂の断面からは、淘汰がさほど良くない、粘着性のシルトから極細粒砂が認められ、それに若干の細礫を含むような表層の地盤であることが理解できた。また、噴砂堆は最大長 11.4 m で、噴砂孔がある場所では幅が 1.7 m であった (写真 8B)。噴砂堆は淘汰の良い細粒砂で構成される。おそらく、このようなシルト・極細粒砂・細粒砂が互層状に地下の地盤を構成するものと考えられる。

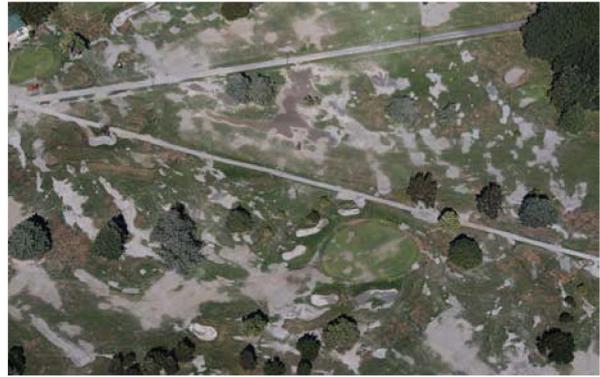


写真7 ハグレイ公園での液状化現象 (読売新聞社, 2011年3月4日撮影)



A 側方流動とそれに伴う開口亀裂



B 噴砂によるマウンド地形

写真8 エイボン川下流、オックスフォードテラスで観察された蛇行流路内側での液状化跡 (2011年6月4日撮影)

エイボン川沿いには旧蛇行流路であるホースシューレークとよばれる三日月湖状の支流がある。この旧河道の内側に位置する地区においては、液状化や噴砂による被害が顕著であった。

また、下流部のエイボンサイドドライブ、河口部のベックスレイでは、河川沿いに礫を積み上げて、一時的な堤防を地震後に設置した様子が伺えた (写真9)。これは、液状化と側方流動のために川幅が狭まり、大潮の時に川から水があふれ出したため、臨時に対策をしたとのことである。液状化したところは地盤沈下も起きており、洪水のリスクが高くなっていた。

ヒースコート川周辺においては、河川沿いの地形の河床からの比高がエイボン川のそれに比べて大きいように見えた。



写真9 地震後に礫を積み上げて設置された、河川沿いの一時的な堤防 (エイボン川下流) (2011年6月4日撮影)。

また、河床に中礫が認められることから、最終氷期に堆積した砂礫質網状河川堆積物の洗掘されたものが、周辺の地盤を構成しているのかもしれない。そうであれば、地盤の強度は若干強く、液状化の程度が押さえられたということが推察できる。

液状化による建築物への被害は、側方流動などにより、建物の基礎部分が破壊されたことによると考えられる。その他の液状化による被害は、路盤の変形、マンホールなどの地下埋設物の浮き上がり、河道の狭小化など広域かつ甚大である（写真10）。特にクライストチャーチ地震では、市の中心に位置する高層建築物のパンケーキ倒壊の被害だけが注目され、日本のマスコミを通じて伝えられた。しかしある意味でそれは局所的な現象であり、今回の地震の全容を語ってはいない（2）a）節で述べたように、震動による建物の崩壊が地盤条件とは関係なく、主に建物の強度の違いに基づくのに対して、液状化による被害は、地盤の性質の違いが主な要因であり、建物の強度とは無関係に発生し、広域な被害をもたらした。液状化では人的な被害は軽微でも、経済的な被害は大きいことを、今回の二つの地震は示している。このような液状化被害は、1964年新潟地震（M7.5）の際にも発生し、2011年東日本地方太平洋沖地震（M9.0）の際にも関東地方の臨海部の埋め立て地などで、甚大な被害をもたらした。ニュージーランドや日本の臨海の平野部は基本的に軟弱な地盤から構成されており、旧河道・旧湿地（潟）や埋め立て地の分布および地下水位を、地形やボーリングコアデータなどからあらかじめ理解しておくことが、液状化の対策や減災には重要であろう。



