

2016年4月16日熊本地震による地殻変動、GPS観測と強震記録の2回積分結果比較
および関連するいくつかの話題について

中村 豊 (SDR)

1. はじめに

強震記録の2回積分により求められる変位はしばしば発散する。一般に地震計の回転成分は不明だが、常に作用している重力を利用して回転成分の大きさを見積もり、信頼性の高い積分結果を得ることは可能である。最終的には、地震後の地震計の動きが停止することを条件にして、大きな地震入力により地震計が急に回転したとして新たな重力加速度起源の補正加速度を考慮したり、大きな瞬間的な力を想定したりして、妥当な変位を算定することができる。これはフィードバックの要素を含み、真の意味でリアルタイムに確からしい積分結果を得ることはできないが、多少の時間差を許容すれば、概ね即時的に積分結果を得ることが可能である。そうした積分変位を有効に利用する可能性を追求するため、震源付近での変位特性について、最終的な変位のみでなく、収束までどのような軌跡を描くのかも含めて検討を進めている。

ここでは、2016年4月14日に始まった一連の熊本地震の強震記録を基に算定された積分変位について検討を加えたので報告する。

2. 積分による変位推定とGPSによる変位推定の比較

図1は、国土地理院によるクラック分布図を背景にGEONETによる地殻変位分布図および強震記録の2回積分による変位分布図を図示したもので、水平方向と上下方向に分けて示している。図には、地表面変位の軌跡を示し、併せてその始末端を矢印で結んで表示した。参考に資するため、国土地理院による断層モデルと地表断層線を大まかに描画している。なお、点線はKiK-netの地下強震記録に対応する。

この図は4月21日および5月6日に弊社web上で公開したものに自治体による強震観測データをさらに付加したものである。想定断層の南側には強震観測の空白地帯があり、変位状況の詳細は不明であるが、断層周辺の地表変位の概況は概ね把握できるものとなっている。

変位の始末端を結んだ変位ベクトルについてみると、GPSによる地殻変位と調和的であり、積分による変位の信頼性が高いことを伺わせる。算定された断層モデル上の(上盤側)観測点では、東北東に向かう1mを越える大きな水平変位が認められる。想定断層東端付近の下盤側にある阿蘇山ろくではこれに対して南南西方向に1m程度の大きな変位となってい

る。クラック分布図の東北端に位置するカルデラ内の阿蘇と内牧では、ほぼ北方に向かう非常に大きな変位となっているが、これには地震に伴った表層地すべりの影響が含まれているものと推察される。概ね、想定断層の北側では北側に、南側では南に、断層が開くように変位している。

変位軌跡をみると、上盤側では、まず北方に変位し次に東へ変位していることがわかる。大津では近接した観測点の変位軌跡はほぼ同じものとなっている。また、白水の地下と地表ではほぼ同じ変位・軌跡が得られている。これらのことも、積分による変位の信頼性が高いことを示唆している。変位軌跡は地域ごとに特徴ある形を呈しており興味深い。西原村の変位軌跡は、同じ想定断層面上の他の記録に較べて2倍程度の大きなものになっている。

上下変位をみると、想定断層面上では顕著に沈降しており、阿蘇山ろくでは概ね隆起していることがわかる。想定断層面上では水平も上下も大きな変位となっているが、周辺との比較では上下変位が断層面上で顕著に大きくなっている。西原村では約1.9mの沈降と算定されているが、国土地理院の緊急GNSS観測によっても、西原村付近の沈降変位は概ね2mであったことが報告されている。

3. 被害と変位の関係

大きな変位は地盤変状をもたらすと考えられるが、建物被害には必ずしも直結しない。建物の被害要因としては、変位の速さ（速度や加速度）が建物の固有振動数と関連して重要となる。特に加速度は建物に作用する力と関係しており、建物の地震時変形と直接的に関係している。また、液状化発生地域では、地震力が建物に伝わらなくなる免震的な作用により構造被害としては少なくなるものと推察される。このことは建築学会による悉皆調査の結果に明瞭に現れているように見える。もちろん、液状化発生地域では構造物の基礎が損壊することが多いので、このことによる建物被害は多数生じているようである。液状化被害の問題点は、主として基礎の不等沈下にあると考えられるので、これさえ抑制できれば、非液状化地域での倒壊のような重篤な被害は避けられるのではないかと思われる。地震防災上マイナスのイメージが強い液状化現象の減災への利用可能性について検討が進むことを祈る。なお、断層面の直上およびその周辺では、一般に地盤に永久変位が発生する。これは地震規模が大きいほど大きくなり、大きな変位速度で生じる永久変位が免震構造物の許容限度を超える危険性が高まる。許容限度を超えた変位によって免震基礎の破壊や、変位抑制のための周辺構造物への衝突などが発生すると考えられるので注意が必要である。

