

津波に対するオンサイト警報に関する検討*

弘前大学 片岡俊一
弘前大学理工学部 炭田 航
弘前大学理工学部 腰塚優香

1. はじめに

日本では津波警報システムが整備されているが、それ以外にも警報システムを保有することは有益なことだと考えられる。特に警報を出す対象地点周辺のデータを利用し、リアルタイムに警報を出すシステムを考えることは有意義であろう。そこで過去の研究を参考に、警報を出す地点の地殻変動と地震動を利用することを考えた。Kamiyama et al.¹⁾は2011年東北地方太平洋沖地震を対象に、固定点無しの条件でGEONETのデータを独自に解析して求めた地殻変動量と気象庁の津波高さの調査速報の結果²⁾を比較し、地殻変動量のうち鉛直成分（沈下量）と津波高さとは強い線形性があることを示し、沈下量が津波の警報になる可能性を指摘した。確かに、地殻変動は強震動が終わる時点ではほぼ収束していることから、対象地点の地殻変動が計測できればオンサイト警報となる可能性がある。本報告ではまず、この点について検討する。

しかしながら、地殻変動と津波の高さの両者が既知である地震の数は多くない。この欠点は、地殻変動と津波伝播が同時に計算可能な数値解析手法を利用すれば解消されると思われるが、地殻変動をリアルタイムで得ることについては、更なる技術開発が必要と思われる。一方で、井上と大町は津波に先立って生じる海面変動がRayleigh波に伴って生じていることを示し³⁾、Rayleigh波を利用した早期検知手法を検討している⁴⁾。そこで、地震動と津波振幅との関係も検討した。

2. 地殻変動量と津波高さ

本検討では文献1)に倣うが、それとは異なるデータセットを用いた。用いたデータの概要を文献1)と比較して表1に示す。地殻変動量は国土地理院がウェブページ上で発表している沿岸観測局（以下、断らずにGEONET）の変動量一覧⁵⁾を用いた。このページには、青森県から千葉県までの49地点の本震前後および3年間の累積変動量が掲載されているが、そのうち11地点は3月12日に欠測したため、本震前後の変動量は発表されていない。また、津波との対応の関係で岩泉観測局とM牡鹿観測局の結果を本検討から除いた。結局、36地点の本震前後の変動量を対象とした。文献1)では津波調査結果を優先して、15地点を対象としており、本検討の方が数が多く、広い地域を対象としていることになる。一方の津波高さは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループにより計測された津波痕跡の調査結果（2012年12月29日時点）⁶⁾を利用した。両データが得られた地点を図1に示す。

表1 地殻変動量と津波高さの関係を求めたデータ

	Kamiyama et al. ¹⁾	本研究
地殻変動量	独自解析	国土地理院による
津波高さ	気象庁の緊急調査結果	合同グループによる調査結果
両者の対応	最寄り点	地殻変動観測点からある程度の距離内

* Study on on-site early warning for Tsunami by Shunichi Kataoka, Kou Sumita and Yuuka Koshiduka

文献1)では地殻変動量と津波高さとは最寄りの地点で対応させていたが、本検討では用いたデータセットの特徴から津波高さのデータが多いので、GEONET 観測局からある距離内にある津波高さのデータを平均することとした。当初は範囲を半径 2km としていたが、津波高さの計測点がその範囲にない例や、上記資料で沿岸とされている GEONET 観測局のうち、いくつかは海岸線から 2km 以上内陸に位置するものがあることから、距離の範囲を 5km、それ以上と段階的に広げて津波高さを求めた。

このようにして求めた津波高さを沈下量との関係で示すと図2になる。図では津波高さを求めた範囲が分かるようにマークを色分けしてあるが、距離が離れても沈下量が同じであれば津波高さもほぼ同じであることが分かる。図からは二つのグループがあるよう見える。一つは文献1)で指摘されているように、沈下量と津波高さに強い線形関係があるグループである。もう一つは、沈下量が小さいのに高い津波が観測されているもので、岩手県北部から青森県にかけての観測点（図に名称が書いてある点）で見られる。

