

2016 年 11 月 13 日に発生したニュージーランド・Kaikoura 地震 M7.8 について

中村 豊 (SDR)

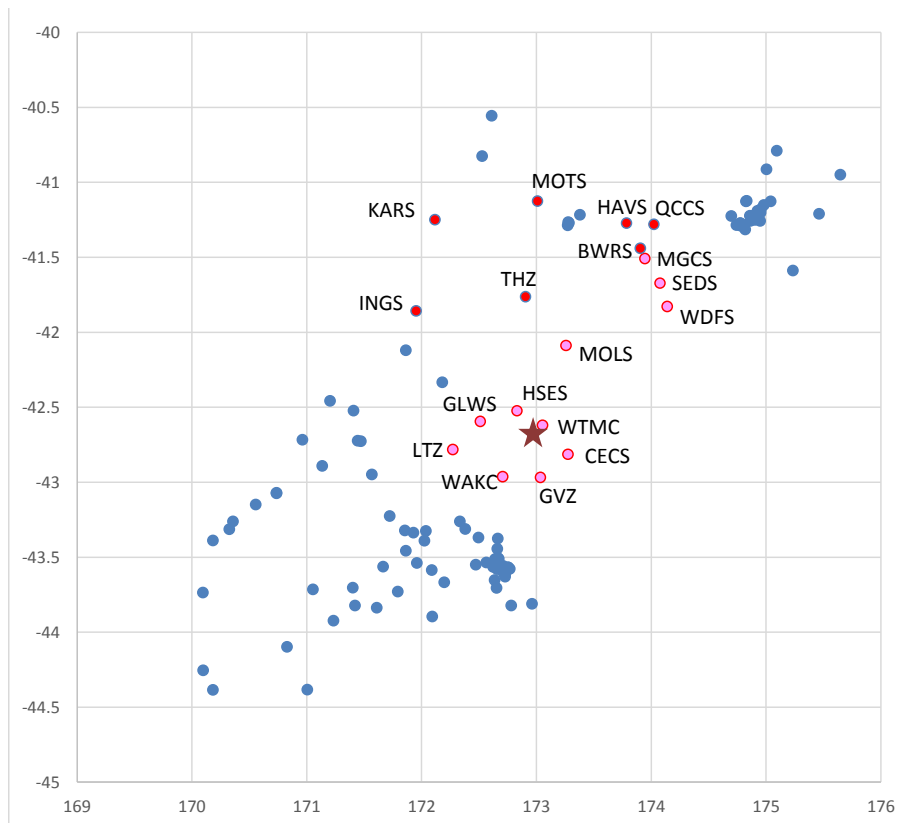


図1 GeoNet 強震観測点（一部）と震央★印

1.はじめに

2016 年 11 月 13 日に発生した Kaikoura(カイクラ)地震 M7.8 は、陸地で発生した地震でありながら 1m の津波を誘発した、珍しい地震である。強烈な地震動による被害のほか、液状化被害をはじめ多くの地盤被害をもたらしている。ニュージーランドの GeoNet は様々な観測データをいち早く公開している。SDR では、このうち強震データを用いて変位を算定し、GPS による地殻変動状況などと比較した図面を 2016 年 10 月 18 日に公開した。

ここでは、公開データを中心に分析結果を述べる。GeoNet の公開データの内、図1にピンク色で表示した 11 地点を選び、強震記録を分析した。周波数分析結果などについては、GeoNet のホームページに公開されているので興味がある方はそちらを参照されたい。ここでは、強震記録を 2 回積分して永久変位を含む変位を算定した結果や、単位質量あたりに作用する地震動のパワーを基に算定したリアルタイム震度*ならびに顕著な位相に対応する震源推定等、について述べることとする。

*)SDR 特許技術：弊社による定義の後になって別定義で
同一呼称を用いている機関があるので注意されたい。

2.強震記録の積分

選定した 11 地点の強震記録を 2 回積分して得られた変位波形を図 2 に示す。地点毎に 3 成分の変位波形を色分けして示している。青は EW 成分、緑は NS 成分でオレンジは UD 成分である。横軸は、2016 年 11 月 13 日 11 時 02 分 00 秒 (UT) からの経過時間 (秒) である。縦軸の単位は cm で、プラスの方向はそれぞれの方向成分に対して、東方、北方、上方である。地点はコード名で表している。その位置関係は、図 1 などに示されている。

破壊開始点を取り囲むように 7 つの強震観測点 (CECS、GLWS、GVZ、HSES、LTZ、WAKC および WTMC) が存在している。そして北東端には 3 つの強震観測点 (MGCS、SEDS および WDFS) が、これらの中には MOLS という強震観測点がある。通常の変位波形は WDFS に見られるように比較的シンプルな形をしているが、今回の地震では特に破壊開始点を取り囲む地点で複雑な変位波形を示している。複雑な断層運動を反映しているものと推測される。少なくとも二つの大きい断層運動があるように見える。特に後半部分の断層運動は大きく、積分結果でも WDFS では 5m 近くの永久変位量に達している。11 観測点の変位波形を各方向成分ごとに、単純に重ね書きしたものが図 3 であり、各観測点の緯度に対応させてプロットしたものが図 4 である。各地点の変位のゼロ線が当該緯度に対応するように配置した。縦線の単位は cm である。これによると、概ね WTMC より北側は東に、南側は西に変位しているように見える。また、MOLS を境に北側は北へ、南側は南へ変位しているようにみえる。上下方向については各所で隆起と沈降が入り混じっているようである。これらの変位状況を軌跡として表現したものが図 5 である。これには GPS による永久変位の算定結果も 4 地点ほど参考を示している。これを見ると、永久変位は GPS の結果と概ね整合しており、積分による変位の妥当性を示している。また、これによると、永久変位の大きさと軌跡の大きさの関係が場所により異なり、表層地盤による地震応答特性の違いなどが反映されているものと思われる。今回の地震では、数m以上の大きな永久変位が強震記録の積分によって得られているが、大きな変位は GPS や干渉法による地殻変位とも概ね整合しており、妥当な結果だと思われる。

今回の地震では、南島の北東側の海岸部分で最大 10m とかなり大きく隆起したと考えられており、接続する海底でもかなりの隆起があって津波が発生したものであろう。

なお、強震記録を積分すると発散することがある。これにはノイズや分解能の影響もあるが、ここでは、地震動によって地震計が剛体的に回

転したりパルスのな力を受けたりした結果として補正している。すなわち、地震計は地震前にも地震終了後にも停止しているとして、まず地震前の加速度ゼロ線を算定し、次に収束時間帯を指定して地震発生後の適当な時点にシフト加速度を加え、さらに必要に応じてパルス加速度を作用させている。これらは概ね自動的に行われるが、永久変位が小さい場合、不自然な結果にならないように収束時間帯や作用時間などを变化させる場合がある。この場合、恣意的な結果にならないように注意している。これまでの経験では、状況にもよるが 10cm 程度の永久変位であればほぼ正確に算定できると推測される。

3.リアルタイム震度と警報シミュレーション

選定した 11 観測点のリアルタイム震度の変化を重ね書きしたものが図 6 である。縦軸がリアルタイム震度、横軸は、2016 年 11 月 13 日 11 時 02 分 00 秒 (UT) からの経過時間 (秒) である。日本では被害が出始める震度は概ね 5 程度と考えられる。ここではこれよりもやや低い震度 4.0 の線を示し、被害が起きている可能性が高い震度 6.0 のラインを示した。多くの人が感知する震度 1.5 の線も示している。これらのうち WTMC 地点が最初に地震を検知している。

リアルタイム震度の変化を詳しく見るために、50 秒から 100 秒までを拡大して図 7 に示す。この図に示すように、FREQ 警報のシミュレーションによれば、11 時 2 分 59.4 秒 (UT) に地震動を検知した後、3 分 00 秒に警報を発することになる。この警報から WTMC 地点で震度 4 に達するまでに 2 秒、最大震度に達するまでに 6.5 秒の時間しかない。自動的に防災対応をとることができる機器であれば対応行動を開始することが可能であろうが、人間の場合には、特に訓練されていない限り、こうした短い時間を有効活用するのは難しいかもしれない。なかなか難しいことであるが、事前に起こり得る災害を的確にイメージして、対応策を考え、十分な訓練を積んでおくことが重要になると思われる。

今回の地震では、さまざまな断層が動いたようで、多くのイベントが次々に発生する状況であったと思われる。リアルタイム震度の成長状況をみると、各観測点では少なくとも二つの大きなイベントがあり、その間も階段状にリアルタイム震度が大きくなっている。WTMC 地点の他では、震度の成長は比較的緩やかで、最大動に達するまで長い時間を要している。そして 1 分程度経過した後、一段と大きなイベントが発生して、11 時 4 分になって、最初の震央から遠く離れた WTMC 地点や SEDS 地点で震度 6 程度に達している。もっとも西側の地点 LTZ を除いて、震度 4 を超すような地震動が 2 分程度継続している。LTZ 地点にしても、震度 3 程度と震度レベルは若干小さいが、2 分以上大きな震動が継続するという異常事態である。日本でいえば、東北地方太平洋沖地震の際に数分に亘って揺すられた事例が記憶に新しい。

リアルタイム震度の消長を見ると、地震動の始まりは急激であって、震央域では比較的大きな震度まで一気に成長するが、震源から離れた地域では小さな震度に留まることがわかる。震源から離れると地震動の立上りの急峻さが鈍るのは当たり前であるが、震央距離が変わっても急峻さには大きな相違がなく、むしろどこまで一気に大きくなるかに関して、イベントの規模とともに震央距離が関係しているように見える。図 7 を見ると、MOLS 地点（黄緑）と LTZ 地点（赤）には波動がほぼ同時に届いており、波動到達後概ね 10 秒間は両地点の変化状況は類似しているが、それ以後は大きく異なっていることがわかる。LTZ には 80 秒付近でリアルタイム震度が大きくなる相が認められるが、MOLS には無い。この相は CECS を除く震央周辺の観測点で認められるが、MOLS 地点にはなく、最初の破壊が WTMC 付近から西方に向かったことを示唆している。

