

2. 使用データ

本研究では、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震および、東北地方太平洋沖地震の誘発地震と考えられる福島県浜通り地震の地殻変動量の検出をおこなう。使用データは防災科学技術研究所が展開する強震観測網 K-NET (図 1) および KiK-Net, 気象庁が展開するサンプル強震波形 JMA の公開されている強震加速度計の加速度記録を用いる。強震観測網 K-NET および KiK-Net の加速度記録では、一地点につき 0 秒～300 秒まで時間刻み 0.01 秒の計 30000 点のデータを用いる。

これらの加速度記録から求めた地殻変動量と比較をおこなう為のデータは、国土地理院が展開している GPS 電子基準点 (図 1) 観測データ GEONET (GNSS 連続観測システム) を用いる。また、東北地方太平洋沖地震の変位波形を求めた強震計および GPS 電子基準点の位置関係を図 2 に示す。

3. 地殻変動量の算定方法

強震観測網 K-NET, KiK-Net および強震波形 JMA の加速度記録は、記録開始の時点では加速度基線が 0 ではない。そのため、全ての強震記録について、記録開始から 10 秒間 (トリガー前区間) の平均加速度値を 0 とするように基線補正を施す。

(1) 加速度記録の積分方法

本研究では、強震加速度計より得られた加速度記録を時間領域で直接積分することにより速度波形の算出をおこなう。更に算出した速度波形を、同様に直接積分することにより変位波形を算出する。式は線形加速度法を用いる。

加速度記録における微小区間 Δt において、時刻 t_{i+1} の時の加速度値を a_{i+1} と表記すると、時刻 t_{i+1} の時の速度値 v_{i+1} 、変位値 d_{i+1} の式は以下の様になる。

$$v_{i+1} = \begin{cases} 0 & (i = 0) \\ v_i + \frac{1}{2}(a_i + a_{i+1})\Delta t & (i > 0) \end{cases}$$

$$d_{i+1} = \begin{cases} 0 & (i = 0) \\ d_i + v_i\Delta t + \frac{1}{6}(2a_i + a_{i+1})\Delta t^2 & (i > 0) \end{cases}$$

しかし多くの場合、加速度記録に対して線形加速度法を適用するだけでは現実的な変位波形を得ることはできない。線形加速度法は加速度の変化を線形と仮定して積分をおこなうため、2 回積分をおこなうことは、小さな誤差が大きな誤差へと変わってしまうためである。そこで本研究では、この問題を解決するために更に補正を施すことで現実的な変位波形を算出する。

(2) 加速度記録の補正方法

デジタル強震計は、しばしば収録中に加速度基線の変化を起こす。こうして得た加速度記録に対して、そのまま線形加速度法を適用すると速度波形、変位波形は発散する傾向がある。そこで、まず加速度基線変化を起こしている可能性のある加速度記録を線形加速度法より積分をおこない、速度波形を得る。この時に速度波形が記録途中に著しく屈曲し直線的なトレンドが認められる場合に以下の式を用いて折線関数を速度波形にフィッティングすることで、基線上に速度波形を補正する。ここで t' , m はパラメータ, T