津波を引き起こす地震による陸上部における地殻変動は震源断層との位置関係で変化すると考えられる。つまり、2011年東北地方太平洋沖地震だけでは一般的なことは言えないであろう。そこで、地殻変動量と津波の高さの関係が分かる2003年十勝沖地震を対象に前述と同様の検討を行った。地殻変動量は国土地理院のウェブページ¹⁾に掲載されている図から読み取り、津波高さは合同調査グループの値²⁾を用いた。

両者の対応は前述と同様に行ってい
る。GEONET 観測局と津波高さの
計測位置を図3に示す。

2003年十勝沖地震の際の沈下量
と津波高さとの関係を図4に示す。
2003年十勝沖地震の沈下量は2011
年東北地方太平洋沖地震のものに比
べて小さいことが分かる。沈下量が
大きくなるに従って、津波高さは高
くなることは分かる。図中、青線が
文献1)に示された回帰曲線、緑線は
図2に示したデータのうち、沈下量

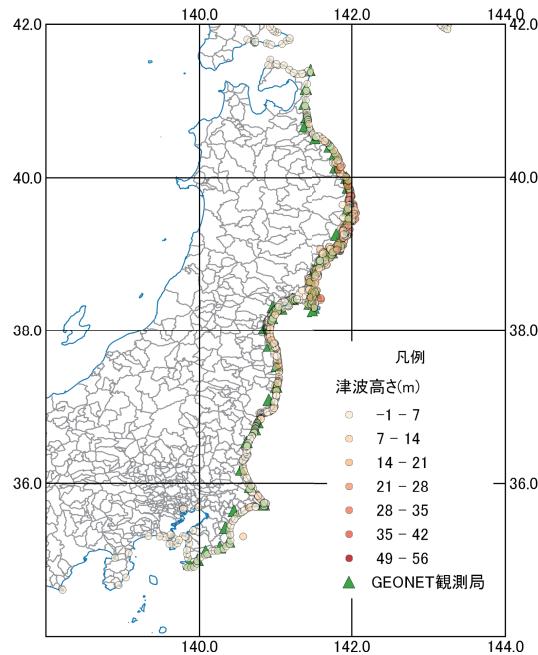


図1 GEONET 観測局と 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の津波高さ計測点

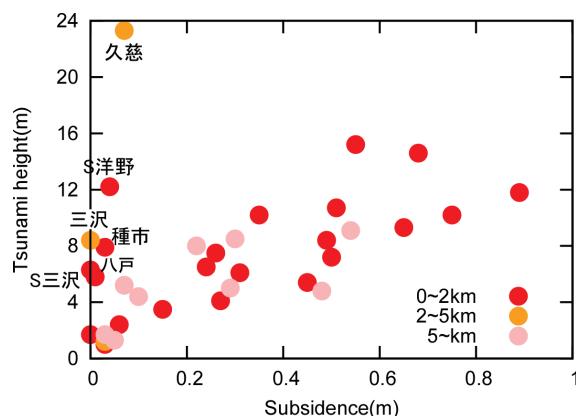


図2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の鉛直成分地殻変動量と津波高さとの関係

が0.1mを超えるデータのみで求めた回帰式である。回帰曲線を介して沈下量と津波高さとの関係を2011年東北地方太平洋沖地震のものと比較すると、文献1)に示されたものとは対応するように見えるが、見かけ上の現象と思われる。

以上をまとめると、地殻変動のうちの沈下量が大きな地点では高い津波が来ることは分かるが、津波高さの定量的な推定は難しいと思われる。様々な地震の際に、両者の関係がどのようになるかは、数値計算でも確認ができるので、今後はこのようなデータについても検討することが必要であろう。

