東北地方太平洋沖地震津波の広域沿岸挙動に関する研究

Large Scale Coastal Behavior of the 2011 Tohoku Tsunami

伊藤亮一¹・佐藤慎司²・劉 海江³・田島芳満⁴

Ryoichi ITO, Shinji SATO, Haijiang LIU and Yoshimitsu TAJIMA

Large scale fluid motion due to the 2011 Tohoku Tsunami was investigated by decomposing the water surface elevation computed by the linear wave theory through spectrum analysis. Dominant periods of nearshore fluid motion are extracted from the water surface elevation at the depth of 10m. The power spectra and phases at the alongshore points are compared. From these results, cross-shore and alongshore long-period oscillations are described in Sendai Bay, which appear to be consistent with the large runup height especially at the center and the both ends of the Sendai Bay. It appears that the long-period motion with period of 80 minutes propagates southward alongshore as edge waves. Standing alongshore wave motion which is not consistent with the dispersion relationship of edge wave is also detected.

1. 序論

東北地方太平洋沖地震津波は東日本沿岸域広域に影響し、津波の流体運動は24時間以上継続したことがGPS波浪計の記録などから確認されている。観測された津波の遡上高は地域によって大きく異なり、例えば佐藤ら(2012)の実施した痕跡高調査では、福島県富岡町において、地理的に近傍であり同じく平坦な地形を持つ南相馬市の2倍近くもの高さを記録している。沿岸方向の津波の流体運動に関しては未だ説明されていない部分が多く、本研究では津波による長周期の流体運動と沿岸地形特性の関係を明らかにすることを目的とした。対象領域は、牦鹿半島先端から房総半島までの沿岸域とした。複雑な形状を持ったリアス式海岸の影響が大きいと考えられる牦鹿半島以北の沿岸域は解析対象から除外した。

2. 解析手法

計算モデルは球面座標の線形長波モデルを用いた。計算時間は400分、グリッド間隔は緯度経度共に0.01度で、計算時間間隔を2秒とした。牦鹿半島の先端から房総半島に至るまで水深約10mのグリッドを順に繋いで取りだし、図-1に示すように $N=1\sim 442$ の番号を与えた。

(1) 卓越変動成分の抽出

各地点において、沖に設定した基準点に対するクロススペクトルをとり、伝達関数の絶対値を得たものが図-2である。基準点は沿岸に到達する波と整合する波である

と考えられる点が望ましく、岸に近すぎず、初期波形の海面の変動領域からも距離のある、北緯38度1分31秒、東経142度35分30秒の地点とした。

本研究では周期20分以上の周波数を持つ長周期波に着目し、図-2で伝達関数の大きい周期133, 80, 67, 44, 36, 33, 31, 27分の8周波数について分析を進める。

(2) 水位変動の平面分布特性に関する解析

抽出した8周波数を持つ変動成分の沿岸域全体での挙動を考察するため、各周波数成分のみを抜き出した水位分布図(図-3)を作成した。 $T=36$ 分の波は $T=31$ 分とほぼ同一の傾向を持ち、図-2で伝達関数の大きい地点が比較的少なかったため割愛した。計算した領域の全グリッドにおける水位変化時系列データから対象の周波数の成分のみを取り出すことで特定の周波数成分による水位変動を得た。仙台湾中央部の水位が最も高くなる時刻の水位

図-1 伝達関数の基準点と主要地点沿岸域における位置番号(括弧内の数字は地点番号 N に対応)

1 学生会員	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
2 フェロー	工博 東京大学教授 社会基盤学専攻
3 正会員	博(工) 東京大学准教授 社会基盤学専攻
4 正会員	Ph. D. 東京大学准教授 社会基盤学専攻

分布をそれぞれ示している。

(3) 各周波数成分の沿岸方向特性に関する解析

それぞれの変動成分の伝播形態を探るため各地点の水位データをFFTにかけ、それぞれの周波数に対応するパワースペクトルと位相の沿岸分布を示すグラフ(図-4)を得た。沿岸方向に周期的な波が等速で伝わる時、パワースペクトル S_n は一定で位相は直線的に変化すると考えられる。一方沿岸方向に定常波の性質を持っているとき波は進行しないため、隣り合う節から節まで位相は一定であり、 S_n は腹で最大、節で最小となると考えられる。節における位相の断続的な変化と腹における S_n のグラフが山型の概形を描くことが主な定常波の性質であり、こ