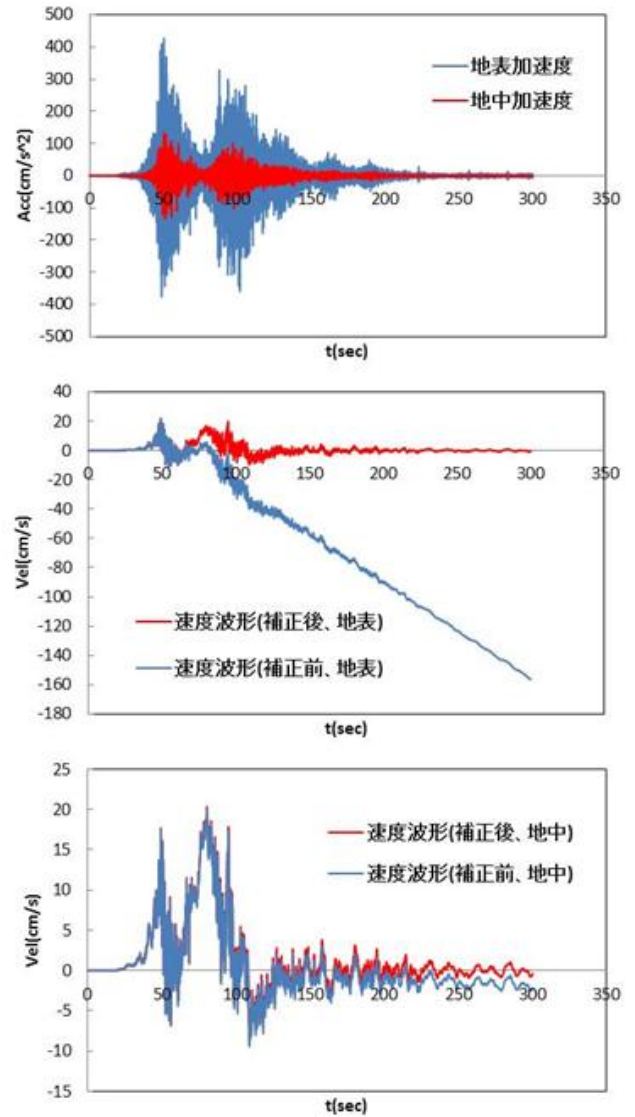


図 3 KiK-Net 唐桑の加速度波形および速度波形

は加速度記録の全記録長とする。

$$y(t; t', m) = \begin{cases} 0 & (t < t') \\ m(t - t') & (t \geq t') \end{cases}$$

$$P(t', m) = \int_0^T [v(t) - y(t; t', m)]^2 dt$$

これより、速度波形との残差二乗和が最小となるようにパラメータを定める。

次に、上記の式より求めたパラメータを加速度記録から差し引いて、補正加速度波形 $a'(t)$ を求める。

$$a'(t) = a(t) - \frac{dy(t; t', m)}{dt} = \begin{cases} a(t) & (t < t') \\ a(t) - m & (t \geq t') \end{cases}$$

以上より、補正した加速度記録を積分することで、基線上にのった速度波形を算出する。

(3) 加速度波形に補正を施す効果

ここで KiK-Net 唐桑 (MYG03, 宮城県気仙沼市唐桑町)

観測点の東西成分、地表での加速度記録を例に、補正を施した場合の変位波形までの算出を示す。まず図 3 に加速度波形、補正を施す前と後の速度波形を示す。補正を施さなかった場合、地表での速度波形においては 80 秒付近で明らかな屈曲が見てとれる。また地中の速度波形では明らかではないが 120 秒付近で屈曲が見てとれる。これより、地表では 80 秒付近、地中では 120 秒付近以降では基線上に波形がのっておらず、補正を施さないでそのまま積分するだけでは地殻変動量は算出できないことが分かる。ここに補正法を用いて補正を施す。補正は屈曲した後のトレンドを直線と仮定し、x 軸との交点 (KiK-Net 唐桑, 地表, 東西成分では 80 秒付近) の時刻から比例定数を加速度記録から引いてから線形加速度法を用いて積分をおこなった。補正を施した場合では、速度波形では屈曲がなくなり基線上で直線的な波形を得ることができた。

(4) KiK-Net 観測点における地表と地中の比較

強震観測網のうち、KiK-Net 観測点では地表と地中それぞれに強震計が設置されている。そのため、KiK-Net 観測点において地表と地中での地殻変動量の比較をおこなう。

図 4 に KiK-Net 唐桑観測点の東西成分、南北成分、上下成分それぞれにおける地表と地中の変位波形の比較を示す。KiK-Net 唐桑の東西成分では、地表においては約 247 cm、地中においては約 396 cm で変位波形が収束していることが分かる。完全に地殻変動量が一致しているわけではないことに加えて東西成分では多少のズレが生じてはいるが、KiK-Net 唐桑では概ね近い値になったと言える。