建物の被害と基礎を構成する地盤の変状がどのようなタイミングで生じているのかは興味深い問題である。液状化の発生と建物被災の前後関係が、液状化が建物の被害に与える影

響を考える際には重要となる。そこで、強震記録波形などから両者の時間的前後関係を探ってみる。

KiK-net 益城の地表と地中の記録から両者の変位差を求めてみると図2に示すようになる。これは相対合成変位を見たものであるが、最大の変位差は、時刻01時25分13.7秒で22cm近くに達している。KMMH16地点の地盤情報によると、表層地盤の層厚は15m程度と推定され、さらに深いところでは固い層と比較的やわらかい層が何層か互層となった後、基盤層に達している。最初の固い層から下の層で増幅された波動は地表には伝わりにくいのので、地表で観測された変位は、表層15mの地層での増幅を反映したものと考えられる。したがって、算定された相対変位により生じた動的せん断歪は1.5%程度に達していると推定される。地盤の変状が現れ始めるとされる歪 10^{-3} (0.1%)は、相対変位で1.5cm以上と考えられるので、概ね12秒には超えている。地盤変状は、12秒に始まり13.5秒にはかなりの程度に達していたと考えられる。14秒~15秒は相対変位が5cm以下と小さくなり、15秒以後、再び10cm以上の相対変位となっている。つまり、大きな相対変位が生じて、14秒頃には、表層地盤は顕著に非線形化したと考えられる。その後、一旦、相対変位は小さくなったが、15秒以後は再び相対変位は大きく安定し、伝達効率が低下した状態が継続したと考えられる。

益城町役場の記録やKiK-net 益城の記録から算定した変位軌跡を図3に示す。図には同じスケールで旧本震と本震を示しているが、本震の変位軌跡は圧倒的に大きいことがわかる。本震の変位軌跡をみると、1時25分13秒から急激な動きが始まっており、概ね3秒間続いている。役場の記録をみると、この3秒間で、西向きに変位したものが急に東に変位している。この時に、旧本震の後、益城町役場の裏手の崖上に置かれた電源車が西側の崖下に転落したものと推測される。なお裏手の崖は4月14日の旧本震で20~30mにわたって崩れている。図中の矢印は、1時25分12秒と13秒、13秒からは16秒までを0.2秒間隔で記している。これによると、概ね100cm/sの速度で13.4秒から13.6秒まで西向きに変位し、14.0秒から14.2秒まで130cm/sの速度で東向きに変位している。これ以外では、100cm/s程度またはそれ以上での速度での変位は無いようである。付近の家屋の中には、明らかに16日の本震で西側に倒壊したAと東側に倒壊したBがある(図4参照)。地盤の変位状況と考え合わせると、Aは14.0~14.2秒に、Bは13.4秒~13.6秒に倒壊したと推測される。電源車が崖下に転落したのは14.0~14.2秒であったと思われる。その後は、表層地盤が非線形化したために大きな地震力を伝えるにくくなったものと想像される。益城付近の構造物が被災したのは概ね15秒頃までではなかろうか。

4. おわりに

地震時に大きな変位に晒されるのは、震源域のほか、液状化地域をはじめとする軟弱な表層地盤地域であろう。震源域のかなり強烈な地震力とは異なり、液状化地域では地震力が地盤上の構造物には伝わらないことがあり、地上構造物そのものの被害程度はかなり軽減されることがある。震源域の地震動は強烈で構造物に重篤な被害をもたらしがちであるが、地盤の液状化現象を天然の免震機構として利用することで、重篤な被害を回避できる可能性がある。今後、液状化現象を利用した免震機構の実現可能性について追求していくことができれば幸いである。(以上)