図-2 伝達関数の周期分布

図-3 各周期の波による平面水位分布

れらの特徴をふまえた上で図-4を分析することで沿岸方向の伝播特性を明らかにした。なお位相が $-\pi \sim \pi$ の範囲で表示されているため、実際は位相が滑らかに変化していてもグラフ上では断続的に変化するように見える箇所もある点に注意する必要がある。なお S_n は各図の下に示した H_0 と T_0 の値を用いて無次元化している。

3. 各領域における津波の流体運動の特徴

牦鹿半島から房総半島に至る沿岸域に見られる津波流体運動の特性を各周波数に対して分析した。 $N=1 \sim 133$

図-4 パワースペクトルと位相の沿岸分布

図-5 エッジ波の分散関係との比較

図-6 東北地方太平洋沖地震津波の痕跡高 (東北津波合同調査グループ, 2011)

を領域A, $N=134 \sim 267$ を領域B, $N=268 \sim 325$ を領域C, $N=326 \sim 442$ を領域Dとしてそれぞれの領域において卓越している波動モードを考察する。

(1) 領域A (仙台湾)

領域Aでは複数の湾水振動の存在が確認された。本節ではそれらを、湾奥部を腹、湾口付近を節とする岸沖波動モードと湾の両端を腹とする沿岸波動モードに分けて考察する。一方で進行性の沿岸波動も確認され、分散関係をエッジ波の理論と比較した。また仙台湾における湾水振動について、観測された週上高分布との関連性の考察、近似的に得られる理論的周期との比較を行った。

a) 岸沖モードの湾水振動

岸沖モードの運動では湾奥を中心に腹線と節線が交互に現れる。1次モードでは湾奥部を腹、湾口付近を節として湾全体が同一の振動をし、モード数が増えると節線

の数が增加する。例えば図-3の $T=133$ 分では湾奥で水位が高く、湾口に向かって水位が減衰していることが確認でき、岸沖一次モードの性質を明確に示している。次に図-4(a)に目を移すと領域A(横軸 $N=1 \sim 150$)で S_n は一つの山型を描き、湾奥部($N=50 \sim 80$)で大きな値を示している。このことから湾奥部で最も振幅が大きいことが分かる。また湾全体で位相の変化が僅かであることから湾全体がほぼ同一の位相で振動をしていることが確認できる。

図-3の $T=44$ 分の平面水位分布は、湾奥部を腹として、湾口付近と湾の内部に2つの円弧型の節線が存在する、2次の岸沖モードの特徴を表す形状を示している。図-4(d)の領域Aでは位相の勾配が僅かな部分が断続的に繰り返して、定常波の性質が卓越していることは明らかである。なお、図-3で湾奥部の振動領域は2つに分断されているが、図-4(d)の S_n のグラフが、領域A内に $N=35$ 付近と $N=70$ 付近に2つのピーク域を持っていることから湾奥部の振動領域の分断は確認された。

$T=31$ 分の平面水位分布は湾奥部を中心とする円弧型の節線が2つ存在する岸沖振動の3次モードの特徴を表している。波峰線の湾奥を中心とした円弧型形状は湾口付近で崩れているが、湾口付近で水深が大きく変化していることが原因として考えられる。図-4(f)の位相分布グラフでは $N=60 \sim 150$ で勾配の小さい部分が断続的に繰り返す傾向が見られ、定常波の性質を示している。一方仙台湾北側にあたる $N=1 \sim 60$ では位相は滑らかに減少していて、この範囲では牡鹿半島から西へ進行する波が卓越していることが分かる。 $T=31$ 分の周波数を持つ波では仙台湾内の岸沖モードの湾水振動と東から伝播する進行波とが混在していることが分かった。

b) 沿岸モードの湾水振動

湾の両端から湾の中心に向かって腹線と節線が交互に現れるモードを沿岸モードと定義する。例えば1次モードは、湾軸を節線として湾の両端が腹となる沿岸方向の振動のことを指し、モード数が増えると節線の数が増える。