(5) KiK-Net 観測点と GPS 電子基準点との比較

KiK-Net 唐桑観測点における変位波形と、GPS 電子基準点気仙沼 (950172, 宮城県気仙沼市笹が陣) の観測記録より 1 Hz 解析データの結果を併せて図 4 に示す。また KiK-Net 田尻 (MYGH06, 宮城県大崎市田尻) の変位波形と GPS 電子基準点涌谷 (950176, 宮城県遠田郡涌谷町) の観測記録より 1 Hz 解析データ結果を図 5 に示す。1 Hz 解析データは日本 GPS データサービス株式会社の変動 PPP キネマティック解析をおこなったものを用いた。KiK-Net 田尻でも東西成分、南北成分、上下成分の 3 成分の変位を示す。KiK-Net 唐桑と GPS 電子基準点気仙沼、KiK-Net 田尻と GPS 電子基準点涌谷は完全に同じ地点にあるものではなく、観測点が違うために変位波形が厳密に一致するものではない。しかしながら、KiK-Net 唐桑については 3 成分全てで、地中の強震計より求めた変位波形と GPS 電子基準点の変位波形が非常に酷似していることが分かる。また、KiK-Net 田尻においては、東西成分と南北成分については地表と地中の変位波形がほとんど同じであることが分かる。GPS 電子基準点涌谷の 1 Hz 解析データによる変位波形と比較をおこなっても、変位波形が完全に一致はしないものの、概ね同じ傾向を示していることが分かる。

4 福島県浜通り地震における考察

東北地方太平洋沖地震の 1 カ月後の、2011 年 4 月 11 日 17 時 16 分に発生した福島県浜通り地震においても、同様の算定方法および補正法を用いて変位波形を求めることで、地殻変動量の算定をおこなう。用いるデータは同様に、強震観測網 K-NET および KiK-Net の加速度記録を用いる。加速度記録は一地点につき 0 秒~300 秒まで時間刻み 0.01 秒の計 30000 点のデータを用いる。また、福島県浜通り地震