Horizontal Movement

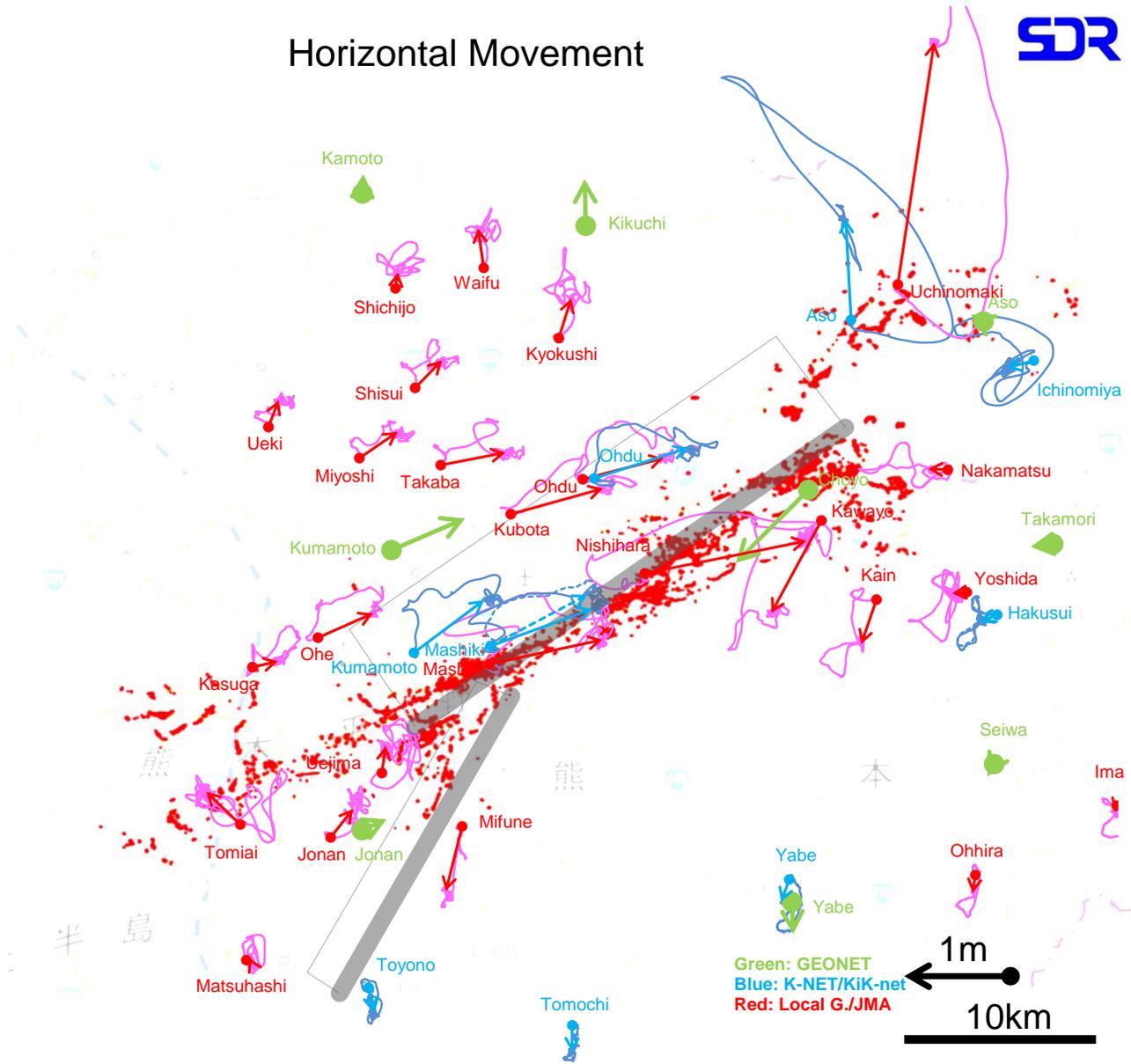


図 1 (1) 2016 年 4 月 16 日 01 時 26 分発生の本震による地殻変動 (水平) : 強震記録の 2 回積分変位と GPS 変位の比較、背景は国土地理院によるクラック分布図