図-3で最も明確に沿岸モードの水位分布を示しているのは $T=27$ 分であり、湾の一端から他端に向かって山と谷が繰り返す分布傾向を明確に確認できる。節線が湾軸方向であり、異なる時間における水位分布でも振動の位置の変化は見られないことから、仙台湾の沿岸方向の波動モードであることは明らかである。節線は5つであり、沿岸5次モードであることが分かる。沿岸域では沿岸モードとは性質の異なる水位分布を示していて、沿岸方向に水位が周期的に変化するような分布傾向が確認された。図-4(g)で、位相のグラフは勾配の小さい範囲を断続的に繰り返す形状を示し、位相の勾配の小さい範囲に

対応して S_n が山型の形状を示していることから、沿岸域においても定常波の性質が卓越していることが分かる。沿岸部では水深、湾幅共に大きく異なるため、沖側と同一の振動を維持することが困難であり、湾奥の沿岸部においては岸沖モードの振動が卓越していた可能性がある。

$T=33$ 分でも図-3において湾の一端から他端に向かって山と谷が繰り返す沿岸モードの性質が確認された。節線が4つであることから、岸沖4次モードと考えられる。沿岸域では岸沖モードとは異なる水位分布傾向を示すが、定常波の性質を持つことが $T=27$ 分と同様に図-4(e)から確認できる。

c) 進行波

ほとんどの周波数に対して領域Aでは定常波の性質が卓越しているが、 $T=80$ 分では位相は N が大きくなるにつれて徐々に減少し、その傾向は $N=260$ まで持続していることが分かる。このことは領域A～Bにかけて牡鹿半島から南下する沿岸波が存在することを示している。エッジ波の理論的分散関係と照合したところ理論とほぼ完全に一致する結果が得られた(図-5)。なおエッジ波の波長は図-4で位相の沿岸方向変化より、単位距離当たりの位相変化を得ることで求めた。

エッジ波の分散関係は n をエッジ波のモード次数、海底勾配を α 、波数を k 、角振動数を σ_n として式(1)で与えられる。

$$\sigma_n = \sqrt{(2n+1)g\alpha k} \dots\dots\dots (1)$$

また前述のように $T=33$ 分でも $N=1 \sim 60$ の範囲で沿岸進行波は存在しているが、定常波との分離が困難であり、分散関係は不明である。

d) 分析結果と理論的周期の比較

分析により確認された岸沖波動モード、沿岸波動モードの理論的整合性を検討するため、近似的に得られる湾水振動の周期の理論値との比較を行った。湾水振動の周期は式(2)～(5)より求めた。岸沖モードでは湾奥から湾口の中心を結ぶ線分を取りその距離を図-2に図示したように L 、その線分上の平均水深を h とした。沿岸波動モードは最も明確に振動傾向が表れた27分の水位分布を元に、沿岸モードの軸となる線分を定め、その長さを L 、線分上の平均水深を h とした。 n は自然数で振動のモード数である。

$$L = (n-1/2) \cdot \lambda / 2 \quad (\text{岸沖モード}) \dots\dots\dots (2)$$

$$L = n\lambda / 2 \quad (\text{沿岸モード}) \dots\dots\dots (3)$$

$$T = L / v \dots\dots\dots (4)$$

$$v = \sqrt{gh} \dots\dots\dots (5)$$

表-1 湾水振動周期の理論値と解析値 (min)

岸沖・沿岸	岸沖	岸沖	岸沖	沿岸	沿岸
モード	1	2	3	4	5
周期 (理論値)	167	55	33	38	31
周期 (解析結果)	133	44	31	33	27

