

東京湾奥部における長波の振動特性

新潟大学工学部建設学科
新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所
中央大学理工学部

学生員○水口大輔
学生員 星野 剛
正員 安田浩保
正員 山田 正

1. はじめに

東京湾における津波などの長波の伝播特性は様々な観点から検討が加えられてきている。日野ら¹⁾は湾の形状に固有の長波の伝播特性について詳しく調べ、周期が60から90分くらいの固有振動が存在すること、波長の長い波ほどエネルギーの減衰が少ないことを明らかにしている。同湾における津波の伝播や遡上については歴史的な観点(羽鳥²⁾2006)と流体力学的な観点(高山³⁾1983、海上保安庁⁴⁾、相田⁵⁾1996)の両者から調べられ、東京港などの湾奥では波高が2mを超える可能性は高くないとされている。

2011年3月11日の東北地方太平洋地震により生じた津波は、最大波高が2m程度の広帯域のスペクトルを含む波形として東京湾に侵入した。その結果、湾奥の東京港や横浜港では湾口と同程度の2mの波高が観測されたうえ、荒川や江戸川を遡上してその河口から25km以上の上流地点にまで到達したことが確認されている。過去の同湾における津波現象では湾口波高と比べて湾奥波高は大きく減衰することがほとんどであったのに対し、この津波は湾奥地点でさえも波高が減衰されないまま到達している。そのうえ、湾口に到達時に複数の高周波成分を含んだ波形は、湾奥各地では低周波だけで構成される波形が観測されたことが特徴として挙げられる。

このような特徴的かつ既往研究の見解とは異なる湾奥への伝播過程やその機構の理解は、人口や資産が集積する湾奥の防御や湾に接続する河川の津波遡上の入射条件を考える上で極めて重要である。これに対し、現在までのところ湾奥部に固有の振動特性については十分に解明されているとは言えない。本研究では、まず、東北地方太平洋地震津波の東京湾における伝播の再現計算を行った。続いて、湾奥部の複雑な海岸線が形成する場における振動特性について詳しく調べた。

2. 東北地方太平洋地震津波の再現計算

(1) 湾奥部での振動特性

東北地方太平洋地震津波の東京湾口部観測された波形を図-2、湾奥部の沿岸で観測された波形を図-4の上段の赤線で示した。

波高の観点から湾口と湾内の4地点の波形の比較をする。湾口部での最大波高が2m程度であったのに対し、湾内のいずれの地点においても同程度であることが見て取れる。東京湾に入射した津波は、湾口から湾奥に向かって減衰する(日野¹⁾、高山³⁾)ことが明らかにされている。このことは、羽鳥²⁾が示した既往の津波の