A 路盤の圧縮変形



B 橋の破壊

写真10 液状化による被害の状況（2011年6月4日撮影）

#### 謝辞：

今回の現地調査にあたって、ニュージーランド地質・核科学研究所の Russ Van Dissen 博士からはグリーンデール断層に関する資料の提示、説明を頂き、また文献についても多大な御教示を頂いた。また同研究所の Pillar Villamor 博士、カンタベリー地域局の Helen Grant 博士には現地で詳しく説明を頂いた。また防衛省危機管理局の Peter Wood 博士からは災害全般について長時間にわたって討論して頂いた。読売新聞社からは空撮写真の提供を受けた。図4、図6の引用、省略化についてはそれぞれ著者から許可を頂いた。稲崎富士博士、宮地直道博士、及び匿名の方には原稿に丁寧に目を通して頂き、本稿の改訂にあたり、大変有益なコメントを頂いた。以上の各位に深く感謝するとともに、1日も早い現地の被害からの回復を願っている。

#### 参考文献：

- Barrell, D. J. A., Litchfield, N. J., Townsend, D. B., Quigley, M., Van Dissen, R. J., Cosgrove, R., Cox, S. C., Furlong, K., Villamor, P., Begg, J. G., Hemmings-Sykes, S., Jongens, R., Mackenzie, H., Noble, D., Pedley, K., Stahl, T., Duffy, B., Henham, H., Klahm, A., Lang, E. M. W., Moody, L., Nicol, R. and Smith, A. (2011): Strike-slip ground-surface rupture (Greendale Fault) associated with the 4 September 2010 Darfield Earthquake, Canterbury, New Zealand. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. **44**, 283-291, doi:10.1144/1470-9236/11-034
- Beavan, J. S., Samsonov, M., Motagh, Wallace, L., Ellis, S. and Palmer, N. (2010) : The Darfield (Canterbury) earthquake: Geodetic observations and preliminary source model. *Bull. New Zealand Society. Earthquake Engineering*. **43**, 228-235.
- Berryman, K. R. (1980): Late Quaternary movement on White Creek Fault, South Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **23**, 93-101.