Vertical Movement

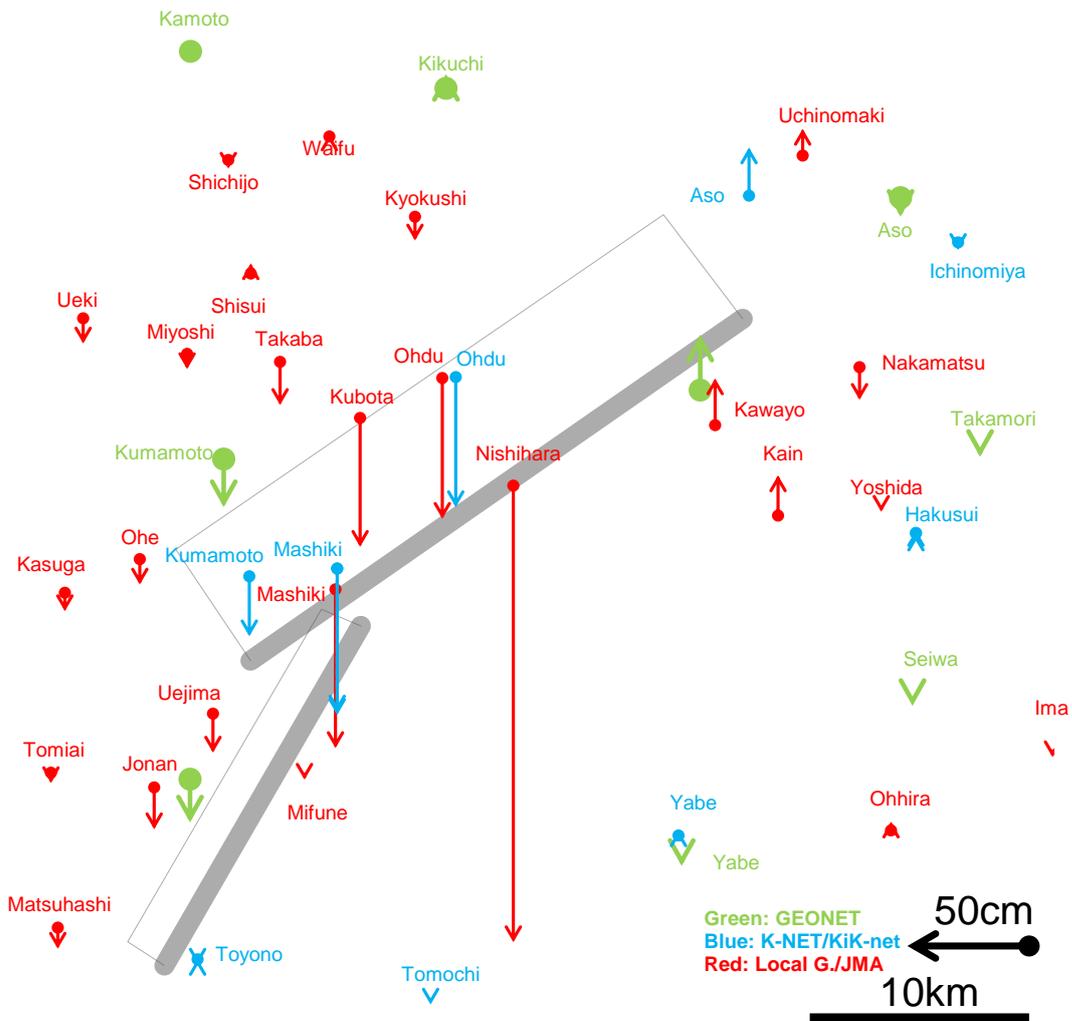


図 1 (2) 2016 年 4 月 16 日 01 時 26 分発生の本震による地殻変動（上下）：
強震記録の 2 回積分変位と GPS 変位の比較

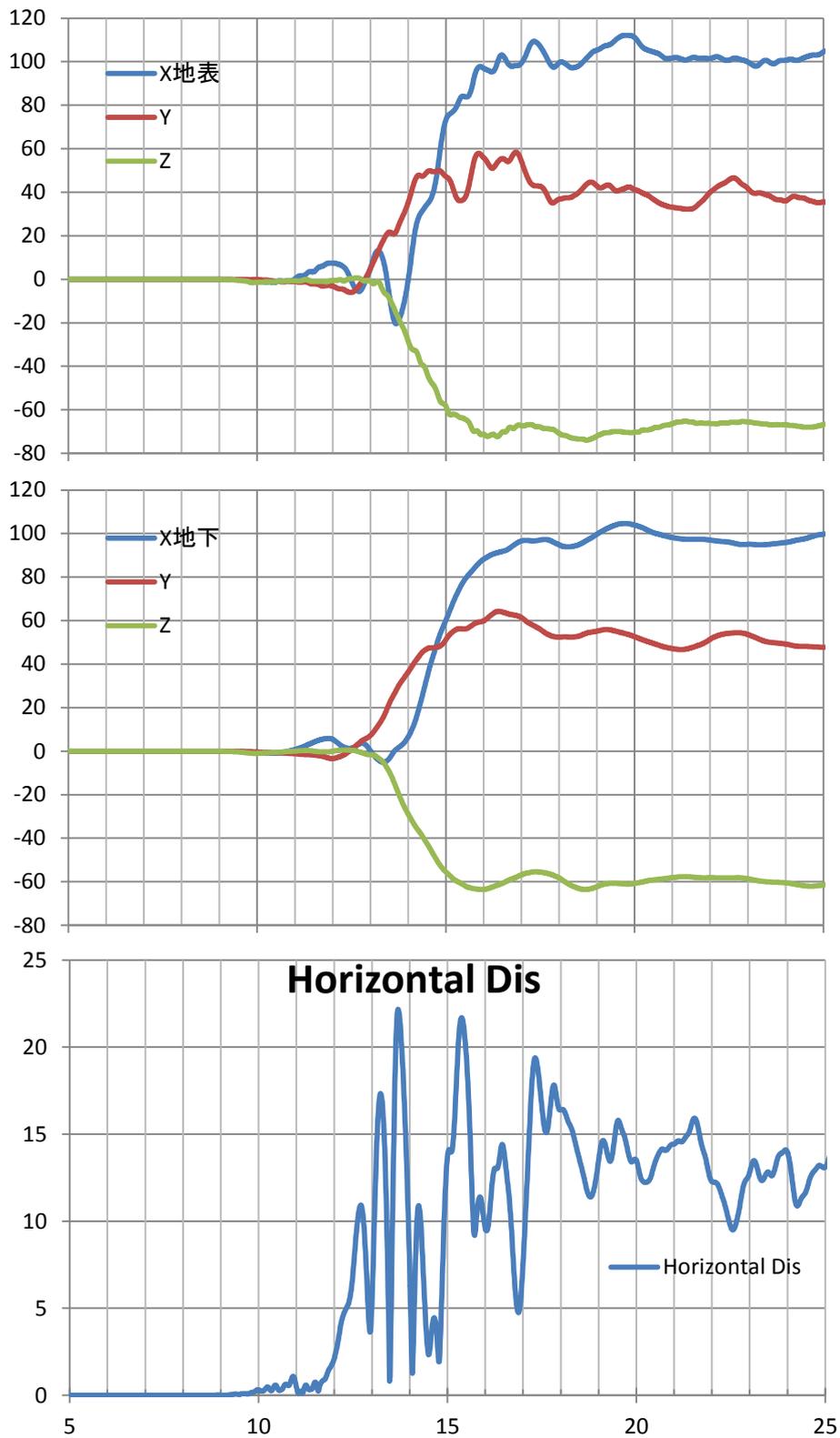