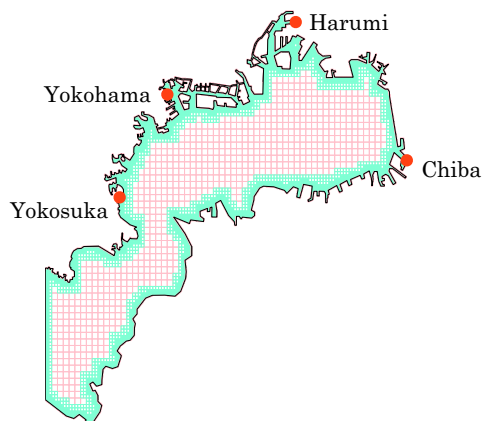


図-1 計算格子

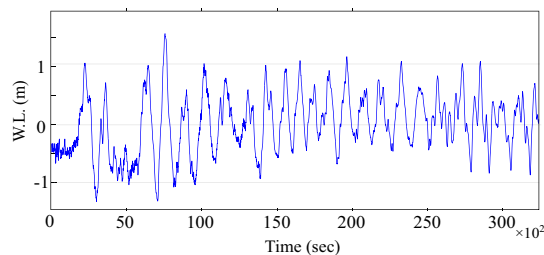


図-2 布良での観測波形

最大波高図とも一致する。これに対して、湾内で観測された波形から波高の減衰傾向を認めることは難しい。

周期の観点で湾口と湾内の4地点の波形を比較する。東京湾の湾口部ではスペクトル解析により卓越周期は21分程度であり、この他にも多数の高周波成分を含んでいた。一方で、図-4に示した湾内の4地点のうち、横須賀以外の観測波形には30分以下の高周波成分は含まれず、4地点とも卓越周期は67分であった。高山ら³⁾の解析結果においても晴海のような湾奥部において同様の傾向が示されているものの、このような波数モードの遷移がいかなる理由で生じているかについては触れられていない。なお、紙面の都合で5地点の実測波形のスペクトル解析の結果は割愛する。

現状では、湾奥部における津波などの長波の振動特性やその発生機構については十分に理解されているとはいえない。そこで、一般性を有する湾奥部の振動特性を理解するための第一段階として、以下において東北地方太平洋地震津波の再現計算を実施することにした。

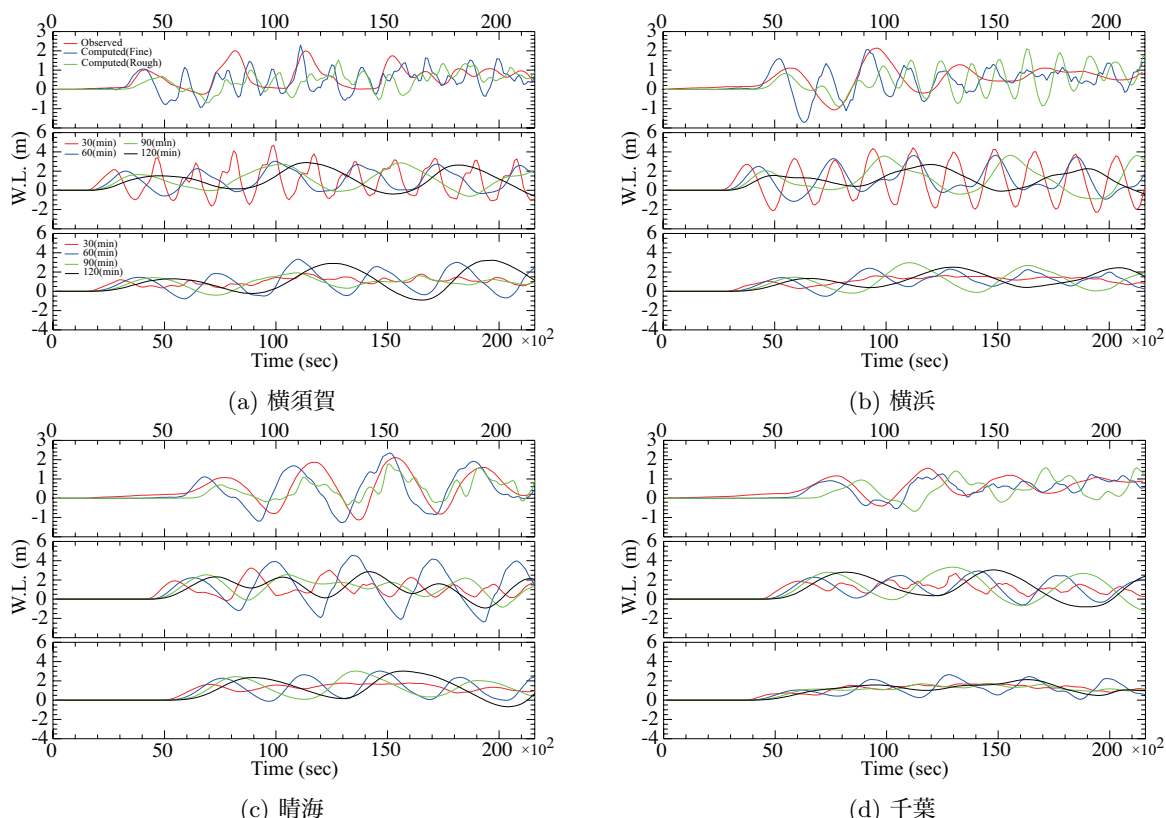


図-3 沿岸地点の時間波形 (上段：実測波形との比較、中段：周期波の入射実験・細密海岸線、下段：周期波の入射実験・簡略海岸線、凡例は共通)

