

東北地方太平洋沖地震で発生した津波の伝播特性について

水工学研究室 永沢 薫

指導教員 犬飼 直之

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震の規模を示すマグニチュード(M)は9.0と、わが国観測史上最大の規模となった。この地震により発生した津波は、巨大な津波高と広範囲の浸水域、内陸の奥域まで浸水域が拡大したこと、河川を遡上した津波が氾濫したことなど、従来の想定をはるかに超えるものであった。今後このような巨大津波が発生した際の防災対策を正確に構築していくためにも、まず東北地方太平洋沖地震によって発生した津波の伝播特性を知る必要がある。また、被災地では津波がどのように来襲し、どのような被害をもたらしたのか、その挙動を把握しておくことも必要である。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震の津波について大領域および小領域で数値計算をおこない、津波が陸地付近へどのように近付き、さらに陸地へはどのように伝播・遡上したのかについて把握することを試みた。

2. 数値計算

① 津波再現計算

大領域の計算では、地盤変位量計算に断層パラメータを用いて推算する Okada(1992)の手法で計算をおこなった。この手法は、均質半無限弾性体の食い違い理論に基づいて変位量を求めており、断層パラメータを与え、弾性体内部の変形を求める計算式により、平変動量や鉛直変動量などを得ることができる。この計算で得られた変位量を津波計算の初期変位として与えた。地盤変位量計算に必要な断層パラメータは国土地理院および東北大学が公表している値を用いた。

小領域の計算では、GPS 波浪計で観測された波形を用いて計算をおこない、調査による各地点での津波痕跡高と比較をおこなった。なお、GPS 波

浪計とは、海岸から10~20km沖合に浮かべたブイの上下変動をGPS衛星からの電波によって計測し、波浪や潮汐等の海面変動を観測する海象観測機器である。

津波計算に使用したモデルは、津波伝播領域が南北に長いことを考慮し、球面座標系で作成された平面2次元の運動方程式および連続式を陽的に差分したもので計算をおこなった。以下に式を示す。

運動方程式 (経度方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv = -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + A_h \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2 \phi)}{a^2} u - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h)c^2}$$

運動方程式 (緯度方向)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu = -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \phi} + A_h \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2 \phi)}{a^2} v - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h)c^2}$$

連続式

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \{ (\xi + h)u \} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \{ (\xi + h)v \cos \phi \} = 0$$

② 津波予測計算

水工学研究室では長岡技科大津波伝播予測システムを構築している。これは加藤ら(2010)の手法で、津波計算開始時に必要な初期水位変動量を、地震速報で通知される地震エネルギーのみから推算が可能で、水工学研究室では今回の震災発生時にも予測計算をおこなった。ここでは予測結果と小領域での津波再現計算結果と比較をおこない、予測計算の確からしさを確認した。

3. 計算条件

① 大領域 (東北地方太平洋沖)

計算領域は、東北地方太平洋沖を十分に含む北

緯 32°~46°, 東経 136°~156°の領域を選択し, 地形データは, NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC)より提供されている, 地球全域の標高・水深を 1 分間隔の格子情報で表した Etopo1 を使用した. また, 大領域での計算の初期値で使用する地盤変位量の計算では, 断層隆起時間および隆起場所を, 表-1 に示す 4 つのケースに別けて計算をおこない, もっともよく再現できるケースを選定し, 津波の伝播特性把握に用いた.

表-1 断層隆起時間および隆起場所

パラメータ		断層隆起時間および場所
国土地理院	ケース1	宮城・岩手沖100秒, 福島沖60秒
	ケース2	全断層100秒
東北大学	ケース3	宮城・岩手沖50秒, 福島沖60秒
	ケース4	宮城沖50秒, 岩手沖50秒, 福島沖60秒

② 小領域 (岩手県北部沿岸域)