3. 地震動と津波振幅との関係

地震動と津波振幅との関係を調べるために、気象庁のウェップページで津波データ⁹⁾と検潮所の場所¹⁰⁾を探した。ついで検潮所近くの強震観測点を防災科学技術研究所¹¹⁾および港湾空港研究所¹²⁾のウェップページから探した。

気象庁のページによれば、日本の近くで起きた地震による津波は、2003年から2012年までの期間では23件あるが、複数の検潮所の近くで強震記録が得られているものは11件であった。この11地震を2011年東北地方太平洋沖地震、千島列島で起きた地震、駿河湾で起きた地震のグループとそれ以外の8地震のグループに分けた。11地震の震央位置と各地震で津波を観測した検潮所の位置を図5に示す。11地震のうち8地震は海溝沿いに起きた地震であり、地震

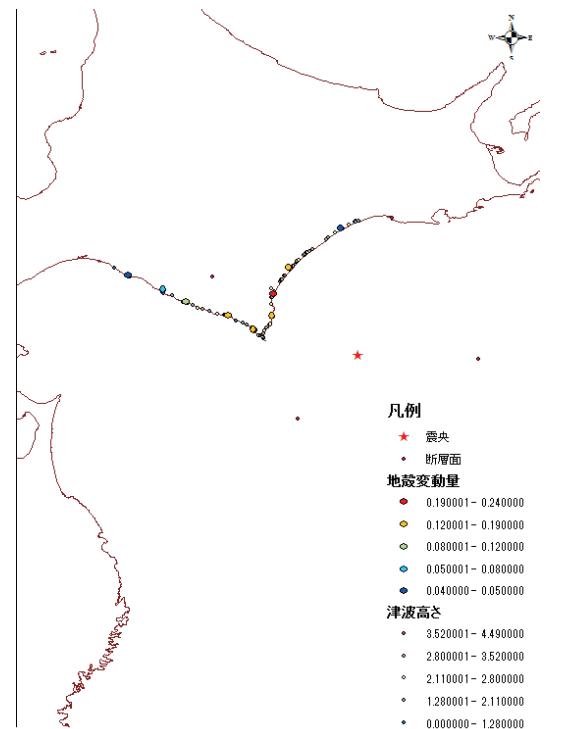


図3 2003年十勝沖地震の際の鉛直成分地殻変動量と津波高さ

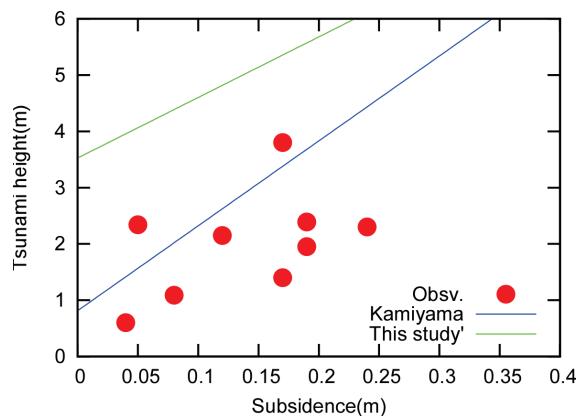


図4 2003年十勝沖地震の際の鉛直成分地殻変動量と津波高さとの関係

規模からも比較的頻繁に起こるものと考えた。以下、平均的な地震と称する。一方、3地震は11地震のうちで特別な条件のものと考え別個に考えることとした。なお、津波は海峡を抜けることから、太平洋岸で起きた地震でも日本海やオホーツク海に面している検潮所でも津波が観測されている。しかしながら、その潮位変化には海峡の存在が強く影響すると思われることから、海峡を通過した津波振幅は検討対象外とした。