各観測点のリアルタイム震度の変化を各観測点の緯度や経度に対応させて描画したものが図 8 である。縦軸はリアルタイム震度であるが、その最大値の位置が当該観測点の緯度や経度に対応するように描かれており、縦軸の 1 目盛が震度 1 の大きさに対応する。横軸は 11 時 2 分 (UT) からの経過時間である。これをみると、いくつかの伝搬するように見えるピークが認められ、特に最初の 60 秒～70 秒のピークと 150 秒付近のピークが顕著である。次節では、これらの発現時刻を使ってこれらの震動の源について考える。

4. 震源の検討

地震波形の初動時刻から算定される震源は、いわゆる破壊開始点である。M6 程度であれば大きな地震動エネルギーを放出する源と破壊開始点の相違はそれほど大きくはないが、M7 程度になるとその相違は無視できなくなる。地震防災の見地からは、被害発生地域を的確に特定するためにも、被害をもたらす大きな地震動の発生源を特定する必要がある。イタリア中部の地震や鳥取地震の場合でみたように、M6 程度の地震であれば、震央を取り囲む 5 地点のリアルタイム震度の立上り時間からその震源を、迅速かつ正確に推定することができた。NZ 地震でも迅速な震源推定が可能かどうかを、まず確認する。

表 1 は初動時刻やピーク時刻などを各観測点の座標やリアルタイム震度や 5HzPGA の計測値とこれから地点毎に推定した地震規模を表示したもので、表 2 は推定震源や震源時などを表示したものである。図 9 は選定した観測点の位置と、NZ 機関による震央位置、USGS による震央位置などを示したものである。ここに最初の 5 地点の P 波検知時刻から推定した震央を示しているが、その位置は NZ 震央のおよそ 10km 北西、USGS 震央のおよそ 20km 北西であり、概ね妥当な結果を示している。最初の地震検知から 5.8 秒後にはこの震源計算結果が得られることになる。

次に、70 秒前後のピークと 150 秒前後のピークの放出源を推定した結果を図 9 に○印で示している。前者を peak1、後者を peak3 としている。peak1 の推定震源は破壊開始点の西方に位置しており、peak3 の推定震源は MOLS 地点の東方約 40km に位置している。図 10 は、JAXA による ALOS-2 を用いた地殻変動解析図であるが、これに peak3 の推定震源を×印で示したものである。また、SEDS と WDFS の位置も示した。これによると、peak3 は最大 10m の隆起をした地域から 15km 程度離れた位置であり、おそらく peak3 の震源はこの最大 10m の隆起をした辺りではないかと想像される。

図 11 は、すべての強震観測点の各方向成分の最大加速度の距離減衰の状況を、破壊開始点に対応する震央からの距離に対して示したものと、同じく距離減衰状況を、peak3 に対応する震央からの距離に対して示したものの、である。これを見ると破壊開始点からの距離に対する減衰は、いくつかのイベントの影響で単純な距離減衰曲線になっていないことがわかる。これに対して、peak3 に対応する震央からの距離に対する減衰は、概ね単一のイベントに対する減衰のようにみえる。peak3 の相が主体的なエネルギー放出源に関係するものであることを示唆している。選定した 11 観測点のリアルタイム震度の最大値 RImax を破壊開始点に対応する震央距離に対して○または●で示したものが図 12 であるが、MOLS 地点から東の測点については、peak3 に対応する震央からの距離に対しても●で示した。この図によると、MOLS 地点の RImax 震度は peak3 に対応すると考えられるが、破壊開始点からのリアルタイム震度の減衰状況と比較して概ね大差はない。しかし、東方 3 点の RImax 震度は明らかに大きいことがわかる。これは、peak3 に対応する断層破壊は、基本的に MOLS などから遠ざかるように東方 3 地点に向かって進んでいることを示唆している。

5.おわりに

顕著に大きなリアルタイム震度の相に対応するピークに対応する推定震源が、合成開口レーダーによる地殻変動の中心的な場所と概ね一致したことは、被害が甚大な地域を強震記録に基づいて迅速に特定できる可能性に繋がり、非常に興味深い。うまくシステムを構築すれば、地震検知から数分で、被害甚大地区の特定や、地殻変動量を的確に把握することが可能になるのではなかろうか。強震記録の 2 回積分による地殻変動量の推定が概ね妥当であることも津波推定への関連においても興味深いものがある。海底においては GPS などによる地殻変動の把握が困難であると考えられるが、海底地震計を用いて的確な地殻変動量がほぼリアルタイムで把握できれば津波発生の的確な予測にも繋がるものと期待される。

謝辞：ニュージーランドの GeoNet の強震記録や GPS 解析結果および JAXA 解析結果を利用しています。記して謝意を表します。(以上)

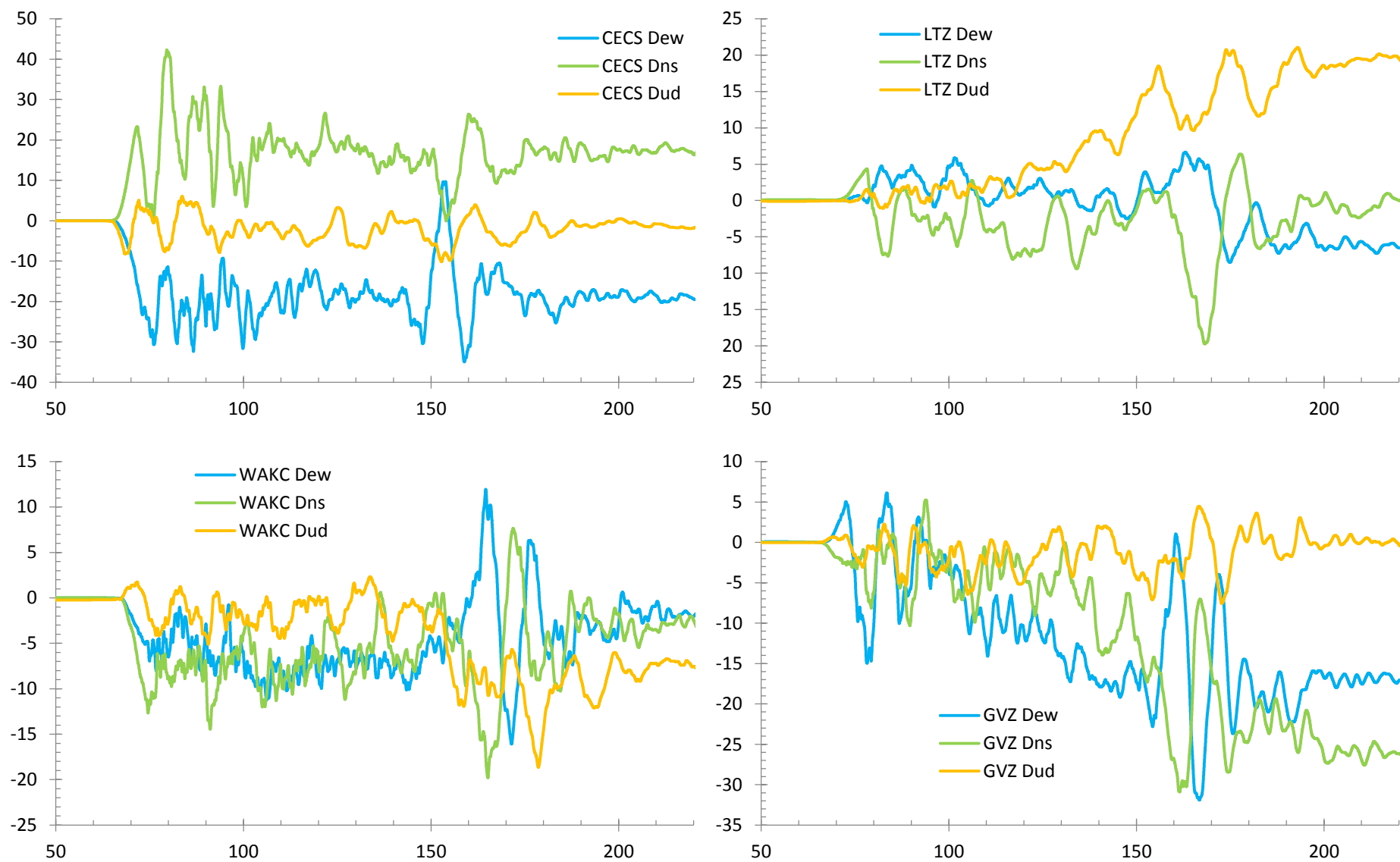


図2 強震記録を二回積分して得られた各地の変位波形 (その1)