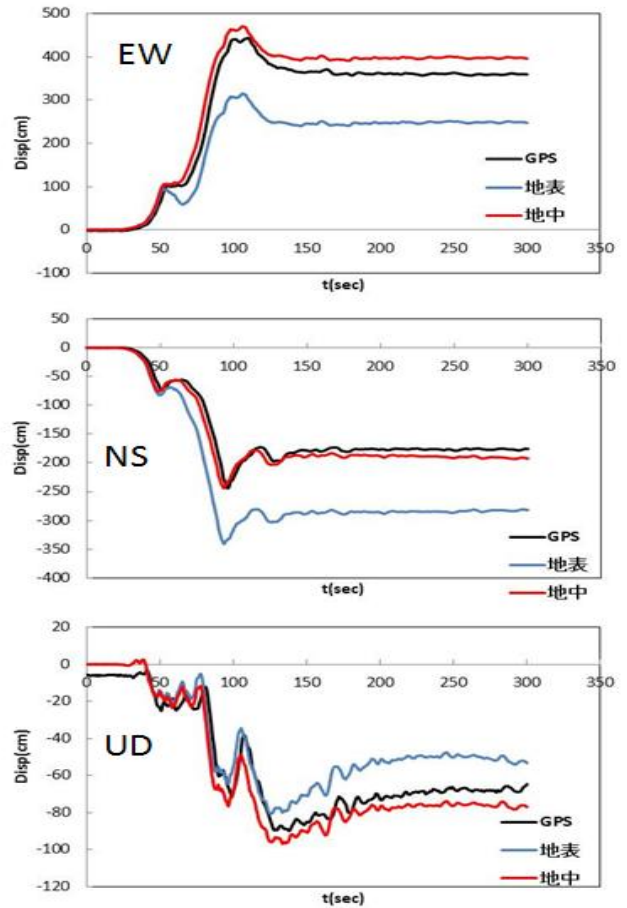


図 4 KiK-Net 唐桑の変位波形

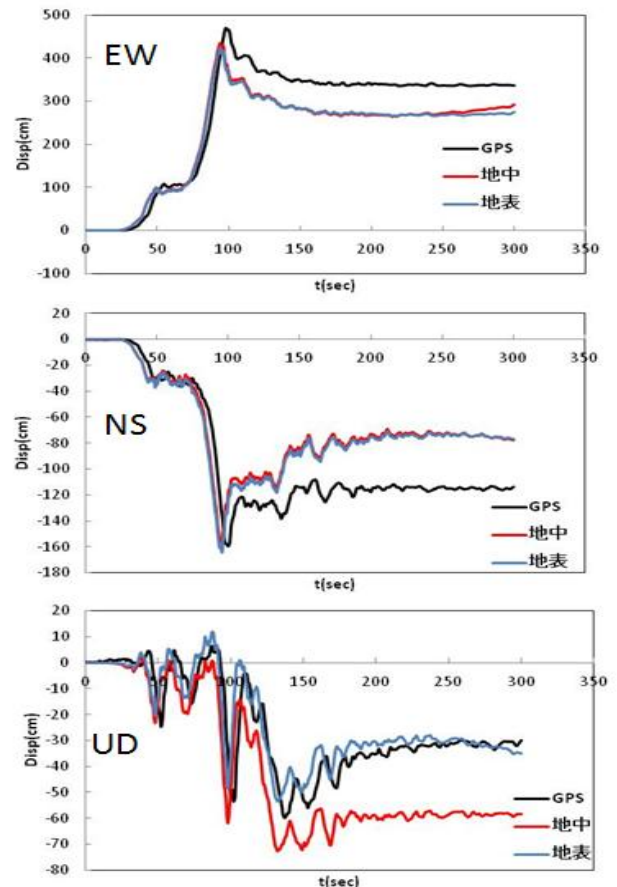


図 5 KiK-Net 田尻の変位波形

の変位波形を求めた強震計および GPS 電子基準点の位置関係を図 6 に示す。

図 7 に GPS 電子基準点いわき 2 (970800, 福島県いわき市常磐湯本町) およびいわき 4 (020946, 福島県いわき市田人町) の 2011 年 3 月 1 日から 2011 年 4 月 31 日までの上下方向の日々の変動量のグラフを示す。このデータは日本時間 21 時 (UTC12 時) の毎日の座標値が示してある。そこから、2011 年 3 月 1 日を変動量 0.0cm としたときの変動量を示してある。グラフより 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では GPS 電子基準点いわき 2, いわき 4 ともに沈下していることが分かる。また、4 月 11 日の福島県浜通り地震では、GPS 電子基準点いわき 2 では上昇しており、GPS 電子基準点いわき 4 では更に沈下していることが分かる。福島県浜通り地震では、新たな断層 (塩ノ平断層) が見つかり、その断層の東側に GPS 電子基準点いわき 2 が設置されており、西側に GPS 電子基準点いわき 4 が設置されているので、塩ノ平断層を境に上下方向の変位が逆となっていることが分かる。

次に図 8 に KiK-Net いわき東 (KFSH14, 福島県いわき市平下高久) および KiK-Net 矢吹 (FKSM11, 福島県西白河郡矢吹町) の算出した上下方向の変位波形を示す。データは福島県浜通り地震の加速度記録を用いた。塩ノ平断層を中心と考えると、KiK-Net いわき東は東側に設置されており、KiK-Net 矢吹は西側に設置されている。この波形から分かるように、KiK-Net いわき東では上昇をしており、KiK-Net 矢吹では沈下していることが分かる。塩ノ平断層からの距離等を考慮すると、GPS 電子基準点と KiK-Net の設置されている地点は同じではないので、変位の値は同じとはならないが、これらより塩ノ平断層の東側では上昇しており、西側では沈下していることが分かり、KiK-Net から算出することが可能であるということが分かる。

5 まとめ

本研究では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震および 2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通り地震の加速度記録を用いて積分をおこない変位波形を求めることで地殻変動量の算出を試みた。加速度記録から変位波形を求める過程としては線形加速度法を用いた。しかし、そのまま用いるだけでは適した波形は求めることができないので、折線関数を速度波形にフィッティングさせることで補正をおこない変位波形を算出した。算出した変位波形の残留変位を地殻変動量とみなした。東北地方太平洋沖地震では強震計の加速度記録より算出した地殻変動量と近い地点に設置してある GPS 電子基準点の 1 Hz 解析データと比較をおこなった。福島県浜通り地震では、新たな断層が発見されたことから、断層を境にしたときの地殻変動量の違いの考察をおこなった。