(2) 境界適合法

図-1 から分かる通り、埋立地の造成などの人工改変が多数加えられているために極めて複雑な海岸線を形成していることが分かる。津波のような長波は平面形状に応答した共振特性を示すことから、海岸線形状を解析に忠実に反映することが不可欠である。これまでに様々な境界適合法が提案されているが、規則性重合格子とも言える四分木構造格子により境界適合を行うことにした。

本研究では、湾口部での観測波形から見積もられる波長や東京港の運河形状や荒川の川幅などに基づき、最長格子辺長を 1000m、以下、辺長を 1/2 ずつ縮小していき、500m、250m、最短格子長を 125m とする 4 つの面積レベルの格子層から構成される四分木構造格子を構成した。図-1 が海岸線形状を忠実に組み込んだ格子構成、図面は割愛するが海岸線形状を簡略表現した場合の格子構成も生成し、複雑な海岸線形状が沿岸部での振動特性に対して与える影響を把握することを狙った。

支配方程式には、各面積レベルの格子層ともに、直交直線座標系で記述される非線形長波理論を適用した。これらの式の数値計算は、連続の式、運動の式ともにスタッガード格子に基づく 2 次精度の Leap-Frog 法を適用した。

(3) 計算条件

初期条件は、計算開始時刻を 2011 年 3 月 11 日の潮位を東京湾の全体に与え、いずれの計算点でも流量フラックスを 0 に設定した。

境界条件は、湾口部に一様に図-2 示した布良での観測波形を与えるいわゆる水位の強制入射の条件とした。それ以外では完全反射の境界とした。

(4) 実測波形との比較

a) 全体傾向

図-4 の上段に横須賀、横浜、晴海、千葉の実測値と計算値の比較を示した。赤の実線で示した実測値、青の実線で示した海岸線形状を詳細表現した計算値の 4 地点の計算値に共通していることは、それぞれの地点の観測値と同じように高周波成分は見られないこと、最大波高は湾口部での最大波高と同程度であったことである。これに対し、緑の実線で示した海岸線形状を簡略表現した計算値は、実測値と比べると多数の高周波成分を含むことと、最大波高が実測値と比べると過小に評価されるという共通の相違が各地点で見られた。

b) 海岸線形状による振動特性の差異

図-4 上段内に青線で示した海岸線形状を詳細表現した各地点での計算値は実測値との比較から以下のことが言える。同図 a) に示した横須賀での計算値は、全体的に実測値よりも高周波側に計算される結果となった。このうち、第 1 波から第 4 波までの横須賀への到達やその後の水位上昇の傾向は良好に再現されている。同図 b) に示した横浜の計算値は、第 2 波と第 3 波ののピーク前後の再現性が良好ではないことが大きな相違となっている。それ以外では、若干計算値は高周波成分を多く含みがちであることを除けば、全体的な振動特性は比較的良好である。同図 c) に示した晴海での計算値は、第 1 波から第 4 波までの到達時間が実測よりも 5 分程度早く再現されてその分の位相のずれがあることを除けば、各到達波の最大水位、最小水位のいずれにも良好に再現していることがわかる。同図 d) に示した千葉での計算値は、第 1 波と第 2 波の到達時刻や最大水位の再現性は比