$h=33.9\text{m}$, $L=45.6\text{km}$ (岸沖波動モード) $h=31.8\text{m}$, $L=82.5\text{km}$ (沿岸波動モード) をそれぞれ式(2)～(5)に代入して表-1の結果を得た。理論値と比べて全体的にやや小さい周期が得られたが、理論的周期は近似的値にすぎないこと、FFTによる解析は各周期の大きさに差が大きく厳密に値を吟味できる性質の手法ではないことをふまえると十分に妥当な結果である。

e) 津波運動の沿岸方向の分布特性と遡上高との比較

定常波は腹である地点で波高が高くなるはずであり、岸沖モードでは湾奥、沿岸モードでは湾の両端で波高が高くなる。図-6に示した観測遡上高では実際に湾の奥と両端で大きな遡上高が記録されており、これらの領域 $A_1 \sim A_3$ を図-4に示したところ、 S_n のピーク域と一致していることが確認された。

(2) 領域B (福島県・茨城県北部沿岸)

図-3で、波のエネルギーの領域B沿岸域への集中が見られる $T=80, 67, 44, 33, 31$ 分の周波数について考察した。図-4に基づき進行波と定常波を分類し、波長を得ることでエッジ波の分散関係と比較した。海底勾配が異なるため B_1 ($N=134 \sim 183$), B_2 ($N=184 \sim 267$)を区別した。

a) 位相とパワースペクトルによる考察

前述のように $T=80$ 分の波は岸に沿って領域Aから領域Bの南端まで南方に伝播している。 $T=67$ 分は位相の変化が僅かであり、領域B全体が同一の振動をする定常波である。 $T=44$ 分の位相のグラフでは、定常波の性質を示す断続的な変化と南下する進行波の性質を示す右肩下がりの変化の双方が確認された。しかし S_n がほぼ0となる明確な節点が存在することから定常波の性質が卓越しているとみなすことができる。同様に、 $T=33$ 分では図-4(e)から B_1 では定常波の性質を持つことが分かったが、 B_2 では定常波と進行波が混在していた。 $T=31$ 分では図-4(f)から定常波、進行波の性質が共に確認されたが、明確な節点が存在するため定常波と分類する。

b) エッジ波の分散関係との比較

前項の分析に基づいて進行波と定常波を分類し、 $T=80, 44, 33, 31$ 分についてエッジ波の分散関係と比較したグラフを図-5に示す。領域Bでは B_1 と B_2 で海底傾斜が大きく異なるため、 B_1 と B_2 に分けてグラフを作成した。沿岸波の波長は図-4をもとに算出している。すなわち進行波の波長は(1)c)と同様に求め、定常波の波長は S_n が極小

になる位置を節の位置とし、節間の距離を読み取ること
で計算した。領域B全域がほぼ同時に振動している $T=67$
分についてはエッジ波とは考えられないため、分析の対
象としていない。また、 $T=33$ 分は領域 B_2 において定常
波と進行波の分離が困難であったため、は B_1 のみ分析し
た。 $T=44$ 分と $T=31$ 分においては進行波と定常波が混在
していたが、前述のように定常波の性質が卓越している
ため定常波として波長を計算した。

領域 B_1 では分析の対象とした全ての周波数でエッジ波
の分散関係を満たした。一方領域 B_2 では理論直線と解析
結果は大きく乖離していた。 B_2 の海底勾配はおおよそ均一
なため、海底勾配の近似による誤差とは考えにくく、こ
の領域で確認された沿岸波はエッジ波ではないと考える
のが妥当である。特に $T=80$ 分の波は大きく理論式から乖
離している。図-4(b)でAから B_2 に至るまで位相が滑ら
かに減少していることから、A $\sim B_1$ に伝播しているエッ
ジ波のエネルギーがそのまま B_2 にも伝達されたと考える
のが自然であるが、 B_2 ではエッジ波とは分散関係の異な
る沿岸波に変化していることが明らかになった。

(3) 領域C (茨城県南部沿岸)