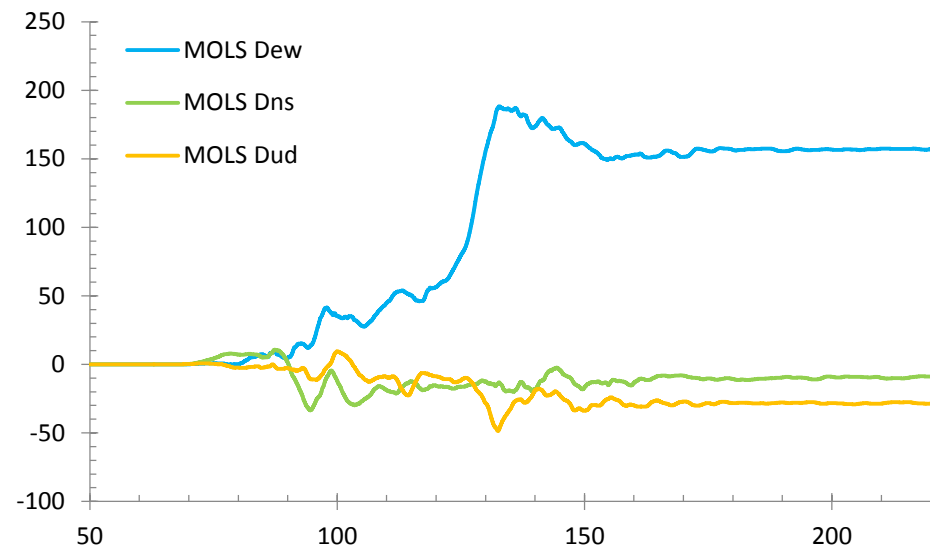
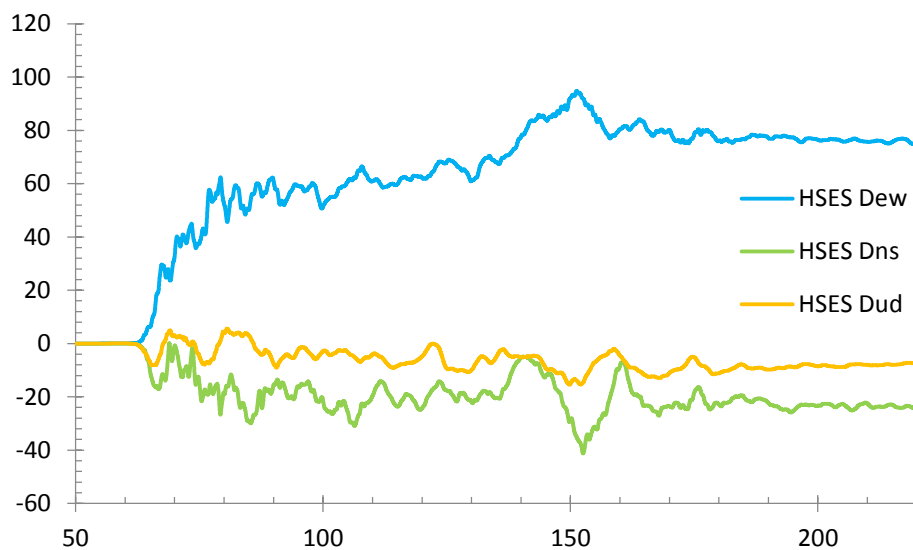
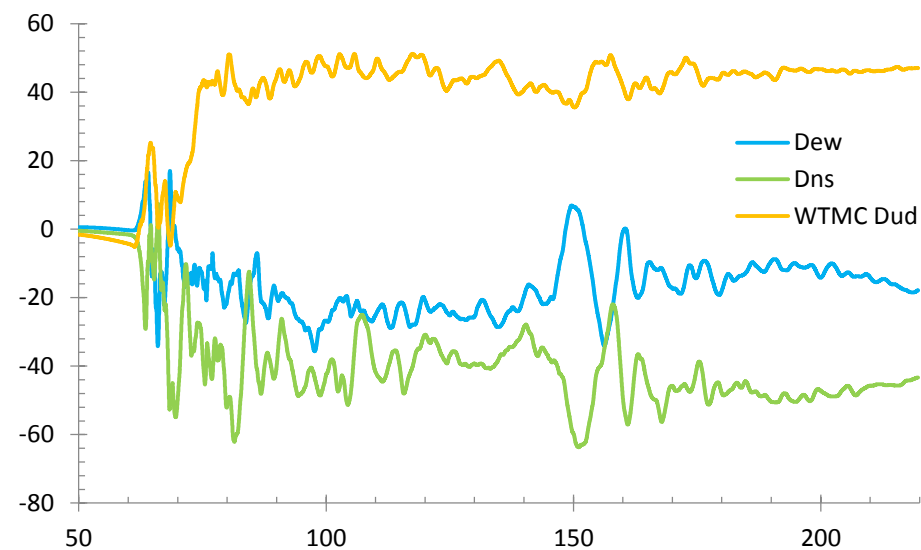
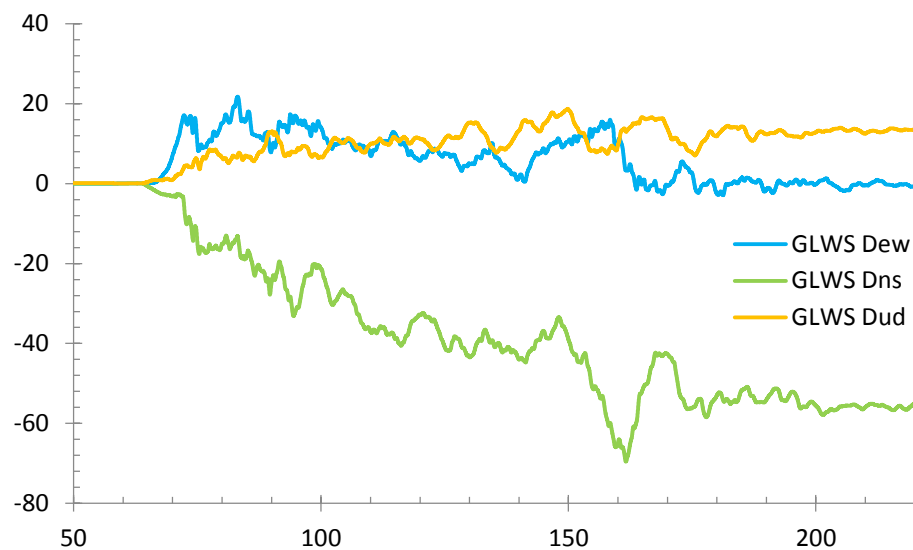


図 2 強震記録を二回積分して得られた各地の変位波形 (その 2)

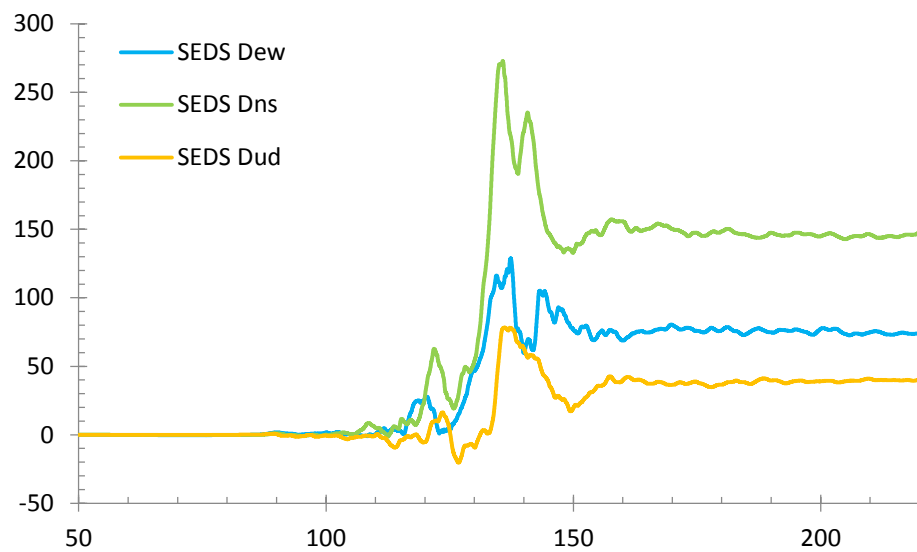
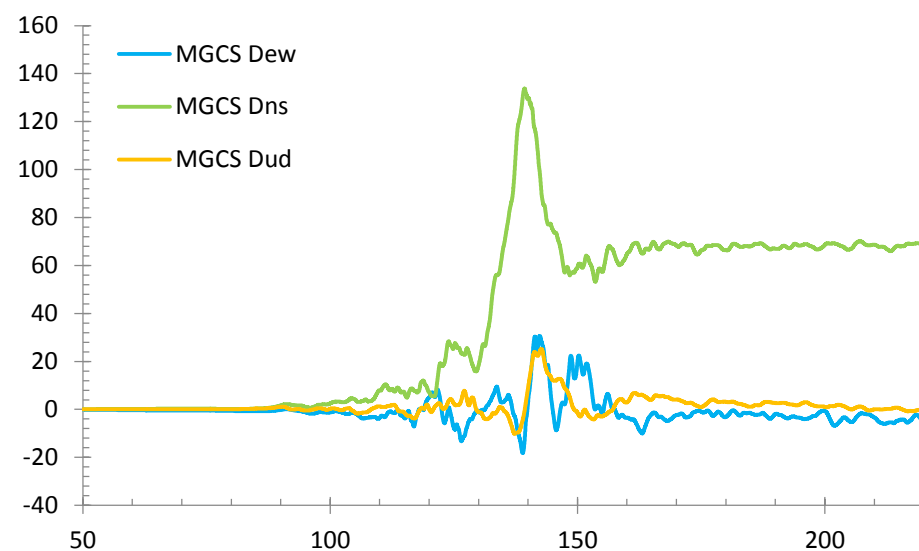
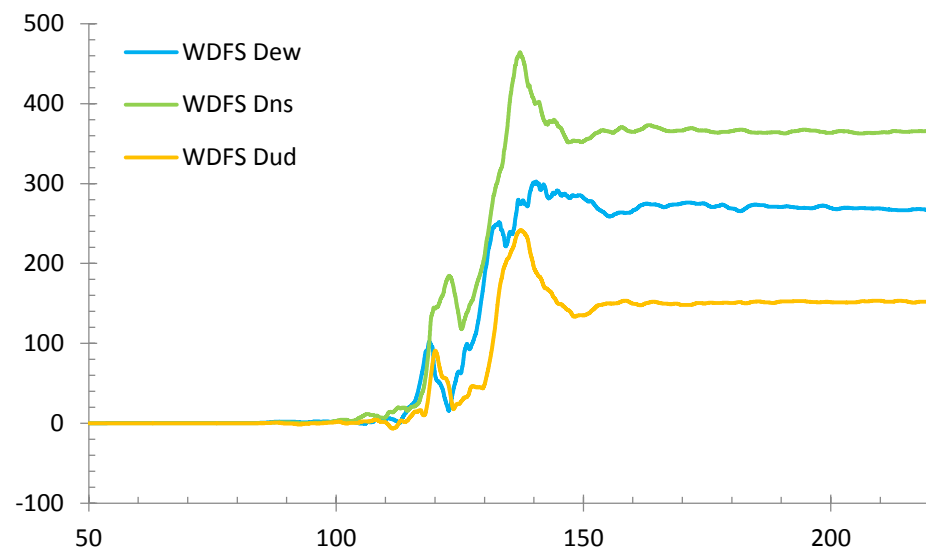