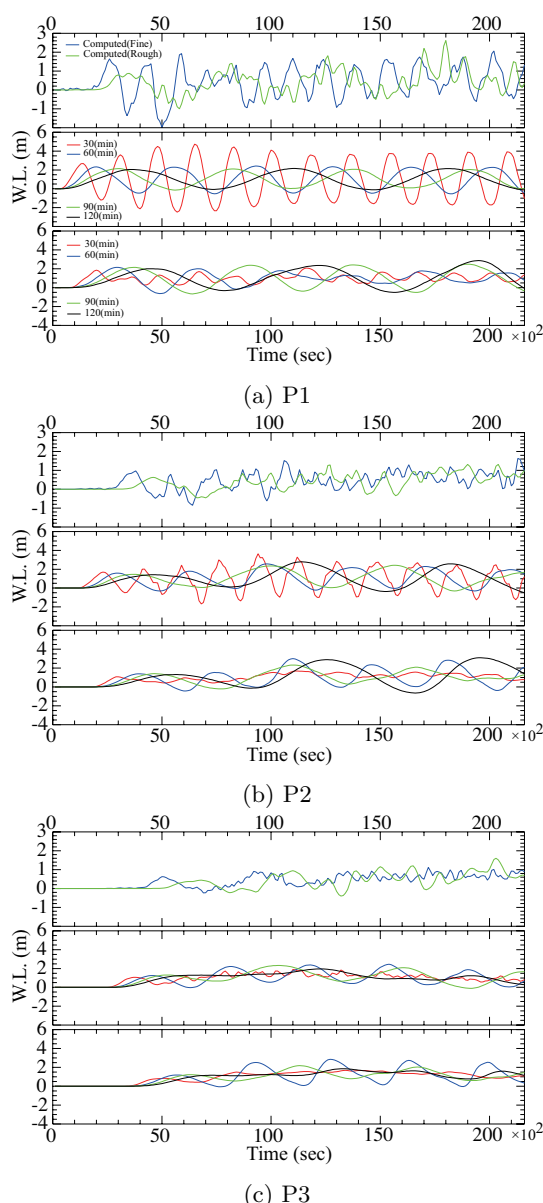


図-4 湾心地点の時間波形（上段：実測波形との比較、中段：周期波の入射実験・細密海岸線、下段：周期波の入射実験・簡略海岸線、凡例は共通）

較的良好であったものの、第3波以降は実測値と比べて高周波の振動が継続するなどの相違があった。

一方で、図-4 上段中に緑線で示した海岸線形状を簡略表現した各地点での計算値は、前述のように実測値や詳細海岸地形の計算値とは異なり、いずれの4地点ともに高周波成分を含んでいる。しかも、実測値からは明瞭に読み取ることができる第4波までの到達や最大波高の出現のうち、第3波以降の再現性は大きく低下する。

(5) 海岸線形状が振動特性に与える影響

前述までの海岸線形状の表現方法の比較から、沿岸での振動特性を把握するためには、海岸線形状を忠実に反映することが非常に重要であることが浮き彫りとなってきた。ここでは湾心に計算値の出力点を設け、海岸線形状が振動特性に与える影響について考える。湾心部に設けた出力点での波形を図-5 に示した。

周期に関して3地点ともに共通して言えるのは、沿岸の4地点の実測値と計算値と比べて高周波成分を含んで

いることである。湾口部の波形には高周波成分の混在が見られた一方で、沿岸地点での波形には卓越する高周波成分が含まれなくなった原因には、それぞれの観測地点が位置する港の局所的な形状が大きく影響していることが推測される。

最大波高に関しては、湾口部から遠い地点ほど小さくなっている。これは日野ら¹⁾の指摘とも一致する傾向で、湾口からの長距離伝播に伴う底面の摩擦損失がもたず波高減衰であると考えて良いだろう。また、P3 地点の最大波高は1mを下回っているにも関わらず、晴海や横浜の実測値の最大波高は2mを超えていることは注目に値する。湾心のP3 地点に到達した波形と沿岸の4地点の波形の比較から、これらの地点が位置する港内に到達した後に再増幅されていたことが原因であるものと推測される。