計算領域は, 市街地に津波が浸水した久慈市や, 壊滅的な被害を受け, 津波の全痕跡記録で 2 番目に高い 38m の場所がある野田村を含む, 北緯 40°~40°15', 東経 141°5'~142°5'の領域を選択し, 地形データは, 陸域では国土地理院が提供する 50m 数値情報を, 海域では日本海洋データセンターが提供する 500m 間隔の水深地形情報をさらに 50m 間隔に細分化したものを接合させて使用した. また, 入力波形は, 岩手県北部沖の GPS 波浪計で観測された波形を用い, 波の入射角度の設定には, 大領域での計算結果から小領域について拡大し, その波の入射角度を参考にした. 大領域の計算結果から, 小領域へは波が少し傾いて入射していることが分かったため, したがって図-1 に示すように, 小領域の縦格子数 600 に対し, 横 5 メッシュ (1 メッシュ=500m) の角度で入射させることに決定した.

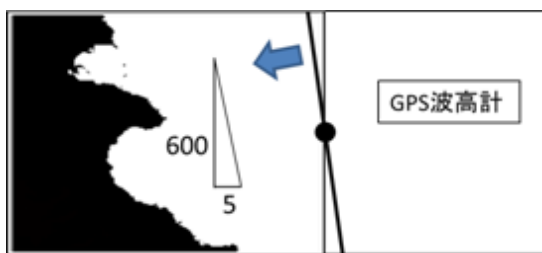


図-1 波の入射角度

4. 大領域の計算結果

① 波高比較

表-1 で示した 4 つの計算ケースの中で最も再現性の高い計算結果を伝播特性の把握に用いるため, 波高の比較をおこなった. 波高の比較には, 本研究で得られた数値計算結果と, NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) が提供している GPS 波浪計 (6 地点) による観測値を比較した. 図-2 に岩手北部沖での比較を示す. 全体的に 60 分以降は細かい波形の再現ができていないが, 被害が最大となった 60 分までは再現できている. この中で, ケース 4 の場合が最も実際の波形に近い挙動を示していることから, ケース 4 の結果を用いて, 以降の津波伝播特性についての検討をおこなった.

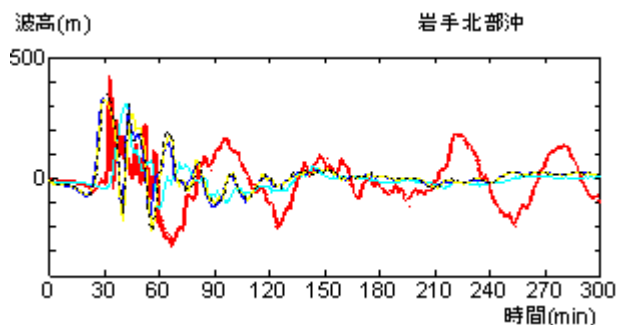


図-1 岩手北部沖での波高比較

② 津波到達時間

津波発生から, 引き波は考慮せず, 押し波による 1cm 以上の水位上昇変化がみられた時間を津波到達時間として図化したものを図-3 に示す. こ

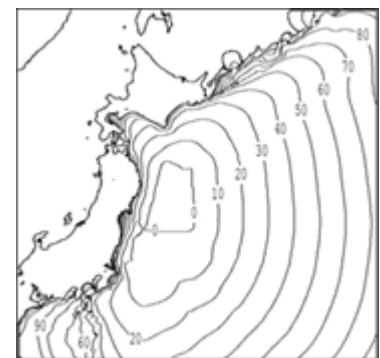


図-3 津波到達時間

の結果から, 岩手県宮古市や大槌町には地震発生から 20 分, 岩手県久慈市や福島県いわき市には 30 分, 北海道には 30 分から 40 分, 静岡には 90 分程度で津波が到達したと考えられる.