図 2 強震記録を二回積分して得られた各地の変位波形（その 3）

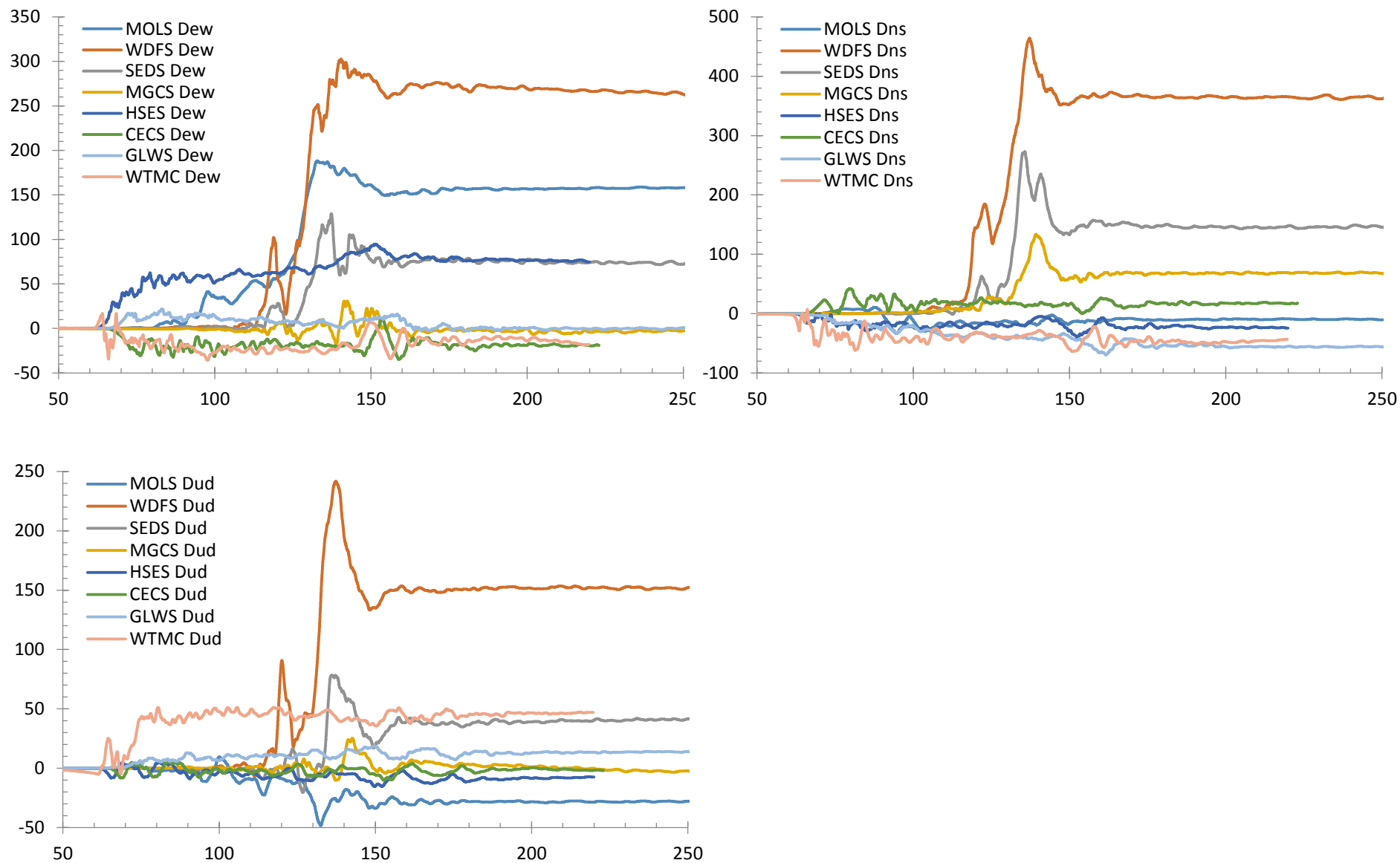


図 3 強震記録を二回積分して得られた各地の変位波形__各方向成分ごとに 11 地点を重ね描き

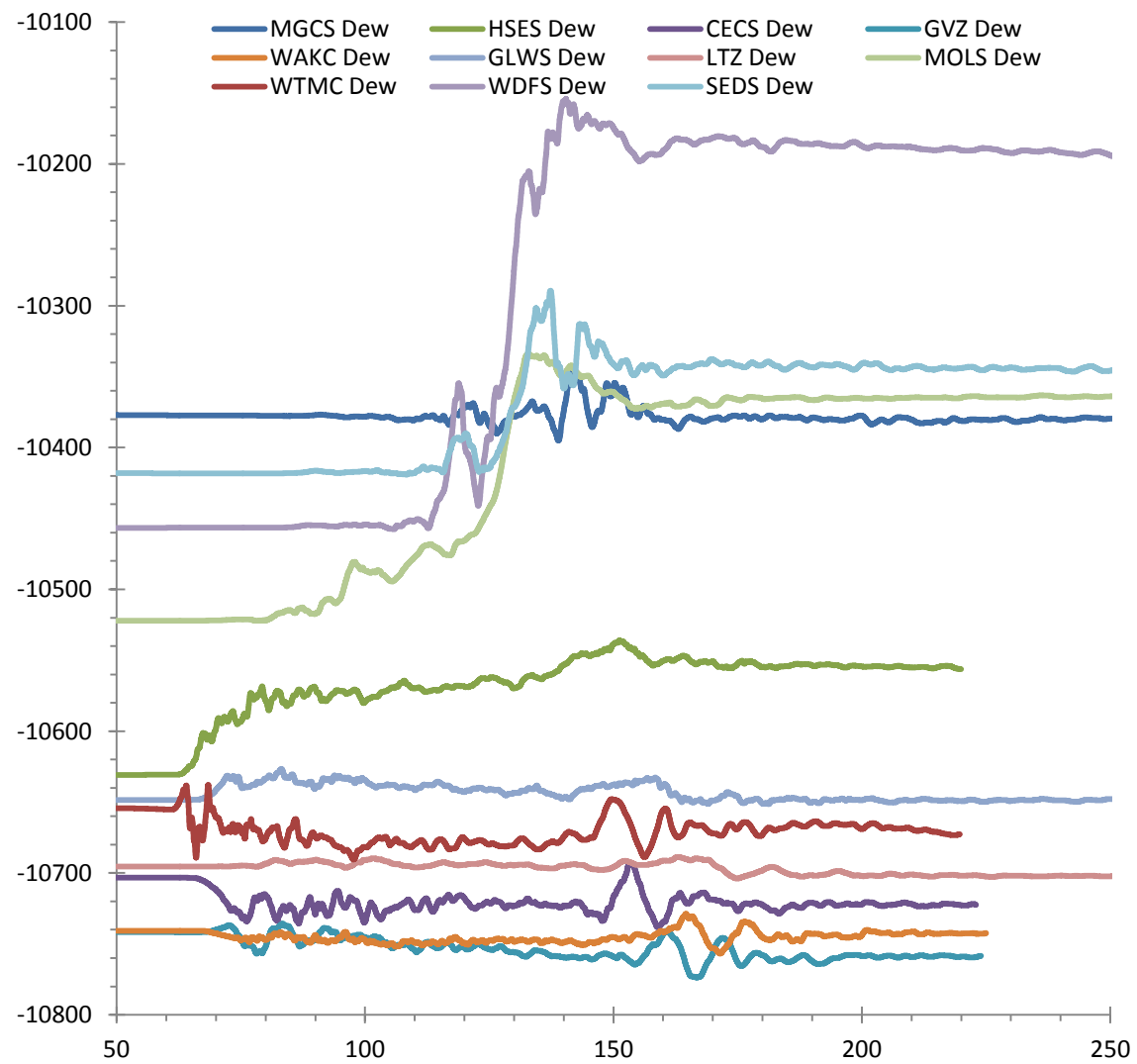


図 4. 強震記録を二回積分して得られた各地の変位波形__11 測点をそれぞれの緯度に対応させて重ね描きしたもの(その 1 東西方向)