図2 2016年4月16日01時25分発生の本震によるKiK-net益城（地表、地下）の積分変位と水平相対変位（cm）、横軸は1時25分からの経過時間（秒）、X:EW、Y:NS、Z:UD

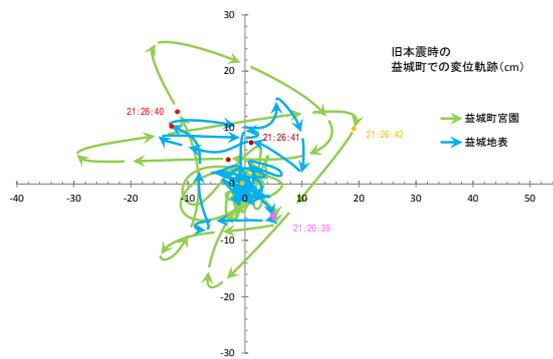
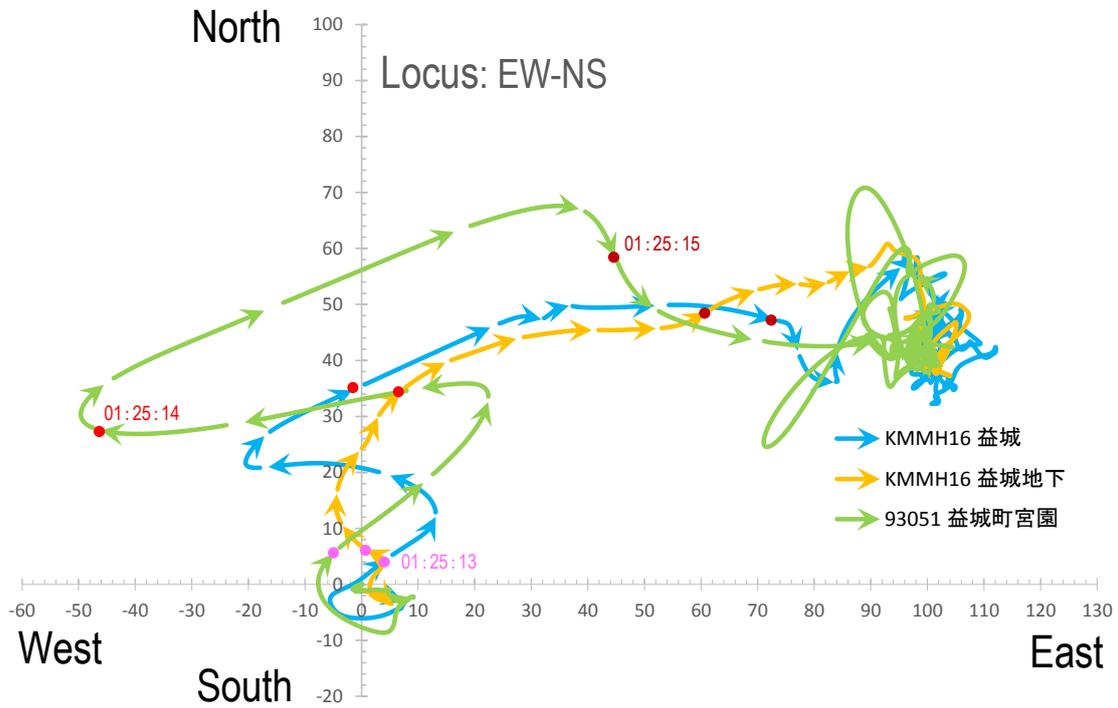