今後の課題としては、福島県浜通り地震でも GPS 電子基準点の 1 Hz 解析をおこなうことでより正確な時刻での変動量の推移の比較をおこなうことができる。この手法の構築により、今後の災害において、大地震の発生後に迅速に地殻変動量の分布や傾向を把握する可能性を示すことができる。

【参考文献】

- 1) 平井敬, 福和伸夫: 強震記録に基づく東北地方太平洋沖地震による地殻変動分布の算定, 日本建築学会構造系論文集, No673, pp341-350, 2012

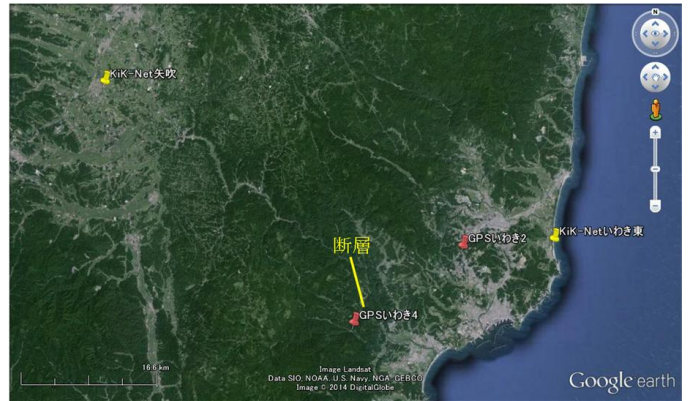


図 6 用いた強震計および GPS 電子基準点 (福島県浜通り地震)

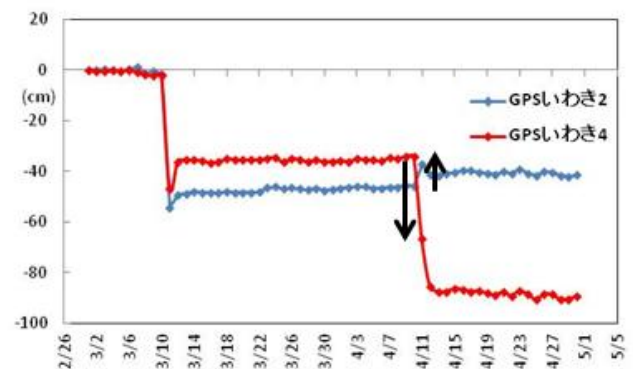


図 7 GPS 電子基準点による日々の変化量

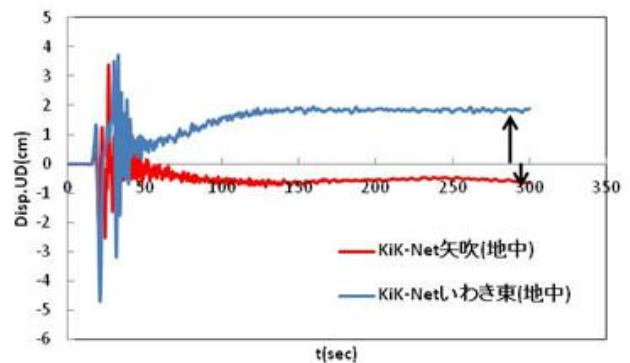


図 8 KiK-Net いわき、矢吹の変位波形

- 2) Berg, G. V. and G. W. Housner: Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion, Bulletin of the Seismological Society of America, No51, pp, 175-189, 1961
- 3) 気象庁: 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」について (第 35 報), URL: <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/11b/kaisetsu20110411820.pdf>
- 4) PPP kinematic solution for the Great Tohoku Earthquake, M9.0 1 Hz post-processing with global satellite clock estimated with real-time, URL: http://rtgps.com/rtnet_dl_eq.php