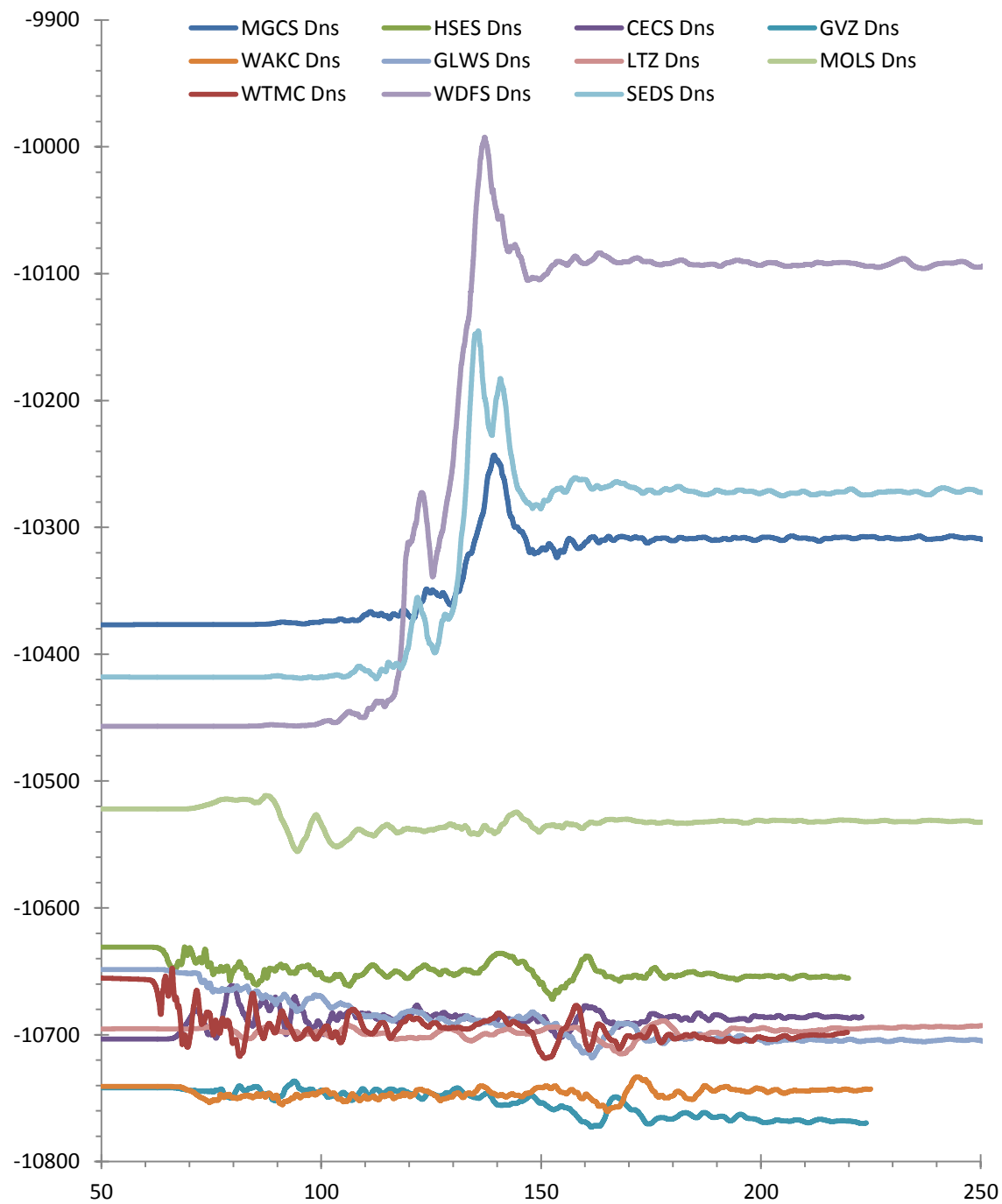


図 4. 強震記録を二回積分して得られた
各地の変位波形__11 測点を
それぞれの緯度に対応させて
重ね描きしたもの(その 2 南北方向)

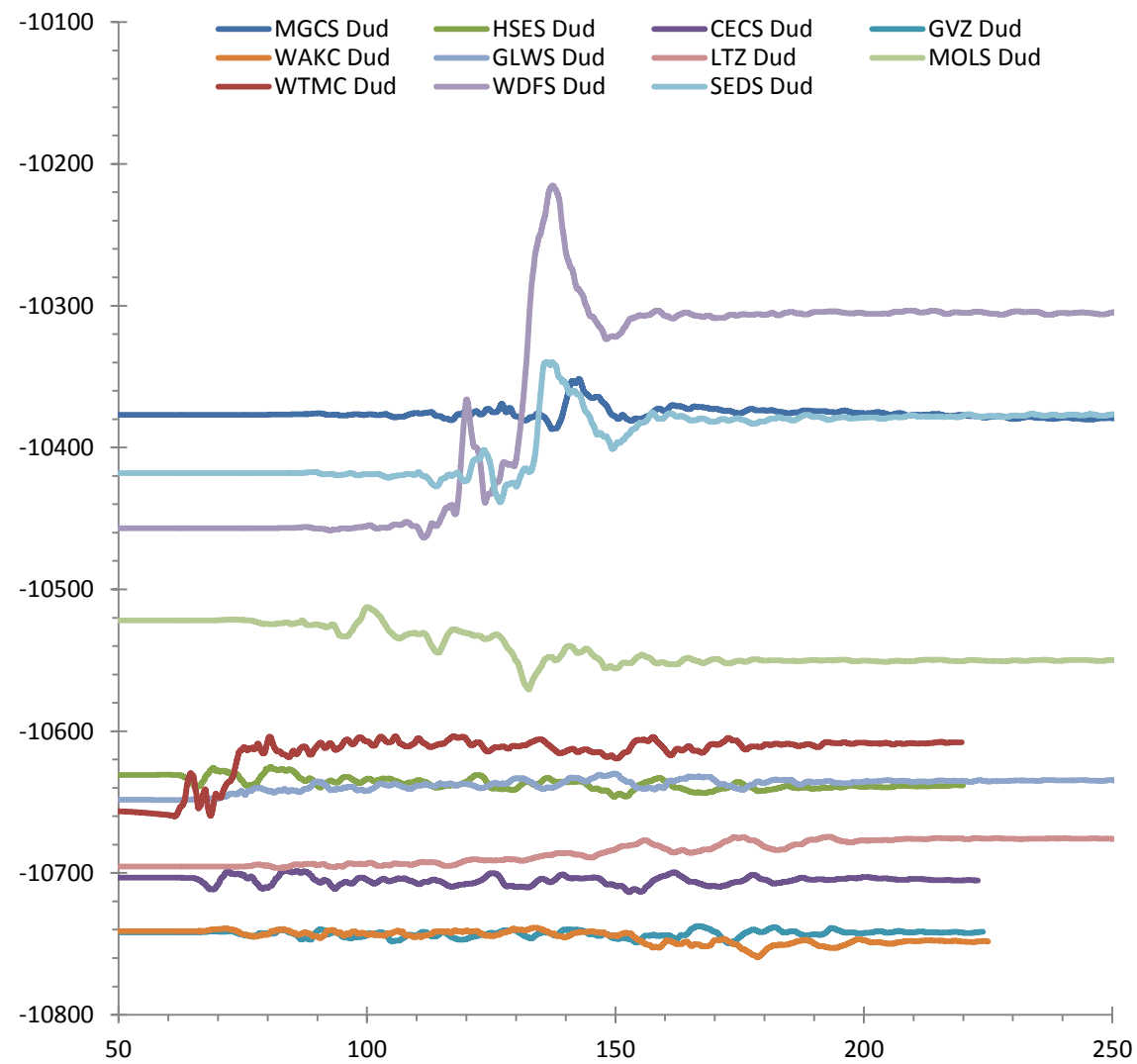
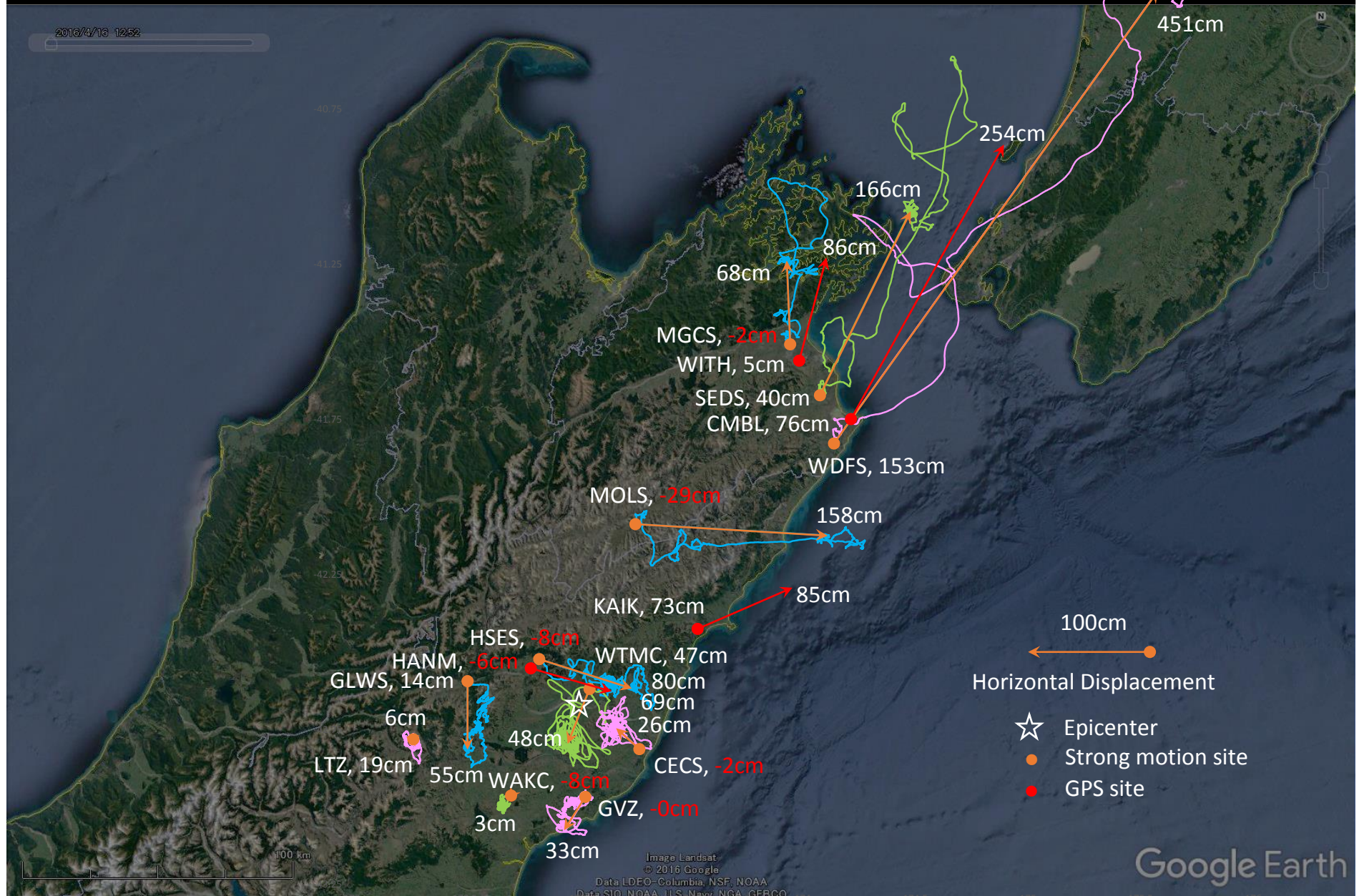