③ 津波伝播の様子

津波が伝播する様子を図-4 に示す. 岩手・宮城などの沿岸地域には引き波到達後 (10 分後の図),

押し波が到達している（27 分後の図）．それに対し、北海道の十勝や釧路，千葉県銚子は，引き波は微小で，直後に大きい押し波が到達している．また，三陸沿岸地域に対して仙台湾では押し波の到達が大きく遅れている様子が分かる．

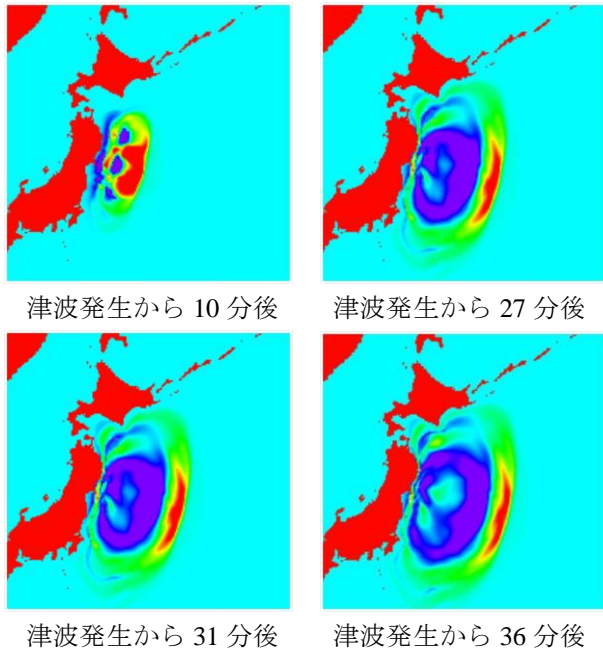


図-4 津波伝播様子

5. 小領域の計算結果

① 波高比較

計算結果と犬飼らの調査結果を比較した．図-5 に最大波高分布および各地点での波高を示す．久慈市街では，河川堤防を地形に考慮して

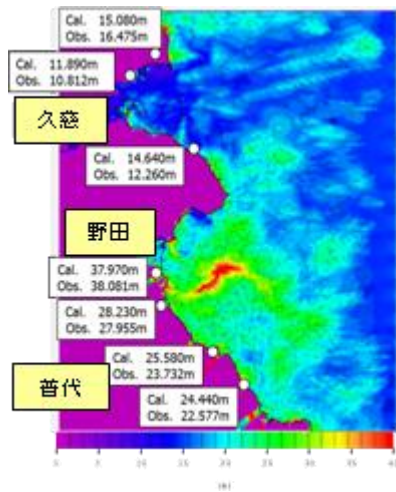


図-5 最大波高分布

まで遡上しているが，その他の地点では観測値に近い値となっており，津波の再現性は高いと考えられる．この結果を用いて，高い遡上痕跡や家屋破壊が多かった場所での津波の伝播状況を確認した．

② 津波伝播の様子

最大波高分布図内中央付近の 38m の遡上痕がある野田村米田地区へ，津波が伝播状況を考察した．図-6 に米田へ津波が伝播する様子を示す．久慈市と野田村の間にある岬に押し波がぶつかり南部の野田村方向へ反射した波と，普代村から野田村方向へ湾曲した地形に沿って北上した波が合わさり，野田村米田の近くで局所的に波高が高くなっている．今回の津波の入射角度と野田村周辺の地形の影響により，米田地区周辺に波が集中し波高が高くなったと考えられる．

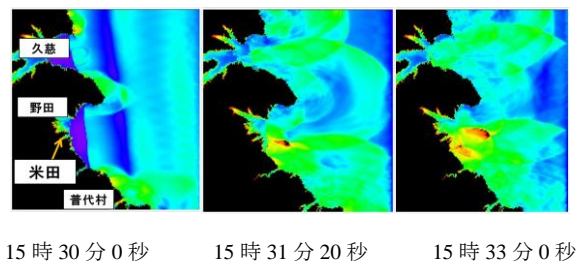


図-6 米田へ津波が伝播する様子

③ 家屋流出などの被害と流速および水位の関係

被害のあった場所および被害内容と，その場所での最大流速および水位を確認した．図-7 に久慈市街で最大流速となった時の流速分布図を示す．赤い点は国家石油備蓄基地の敷地の一部で，ここでは排水タンクや防波堤の損傷があった．また，黄色い点は久慈漁港の防潮堤の背後に位置し，家屋の浸水被害があった．流速分布によると，赤い点の排水タンク周辺では 7~8m/s，防波堤周辺では 11m/s，黄色い点の家屋浸水の周辺では 4~6m/s であった．