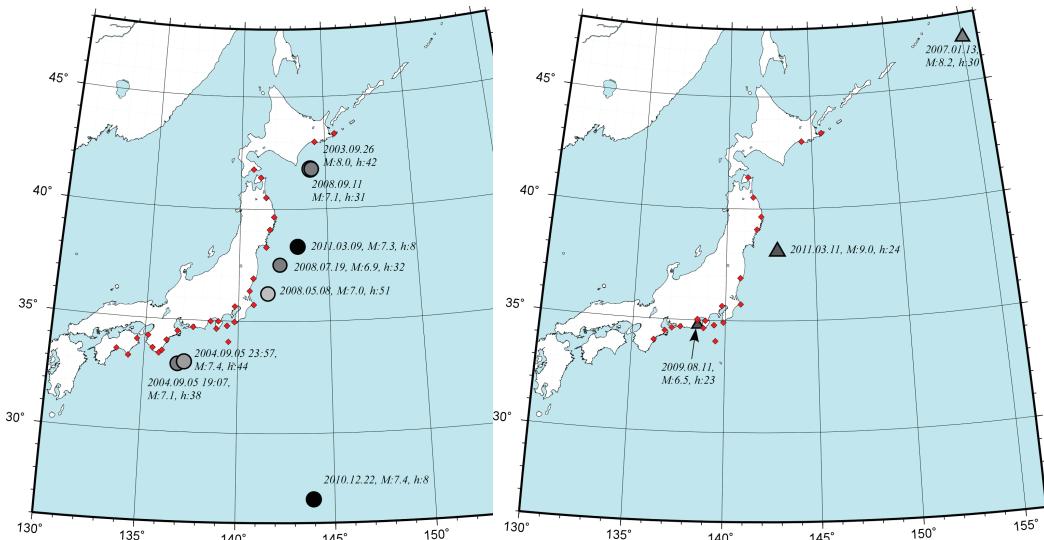


図5 潮位変動と地震動との関係を調べた地震の震央位置（丸または三角印）と潮位観測点の位置（赤丸）

強震観測点で得られた地震動記録の内、文献3), 4)で検討されていたRayleigh波に対応させるために鉛直成分に着目した。さらに、地震動指標としては、長周期成分に着目したほうがRayleigh波の影響が分かりやすいと考え、加速度記録を積分して変位を求めた。加速度記録から変位波形を求めるには、様々な手法があり独自の手法では再現性に欠ける可能性がある。そこで、本検討では、フリーソフトのSMAD2¹³⁾を用いることとした。このプログラムであれば、カットオフ周期を固定すれば誰が実施しても同じ結果となる。本検討では、カットオフ周期は40秒とした。

観測加速度記録とそれを積分して求めた変位成分の例を図6に示す。変位の最大値は加速度の主要動に遅れて表れているが、見かけの周期は約20秒程度である。カットオフ周期を40秒としたが、その周期は明瞭ではなく、図からは積分に伴う長周期ノイズの増大は見られない。全ての地震動記録を確認したが、積分に伴う長周期ノイズは見られなかった。以前の強震計は長周期帯域の信頼性に問題があるとされていたが、最近の強震計では改善されているのである。表面波マグニチュードは周期20秒のレイリー波の振幅から決めることになっているが、本検討で見ている地動はこれに対応するのであろう。

平均的な地震に対して、最大変位と津波の最大量振幅との関係を描いたものが図7である。最大変位が小さいものが多いことから、小さな最大変位の部分を拡大している。図からは最大変位が大きくなると津波振幅は大きくなるが、両者に明瞭な関係は