図 4. 強震記録を二回積分して得られた
各地の変位波形_11 測点を
それぞれの緯度に対応させて
重ね描きしたもの(その 3 上下方向)

Displacement caused by the 2016 Kaikoura earthquake (M7.8, depth: 15.1km) derived from twice integration of accelerogram data and GPS from GeoNet

note) numbers after site code are vertical displacement, and numbers near the head of the arrows are horizontal displacement

図 5. 2016 年カイクラ地震 M7.8 による積分変位と GPS による地殻変位 (GeoNet) の比較



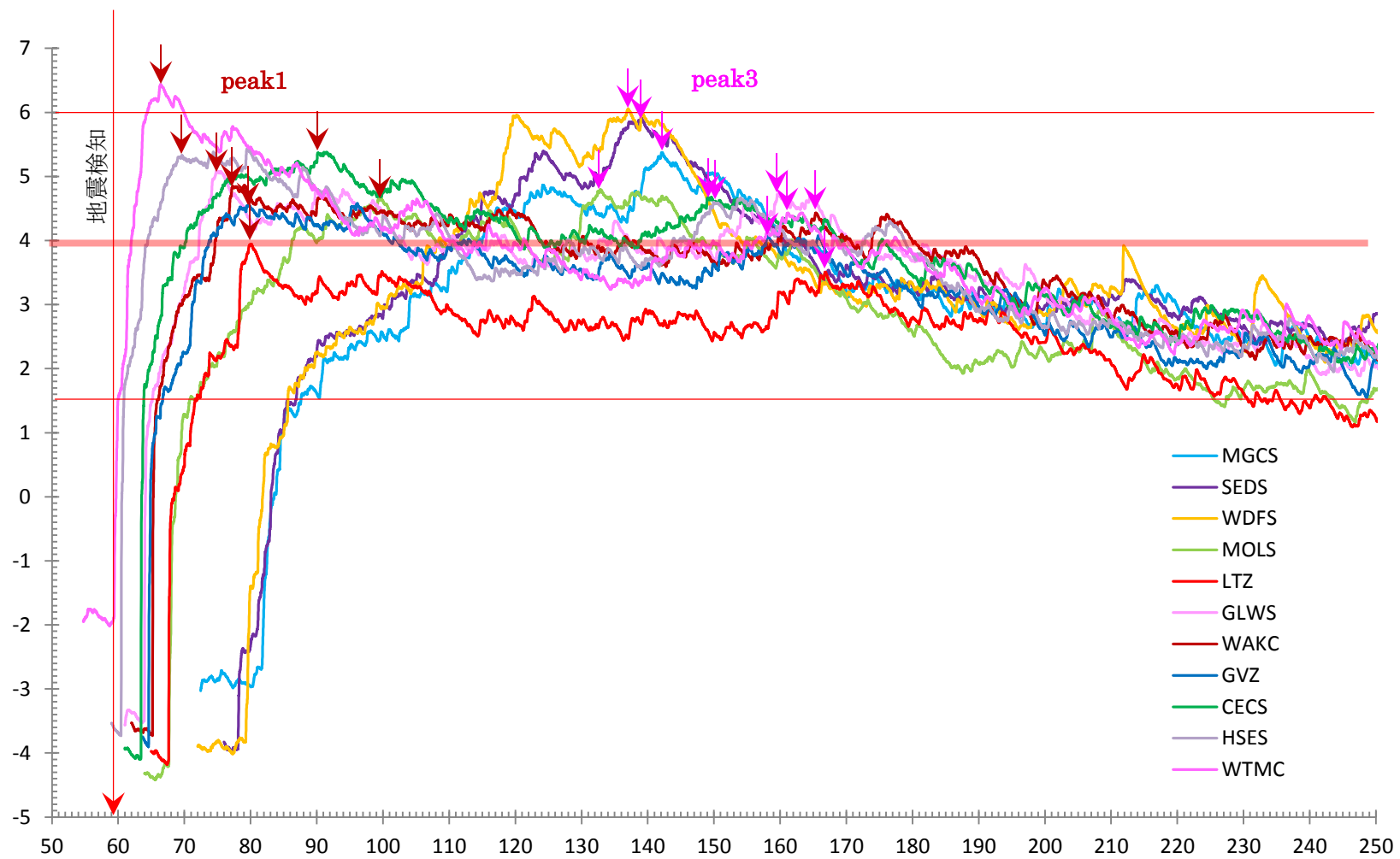


図 6. 11 地点のリアルタイム震度の変動：縦軸リアルタイム震度、横軸 2016 年 11 月 13 日 11 時 02 分 00 秒 (UT) からの経過秒数