図 3 (1) 本震時および旧本震時の KiK-net 益城地表 (青) および益城宮園 (緑) における変位軌跡

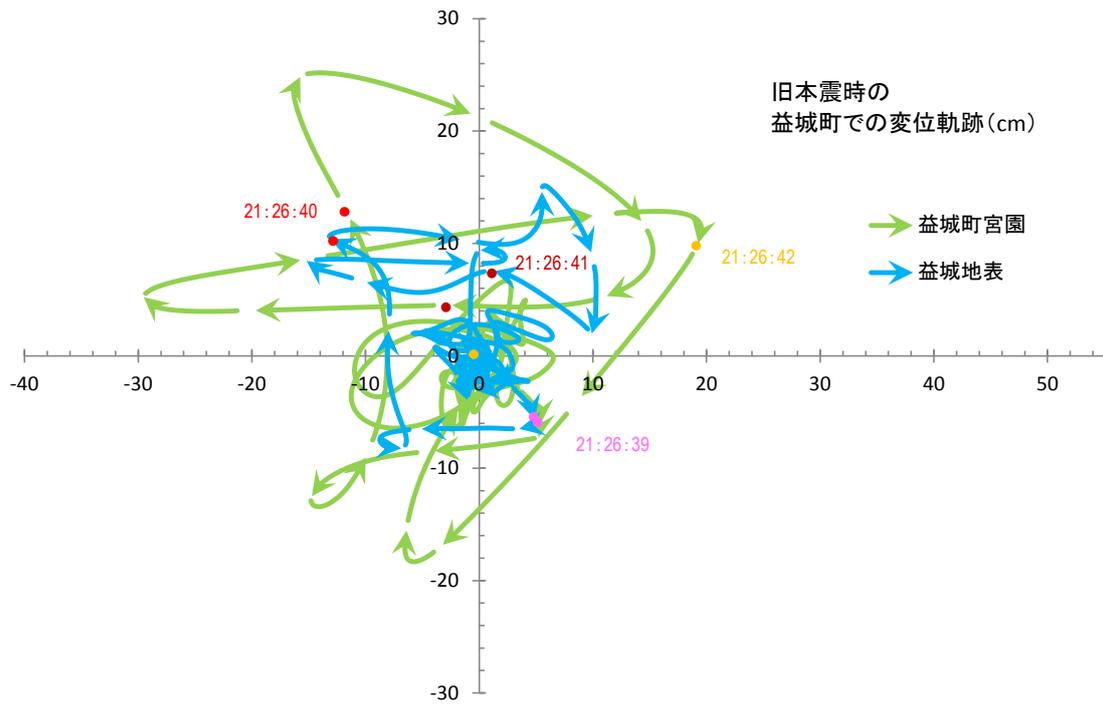


図 3 (2) 旧本震時の KiK-net 益城地表 (青) および益城宮園 (緑) における変位軌跡



図 4 益城宮園観測点 (益城町役場) 周辺の様子