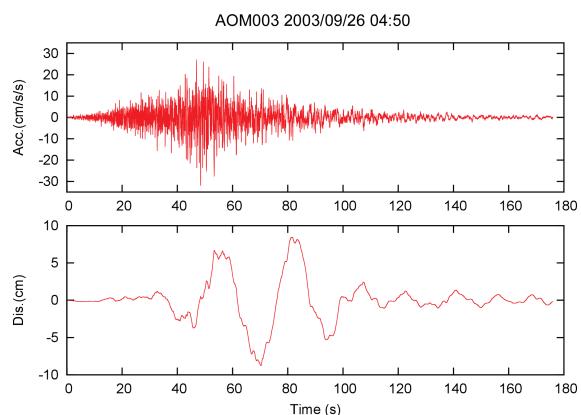


図6 2003年9月26日04:50に起きた地震の際にAOM003（大畑）で観測された加速度記録とそれを積分した変位波形

見えない。ただし、データ群には下限があるよう見える。試みに、図に最大変位の10倍 ($y=10x$ 、単位は両者cm) の線を実線で引いてみたが、大凡下限に対応しているよう見える。最大変位が3cmを大きい場合には、 $y=40x$ が上限に対応するようにも見えるが、最大変位が3cmを超えるものは2003年9月26日におきた2003年十勝沖地震のみなので、地震の特性とも考えられる。

特別な例としてあげた3地震について、最大変位と津波振幅との関係を描くと図8のようになる。遠地および駿河湾内で起きた地震の変位はそれほど大きくなく、津波振幅も大きくはない。ただし、この津波振幅は上限の目安である

$y=40x$ よりも大きな値である。一方、下に示した2011年東北地方太平洋沖地震の場合は、2地点を除いて津波振幅が上下限のなかに収まっている。収まらない2地点はいずれも北海道の観測点である。

4.まとめ

津波のオンライン警報の可能性として、地殻変動量のうちの沈下量と鉛直地震動の最大変位を取り上げて観測値を用いた検討を行った。本報告の結果では、津波の定量予測は無理であるが、津波の到来を警報できる可能性は有していると考えている。今回の報告は初期段階であり、水平変動量の利用や地震動と津波の距離減衰の検討がさらに必要と考えている。また、警報に利用するのであれば、震源情報の利用と2つの情報の相互利用も必要であろう。

謝辞

本研究はJSPS科研費26560169の助成を受けたものである。また、防災科学技術研究所および港湾空港技術研究所の強震記録を利用した。記して謝意を示す。

参考文献

- Makoto KAMIYAMA, Masata SUGITO and Masumitsu KUSE: Precursor of Crustal Movements before the

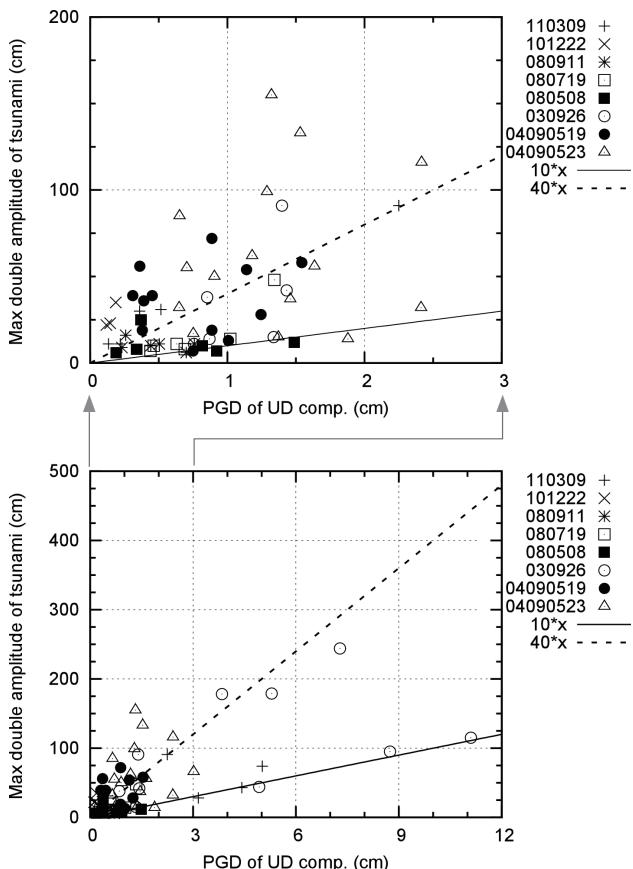


図7 地震動の鉛直最大変位と潮位変動の最大両振幅との関係(8地震)。上図は下図の変位が小さい部分の拡大

2011 Great East Japan Earthquake,
Proceedings of the International
Symposium on Engineering Lessons
Learned from the 2011 Great East
Japan Earthquake, March 1-4, 2012,
Tokyo, Japan, 226-237.