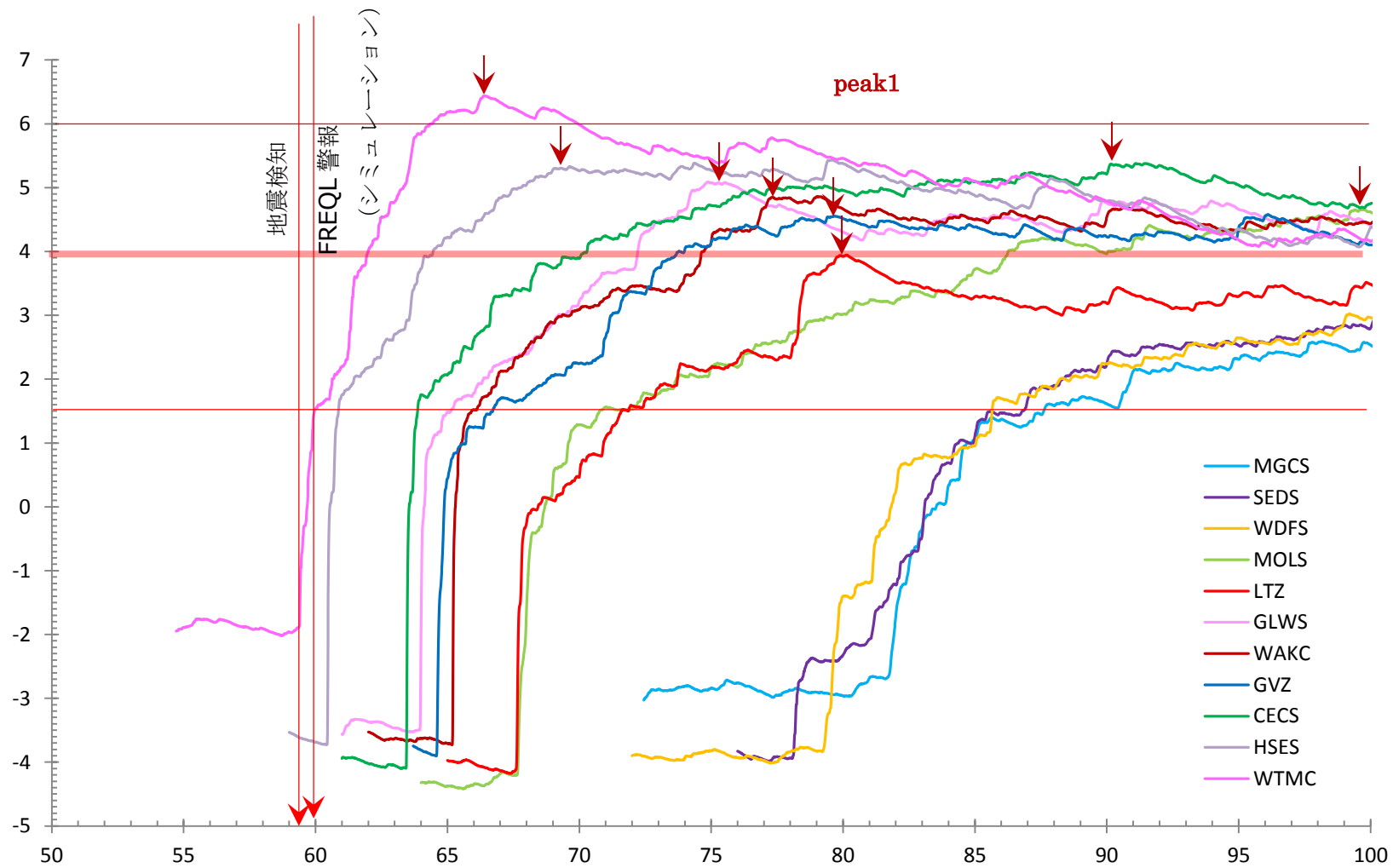


図 7. 11 地点のリアルタイム震度の変動、地震波動到来時刻付近を拡大表示

: 縦軸リアルタイム震度、横軸 2016 年 11 月 13 日 11 時 02 分 00 秒 (UT) からの経過秒数

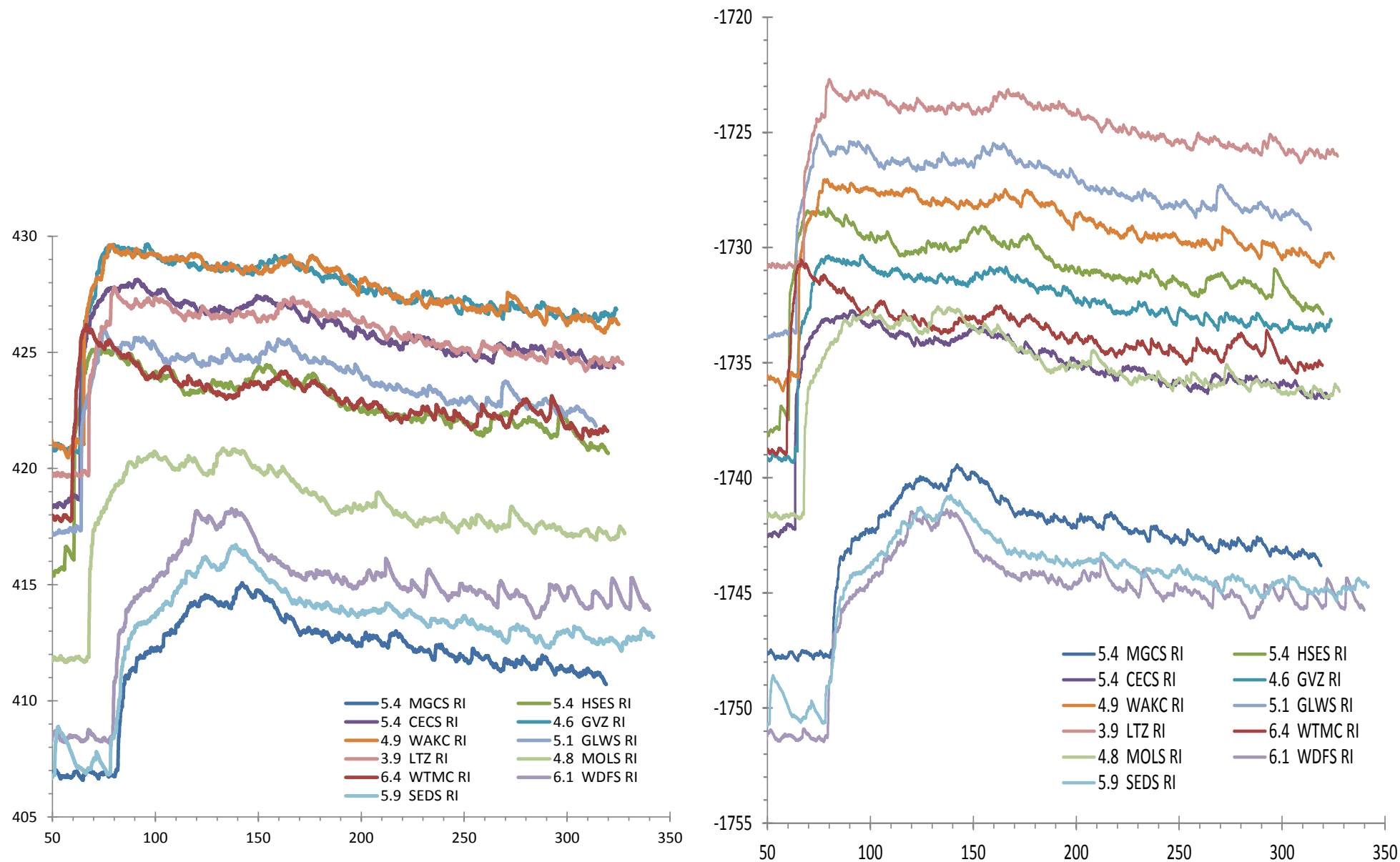


図 8 11 地点のリアルタイム震度の変動を観測点の緯度や経度に対応させて表示：縦軸リアルタイム震度の最大値が当該地点の緯度または経度に対応するように描いている。横軸は 2016 年 11 月 13 日 11 時 02 分 00 秒 (UT) からの経過秒数である。

表1. 各観測点の位置ならびに初動やピークの読み取り時刻、リアルタイム震度RIと5HzPGA(Gal)とこれらから推定される地震規模Me

site code	WTMC	HSES	CECS	GLWS	GVZ	WAKC	LTZ	MOLS	WDFS	SEDS	MGCS
N	-42.6195	-42.5232	-42.8135	-42.5942	-42.9674	-42.9631	-42.7817	-42.088	-41.8274	-41.6723	-41.5077
E	173.0536	172.8305	173.2749	172.511	173.0348	172.7052	172.271	173.2574	174.1384	174.0765	173.9444
H(m)	0	377	69	445	400.5	219	648	888	34	90	0
p-detect	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
p-detect	59.41	60.46	63.45	63.98	64.6	65.21	67.64	67.69	79.28	80.85	81.8
peak1	1	2	7	3	5	4	6	8	11	9	10
peak1	66.5	69.2	90.3	75.3	79.7	77.3	80	100	120	116	119
peak3	9	6	5	7	8	10	11	1	2	3	4
peak3	162	152	151	160	161	167	168	133	137	138	141
RI	6.4	5.4	5.4	5.1	4.6	4.9	3.9	4.8	6.1	5.9	5.4
5HzPGA(Gal)	850	250	264	155	134	145	79	214	948	600	242
Me	8.1	7.7	7.5	7.6	6.8	7.2	6.2	6.6	7.2	7.5	7.6

peak2 として検討した位相については、震源が異常に深く推定されたので、ここでは削除している。

表2. 推定震源ほか

	NZ震源	USGS震源	SDR震源p	SDR震源a	peak1震源	peak3震源
N	-42.6925	-42.757	-42.602	-42.602	-42.666	-42.008
E	173.0219	173.077	172.972	172.967	172.777	173.665
h(km)	15.1	15	8.7	8.9	1	9.8
震源時	56	56	57.6	57.5	59.1	121.1
仮定速度			6km/s	6km/s	1.8km/s	3km/s
使用地点			first 5sites	11 sites	11 sites	first 8sites
最初の検知から確定までの時間			5.8秒	22.4秒	40秒程度	2分程度