以上のことから、湾口部から沿岸部に到達するまでの伝播過程における(1)高周波成分の消失、(2)波高の再増幅はいずれとも局所的な地形形状に起因すると考えることが妥当で、そこでの固有振動が寄与しているものと考えられる。

3. 長波に対する振動特性

ここではまず、東京湾の幾何学形状に応答する振動特性について調べる。これは固有振動を求めていることに該当する。すでに日野ら¹⁾と相田⁵⁾によって東京湾の固有振動は調べられているが彼らが求めたのは東京湾の概形に対しての固有振動である。本研究では湾奥部の沿岸の振動特性の把握に焦点を当てていることから、複雑な海岸線形状に応答する振動特性を解析する。さらに、この結果に基づき、既往の見解からは説明が難しい晴海や千葉などの沿岸部における振動特性の出現の原因について考察する。

(1) 固有振動の解析法

湾内のような2次元的な場における固有振動の特性解析にはLoomis⁶⁾の方法がしばしば用いられている。しかし、この方法は、移流項と水底の摩擦抵抗を考慮していないために東京湾のように平均水深が20m以下と浅いような水域には相応しくない。本研究では、前章で採用した解析方法をここでも適用することにした。

(2) 計算条件

入射条件は、30分、52分、60分、75分、90分、120分の一様周期の波で、湾口部での入射波高を2mとし、これらの波形を図-1のa)とb)の二つの格子構成の与える合計12ケースの計算を実施した。ここで、52分、75分の周期はモード数3.5と2.5に該当する。

(3) 計算結果

実施した計算結果は図-4の中段と下段に沿岸の4地点、図-5の中段と下段に同じく湾心の3地点の時間波形、図-7に湾心における振幅履歴、図-8に伝播に伴う周期と波高の増幅率の関係を示した。

a) 湾心の振幅特性

湾心の振動特性の全体的な傾向としては、湾口で実測波形を与えた場合と同じように湾口から離れるに従って

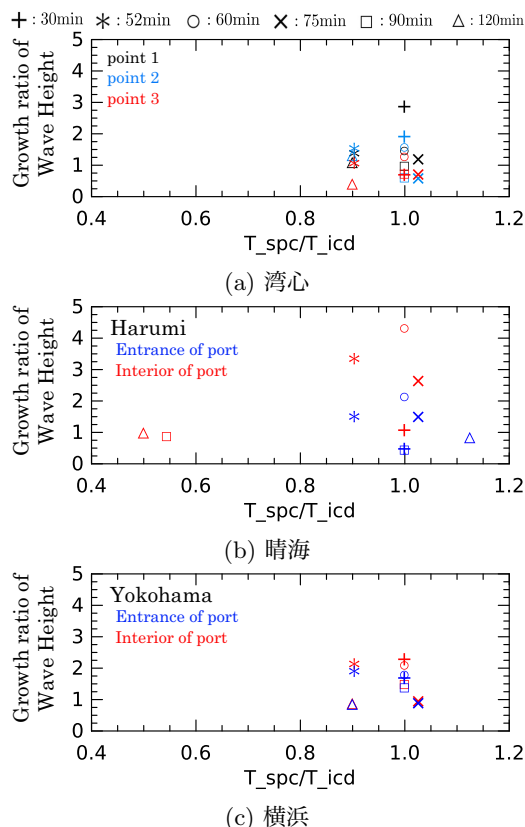


図-5 伝播に伴う振幅と波高 (海岸)

最大波高が減衰していることが読み取れ、その減衰は周期の短い波ほどに顕著である。この傾向に対し、52分と60分の波は伝播過程における波高の変化率が非常に小さく、ほとんど波高を変化させることがないことが明らかとなった。