平面水位分布で沿岸域に波のエネルギーの集中が見ら
れた $T=27, 31, 33, 44, 67$ 分の波について領域Bの場合と同
様に考察する。

a) 位相とパワースペクトルによる考察

図-4から進行波と定常波を分類する。図-4(c)より、
 $T=67$ 分は領域C全域で同一の振動をする定常波である。
 $T=44$ 分は定常波であり、 $T=33$ 分では定常波と進行波が
混在している。 $T=31$ 分では領域Cの両端において定常波
が卓越し($N=271, 310$ にて S_0 が極大)、中央の領域では
位相が N と共に一次的に減少する南下する進行波の性質
が見られた。定常波の性質を持つのは領域の境界である
両端のみであったため次項では進行波として分析する。
 $T=27$ 分では位相の N と共に一次的に増加する傾向が確認
され、北上する進行波の性質を示した。

b) エッジ波の分散関係との比較

$T=44$ 分を定常波、 $T=31, 27$ 分を進行波として領域Bの
場合と同様に分散関係を図示した。 $T=67$ 分で見られた定
常波は領域Cと領域Dにまたがる現象であり、波長の算
出が困難であるため分析の対象外とした。進行波である
 $T=31, 27$ 分はエッジ波の分散関係に整合する結果が得ら
れたが、 $T=44$ 分の定常波は十分には一致していない。領
域 B_2 、Cいずれにおいてもエッジ波の分散関係と十分に
整合しなかったことから領域 $B_2 \sim C$ の全域で地形に対応
する固有振動が発生していた可能性が考えられる。

(4) 領域D (千葉県東部沿岸)

図-3において沿岸域への波のエネルギーの集中確認さ
れた $T=67, 44, 33, 31, 27$ 分の波について分析する。

a) 位相とパワースペクトルによる考察

領域B、C同様に定常波と進行波を分類する。図-4から
 $T=67, 44$ 分は定常波であり、 $T=27$ 分は南下する進行波で
あることが分かる。 $T=31$ 分は位相の変化は進行波の性質
を示しているものの節の位置の移動が確認できなかった
ため、定常波の性質も持った混合波である。また $T=67, 44, 33, 31$ 分では仙台湾における湾水振動で見られた岸沖
モードに近い平面水位分布が確認できた。 $T=67, 33$ 分の
水位分布は湾奥を中心にした扇型形状を示し、 $T=44, 31$
分では扇型形状の海面の起伏が沿岸方向に複数連なって
いる分布が確認された。隣り合う海面の山あるいは谷の
分布形状が沖側に弧を描き、お互いが接触して円弧を形
成する時刻があることがエッジ波による定常波とは水位
分布傾向が異なる点である。

b) エッジ波の分散関係との比較

$T=27$ 分の波を領域B、Cの時と同様、理論によって与え
られるエッジ波の分散関係と比較した。図-5のように理
論直線との整合性が高い結果が得られた。

3. 結論

本研究では東北地方太平洋沖地震津波の数値計算結果
から卓越していた変動成分を抽出し、それらの挙動を分
析することで沿岸域の流体運動が長期化した原因を検討
した。仙台湾では岸沖方向と沿岸方向の二種類の湾水振
動が複数のモードで混在していた。湾水振動による湾奥
と湾の両端における波のエネルギー集中が確認され、大
きな遡上高が観測された地域と一致した。一方仙台湾内
部からいわき市沿岸まで南へ伝播するエッジ波も確認さ
れた。いわき市から銚子にかけての内側に屈曲した地形
(領域 B_2 、C)と銚子以南の房総半島沿岸域(領域D)で
は重複性と進行性のエッジ波が確認されている。一方で
エッジ波の分散関係を満たさない沿岸波も確認され、そ
れらは仙台湾の湾水振動の岸沖モードに波高分布が近い
ことから、地形に対応する固有振動が発生している可能
性が示唆された。仙台湾といわきから銚子にわたる領域、
それら二つの凹地形に挟まれた領域(B_1)ではほぼ全て
の周波数において重複性のエッジ波が確認され、凹形状
の海岸地形両端部から伝播したエッジ波が重なり、重複
モードになっている可能性が考えられる。

参 考 文 献

- 佐藤慎司, Harry Yeh, 磯部雅彦, 水橋光希, 相澤広志, 芦野
英明 (2012): 福島県中部沿岸における2011年東北地方太
平洋沖地震津波の挙動, 土木学会論文集B2 (海岸工学),
Vol.68, No.2 (投稿中).
東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011):
<http://www.coastal.jp/tjtj>, 2012年5月参照.