図-8 に野田村で最大流速となった時の流速分布を示す．野田村市街地の点線で示した場所にある堤防は大きく破壊され，点線の背後の市街地では多くの家屋の流出被害があった．流速分布によると，黄色い線の堤防付近で 10~12m/s，赤い領域の家屋流出周辺で 7~9m/s，米田の家屋残存周辺で 2~3m/s，家屋流出周辺で 6~8m/s であった．同様に数か所で被害と流速を確認し，表-2 のような関係が得られた．この結果の妥当性を確認するため，表-3 に示す飯塚・松富（2000）による家屋

破壊基準を参考にした。これによると、家屋浸水の流速は本研究の数値が大きくなったが、全ての家屋が流出する流速は 4.9~9.1m/s 程度となっており、本研究の結果の家屋や排水タンクの流出地点の流速とほぼ等しい基準となっており、本研究の結果は妥当性があると考えられる。また、生産技術研究所の中埜氏によると、今回の津波での建築物被害状況分析で、防波堤などの津波を遮蔽する効果のあった地域では流速 4~6m/s 程度、効果のなかった地域では 10m/s 程度で防波堤が破壊されてしまっているという結果が報告されている。これより本研究ので得られた、防波堤の損傷・破壊地点の流速が 10m/s 以上という結果についても十分妥当性があるといえる。これより、本研究の数値計算は良好な津波再現がおこなうことができたといえる。また、久慈市より野田村の方が水位や流速が速く、水位や流速の違いにより久慈市では浸水被害、野田村では防波堤破壊や家屋流出などの壊滅的な被害という差が生じたと考えられる。

④ 予測計算との津波到達時刻の比較

津波到達時間の予測結果と本研究の小領域での津波到達時間を比較したところほぼ同時刻となり、予測計算でも津波の到達時間は精度よく予測できる事が確認できた。

6. まとめ

観測値と数値計算による波高の比較や伝播時間の比較により、大領域、小領域ともに比較的良好的な津波再現計算をおこなうことができた。また、家屋流出や堤防の破壊などの被害があった場所での水位や流速を確認したところ、被害と水位および流速の関係について明確にすることができ、久慈市と野田村の被害に差が生じたことを定量的に把握することができた。

表-2 小領域での被害と流速の特性

被害	流速(m/s)
家屋浸水	4~6
家屋・排水タンク流出	6~9
防波堤の損傷および破壊	10~12

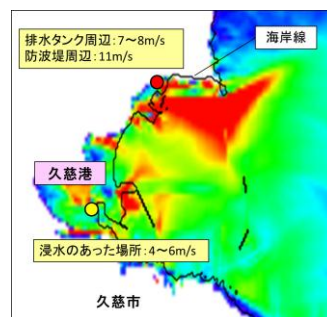


図-7 久慈市での最大流速

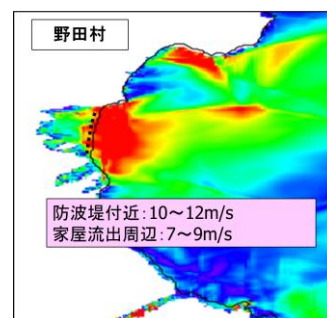


図-8 野田村での最大流速分布

表-3 飯塚・松富（2000）による家屋破壊基準

家屋の種類	中破壊	大破壊
	流速(m/s)	流速(m/s)
鉄筋コンクリート造	—	9.1以上
コンクリート・ブロック造	6.0	9.1
木造	4.2	4.9
被害程度	柱は残存、壁の一部が破壊	壁と柱のかなりの部分が破壊されるか流失

参考文献

- 1) Y.Okada : INTERNAL DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp1018-1040, 1992
- 2) 東北大学大学院工学研究科, 附属災害制御研究センター, 今村文彦ら: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施, 東北大学モデル (version1.0)
- 3) 加藤 文章: 地震津波の発生判断基準および伝播予測手法の開発, 長岡技術科学大学学士論文, 2010
- 4) 土木学会海岸工学委員会, <http://committees.jsce.or.jp/coastal/>
- 5) 国土地理院, <http://www.gsi.go.jp/>