この様子を図-8にまとめた。この図の横軸は周期の変化率、縦軸は波高の変化率を示している。周期の変化率はスペクトル解析で求めた観測地点での卓越周期と入射波形の周期の比としている。入射した30分、60分、75分、90分の波は周期をそれほど大きく変化させずに伝播していることがわかる。このうち、30分の周期波だけは他のものに比べて波高の大きな変化率が生じていたことがわかる。

図-7に湾心における振幅履歴を示した。横軸が湾口から湾心上の無次元距離、縦軸が波高増幅率である。まず、共振点である振動モードの腹が30分では5カ所、60分では3カ所、90分では2カ所、120分では2カ所が存在することがわかる。また、30分では無次元距離が0.45よりも大きくなると波高増幅率が1を下回るようになる一方で、それ以外では、60分では0.7付近と湾奥、90分と120分では湾奥で波高増幅率が1を上回ることが認められる。

これらのことを総合すると、いずれの周期でも波高を減衰させながら伝播する傾向にありながらも、60分から90分程度の周期の波では入射波高に相当の波高が湾奥でも生じるようである。

b) 沿岸の振幅特性

図-4の中段に示したように横須賀、横浜、晴海、千葉の4地点ともに共振が原因と考えられる波高増幅が生

じていたことがわかる。ここで興味深いのは、横須賀では30分と60分、横浜では30分、60分、90分、晴海では60分、千葉では90分の周期の波だけが入射波の波高を上回る波高まで増幅していたことである。このように計測地点により共振周期が異なるのは、沿岸部の振動特性は東京湾の概形が有する振動特性からよりも局所的な地形の影響を強く受けているためと推測される。

60分だけが増幅された晴海とその港口部（東京港）、30分、60分、90分の3つの波が増幅された横浜の港口部（横浜港）での振幅特性の比較を図-8に示した。この図のb)から晴海では52分、60分、75分の波が3から4倍程度もの波高増幅を示す。一方で、90分と120分はほとんど波高変化はしないものの周期をほぼ半減させることがわかった。同図c)の横浜では30分、52分、60分、90分の波が波高を増幅する一方、75分、120分ではほとんど変化がない。

これらのことから、それぞれの港には特定の周期にのみ鋭く応答する固有振動を有していることが分かった。つまり、4つの地点において比較的長い周期の振幅が観測されたのは、このような港が有する固有の振幅特性がローパスフィルターの役割を担ったためであると考えることができる。

4. おわりに

本研究では、東京湾奥部での津波などの長波の振幅特性の解明を試みた。すでに明らかにされている湾の概形に応答する振動特性だけでは湾奥部の沿岸での振動特性は十分に説明できず、その要因として、局所的な地形が非常に重要な役割を果たすことを指摘した。つまり、数kmスケールの港の形状がローパスフィルターの役割を果たすとともに、その幾何学形状に応答する共振の効果によって波高が増幅されることを明らかにした。このことは、人口と資産が集中する湾奥部の沿岸防災、そこに河口を有する河川への津波の侵入と遡上の取扱いに直結するため、極めて重要な知見である。

参考文献

- 1) 日野幹雄, 日野和子: 東京湾の侵入長波に対する振動応答特性, 海岸工学研究発表会論文集, Vol.11, pp98-107, 1964.
- 2) 羽鳥徳太郎: 東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東 (1703)、安政東海 (1854) 津波とその他の津波の遡上状況, 歴史地震, 第21号, pp.37-45, 2006.
- 3) 高山知司, 永井紀彦, 平石哲也: 東京湾の津波計算, 港湾技術資料, No.454, 1983.
- 4) 細萱泉, 伊藤清則: 津波シミュレーションによる津波防災情報図広域版 (150mメッシュ) の作製, 海洋情報部技報, Vol.27, pp18-27, 2009.
- 5) 相田勇: 東京湾近傍の地震による津波の特性, 地震, 2輯, pp217-226, 1996.
- 6) Loomis, H. G., 1996, Some numerical hydrodynamics for Hilo Harbor, Institute of Geophysics, Univ. Hawaii, HIG-66-7.