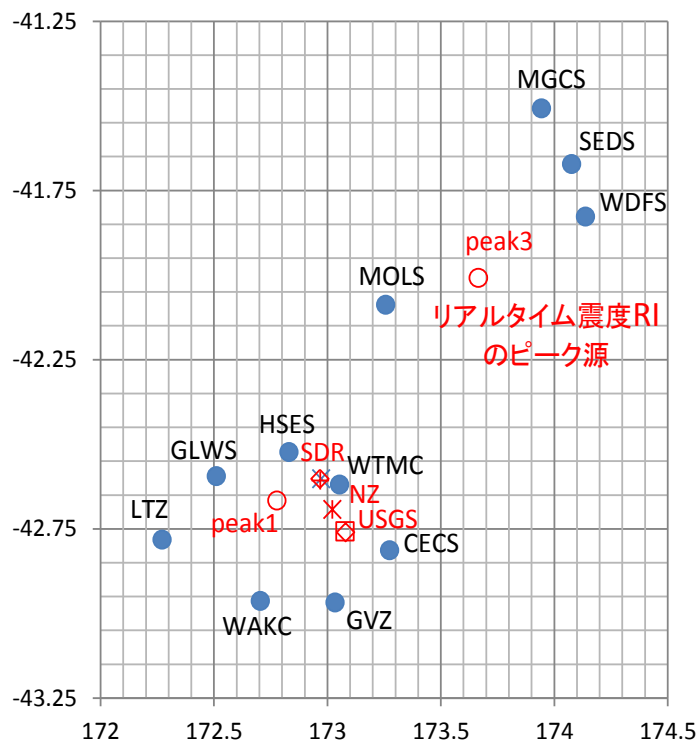


図9 観測点配置と推定震央位置

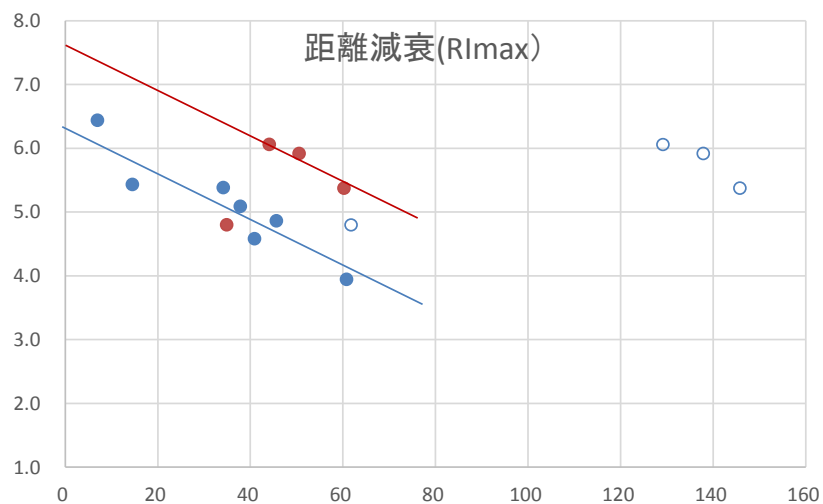


図12 リアルタイム震度の距離減衰

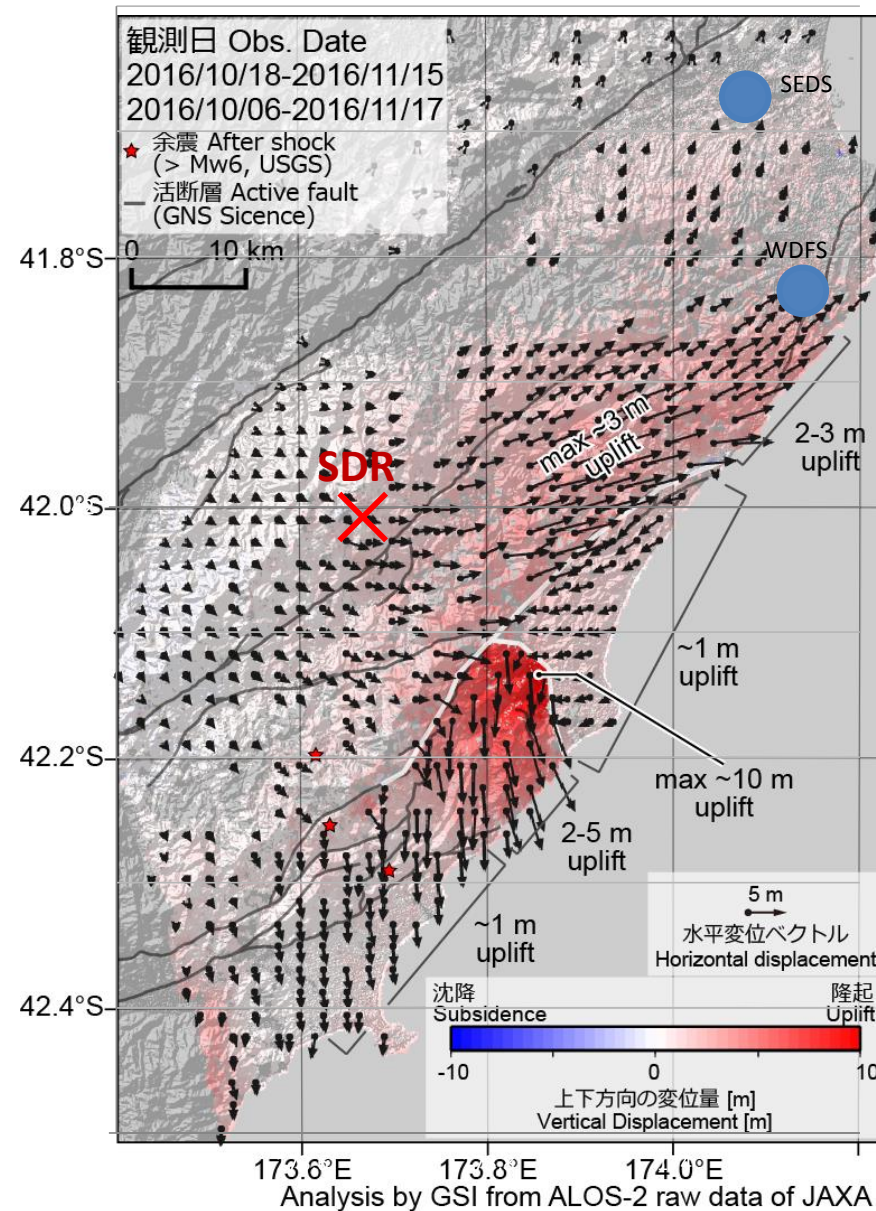


図10 JAXAによる地殻変動量の推定結果と推定震央位置の比較

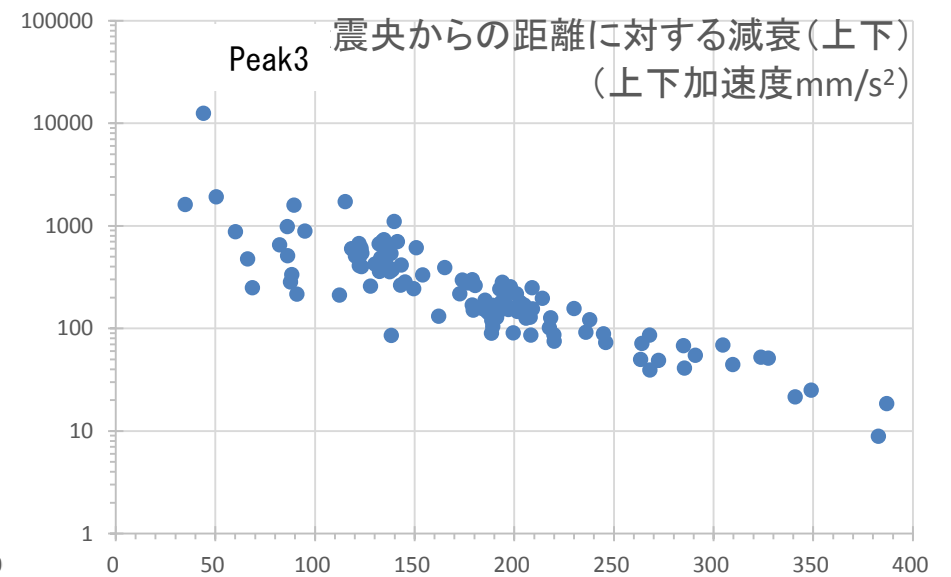
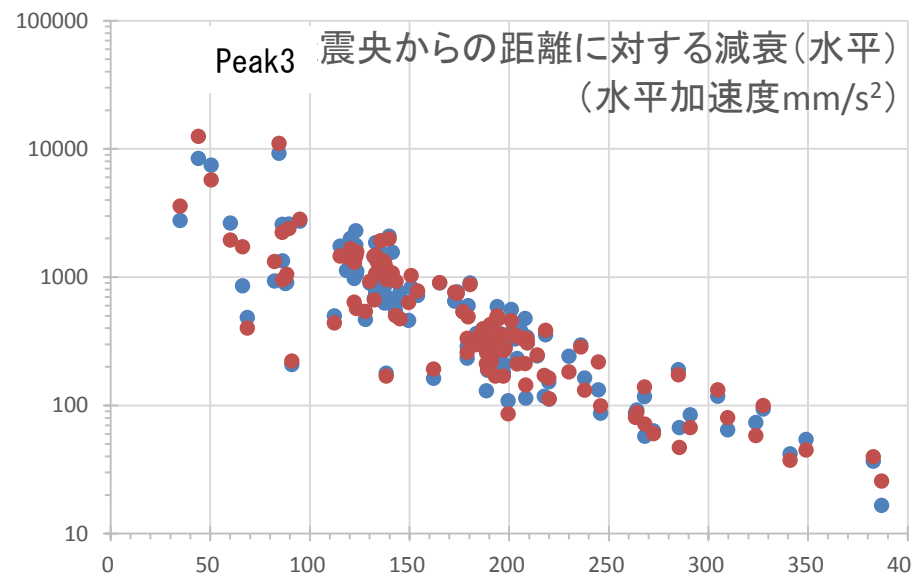
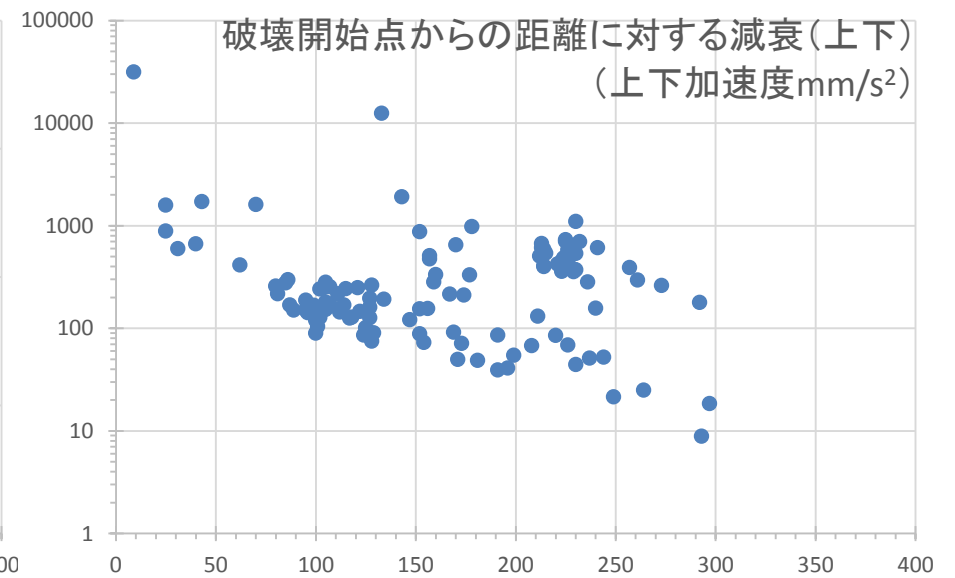
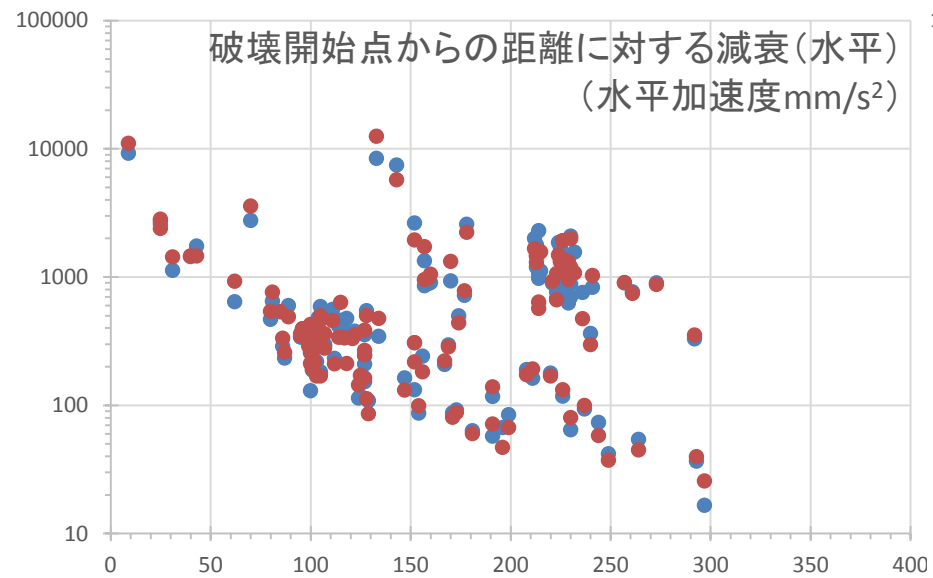


図 11 最大加速度 (mm/s^2) の距離減衰