- 2) 気象庁：災害時地震・津波速報 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震地震、気象庁災害時自然現象報告書、2011 年第 1 号、平成 23 年 8 月 17 日、224p、2011.
- 3) 井上修作、大町達夫：津波に先行する海面変動とレイリー波の解析的研究、土木学会海岸工学論文集、49, 281-285, 2002.
- 4) 井上修作、大町達夫：レイリー波を用いる津波早期検知手法の提案、土木学会海岸工学論文集、50, 316-320, 2003.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」以降の地震活動の評価、平成 26 年 3 月 11 日、<http://jishin.go.jp/main/chousa/14tohoku/index.htm>
- 6) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011) Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B (土木学会論文集 B2 (海岸工学)), Vol. 67 (2011), No.1, 63-66.
- 7) 国土地理院：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震に伴う地殻変動、<http://www.gsi.go.jp/cais/HENDOU-hendou18.html> (2016 年 1 月 13 日確認)
- 8) 津波工学研究報告、第 21 号、調査報告、東北大大学、2004.
- 9) 気象庁：各年の潮汐、<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/gaikyo/nenindex.php> (2016 年 1 月 13 日確認)
- 10) 気象庁：潮位観測情報：掲載地点一覧表、<http://www.jma.go.jp/jp/choi/list1.html>
- 11) 防災科学技術研究所：強震観測網、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 12) 国土交通省：港湾地域強震観測、<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 13) 防災科学技術研究所強震観測網：ユーティリティプログラム、Strong Motion Data Analysis Ver.2(SMAD2)、http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/share/utility_top.html (2016 年 1 月 13 日確認)

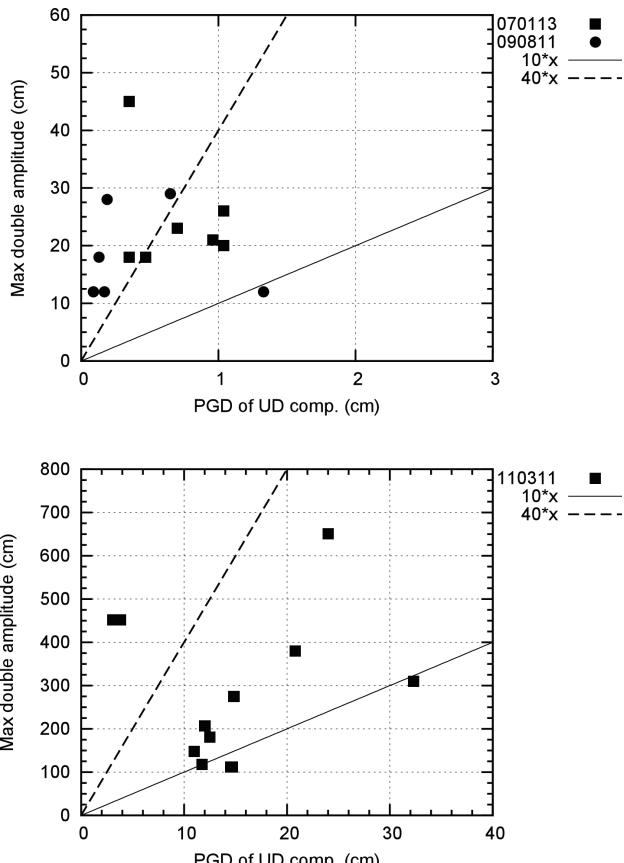


図 8 地震動の鉛直最大変位と潮位変動の最大両振幅との関係 (3 地震)。上図は下図の変位が小さい部分の拡大