- Brown, L. J. and Weeber, J. H. (1992) : Geology of the Christchurch urban area: scale 1:25000. Institute of Geological and Nuclear Sciences Geological Map 1.1 sheet and 104p.
- Dellow, G., Yetton, M., Massey, C., Archibald, G., Barrell, D. J. A., Bell, D., Bruce, Z., Campbell, A., Davies, T., De Pascale, G., Easton, M., Forsyth, P. J., Gibbons, C., Glassy, P., Grant, H., Green, T., Hancox, G., Jongens, R., Kingsbury, P., Kupec, J., Macfarlane, D., McDowell, B., McKelvey, B., McCahon, I., McPherson, I., Molloy, J., Muirson, J. O., Halloran, M., Perrin, N., Price, C., Read, S., Traylen, N., Van Dissen, R., Villeneuve, M., and Walsh, I. (2011) : Landslide caused by the February 2011 Christchurch earthquake and management of landside risk in the immediate aftermath. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **44**, 227-238.
- Hancox, G., Massey, C. and Perrin, N. (2011) : Landslide and related ground damage caused by the Mw 6.3 Christchurch earthquake of 22 February 2011. *New Zealand Geomechanics News*, **81**, 53-67.
- 橋本学 (2011) : ALOS/PALSAR で捉えた 2010 年ニュージーランド南島の地震. 日本 地球惑星科学連合 2011 年大会, STT057-03.
- Holden, C., Beavan, J., Fry, B., Revners, M., Ristau, J., Van Dissen, R. and Villamor, P. (2011) : Preliminary source model of the Mw 7.1 Darfield earthquake from geological, geodetic and seismic data. *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Building an Earthquake-Resilient Society, 14-16 April, 2011, Auckland, New Zealand*, paper number 164, 1-8.
- 池田倫治・柳田誠・西坂直樹 (2012) : ニュージーランド, Mw7.1 ダーフィールド地震に伴った地表地震断層. 活断層研究, **36**, 31-44.
- Ota, Y., Azuma, T. and Kobayashi, M. (1997) Monitoring degradation of the 1995 Nojima earthquake fault scarps at Awaji Island, southwestern Japan. *Journal of Geodynamics*, **24**, 185-205
- Quigley, M., Van Dissen, R., Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., Duffy, B., Bilderback, E., Noble, D., Townsend, D., Begg, J., Jongens, R., Ries, W., Claridge, J., Klahm, A., Mackenzie, H., Smith, A., Hornblow, S., Nicol, R., Cox, S., Langridge, R. and Pedley, K. (2010) : Surface rupture of the Greendale Fault during the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, New Zealand: Initial finding. *Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **43**, No. 4, 236-242.
- Quigley, M., Van Dissen, R., Litchfield, N., Villamor, P., Duffy, B., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., Bilderback, E. and Noble, D. (2012) : Surface rupture during the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) of the Greendale Fault during the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: Implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis. *Geology*, **40**, 55-58. Doi:10.1130/G32528.1.
- 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・小岩直人・杉戸信彦・熊原康博・廣内大助・澤 祥・中村優太・丸島直史・島崎邦彦 (2008) : 2008 年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市巖美町付近の調査速報——. 活断層研究, **29**, 25-34.
- The Press (2011a) : The Big Quake, Canterbury, September 4, 2010. A Random House Book, Auckland, New Zealand, 95p.
- The Press (2011b) : Earthquake: Christchurch, New Zealand, 22 February, 2011, A Random House Book, Auckland, New Zealand, 187p.
- 遠田晋次 (2011) : ニュージーランド南島クライストチャーチにおける 2010 年 9 月の地震と 2011 年 2 月の最大余震. 第四紀研究, **50**, 157-159.
- Van Dissen, R., Barrell, D., Litchfield, N., Villamor, P., Quigley, M., King, A., Furlong, K., Begg, J., Townsend, D., Mackenzie, H., Stahl, T., Nobble, D., Duffy, B., Bilderback, E., Claridge, J., Klahm, A., Jongens, R., Cox, S., Langridge, W., Ries, W., Dhakal, R., Smith, A., Hornblow, S., Nicol, R., Pedley, K., Henham, H., Hunter, R., Zajac, A. and Mote, T. (2011) : Surface rupture of the Greendale Fault during the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, New Zealand and its impact on man-made structures. *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Building an Earthquake-Resilient Society, 14-16 April, 2011, Auckland, New Zealand*, paper number 186, 1-8.
- Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Van Dissen, R., Hornblow, S., Quigley, M., Levick, S., Ries, W., Duffy, B., Begg, J., Townsend, T., Bilderback, E., Noble, D., Furlong, K., and Grant, H. (2012) : The 2010 Greendale fault rupture map, Canterbury, *New Zealand: Application to land use planning. New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **55**, 223-230.

著者：1) 吉岡 祥一，神戸大学 都市安全研究センター/理学研究科，教授；2) 太田 陽子，国立台湾大学地質科学研究室，特聘講座教授；3) 片岡香子，新潟大学 災害・復興科学研究所，准教授

# Surface fault associated with the 2010 Darfield earthquake and disasters by the 2011 Christchurch earthquake, South Island, New Zealand

Shoichi Yoshioka

Yoko Ota

Kyoko Kataoka

## Abstract

Two large earthquakes recently attacked the Christchurch area, South Island, New Zealand. The Darfield earthquake (Mw7.1) occurred on September 4, 2010, and the Christchurch earthquake (Mw6.1) followed on February 22, 2011. We summarize the tectonic and seismic background of the area affected by these earthquakes and briefly summarize the historical earthquakes in the Christchurch area. Both earthquakes have occurred on the unknown faults, which have no record of activity for the last ca. 15,000 years. Coseismic surface fault (Greendale fault), dominated by right lateral slip with some vertical offset appeared associated with the Darfield earthquake. We show two examples of topographic profiles across this fault. Although no surface fault appeared by the Christchurch earthquake, damage by seismic shaking on the Christchurch metropolitan area, close to the location of epicenter, was remarkable. We report some aspects of damages by these earthquakes, including the occurrence of landslide, liquefaction, different damage due to the difference of material of building. Special attention is paid to the relationship between the locations of large landslides and the landform.

©2014 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.