

## 東京湾奥部における長波の振動特性

安田 浩保\*・星野 剛\*\*・水口 大輔\*\*・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<sup>1)</sup>は湾の形状に応答する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。また、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<sup>2)</sup>と、流体力学的な観点<sup>3) 4) 5)</sup>から調べられ、東京港などの湾奥では波高が 2 m 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沖地震により生じた津波は、湾口付近での水位観測データ<sup>6)</sup>が存在するアシカ島での観測データから最大波高が 1 m 程度の波形として東京湾に侵入したことが確認された。その結果、湾内の東京港や横浜港では湾口での最大波高よりも高い 2 m の最大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 25 km 以上の上流地点にまで到達したことが確認されている<sup>8)</sup>。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。

このような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沖地震津波の東京湾における伝播状況を数値計算により再現した。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. 東北地方太平洋沖地震津波の再現計算

## (1) 湾奥部での振動特性

東北地方太平洋沖地震津波において湾口部に位置して湾内に侵入した津波の観測波形が存在するアシカ島を本研究では湾口とみなし、それより湾奥を比較および計算の対象領域とした。港湾空港技術研究所が提供しているアシカ島での観測波形を図-1に示し、湾内の

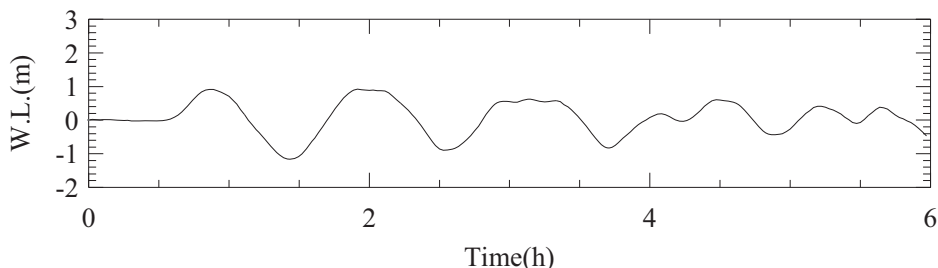


図-1 アシカ島波形

\*新潟大学 災害・復興科学研究所

\*\*新潟大学大学院 自然科学研究科

\*\*\*中央大学 理工学部

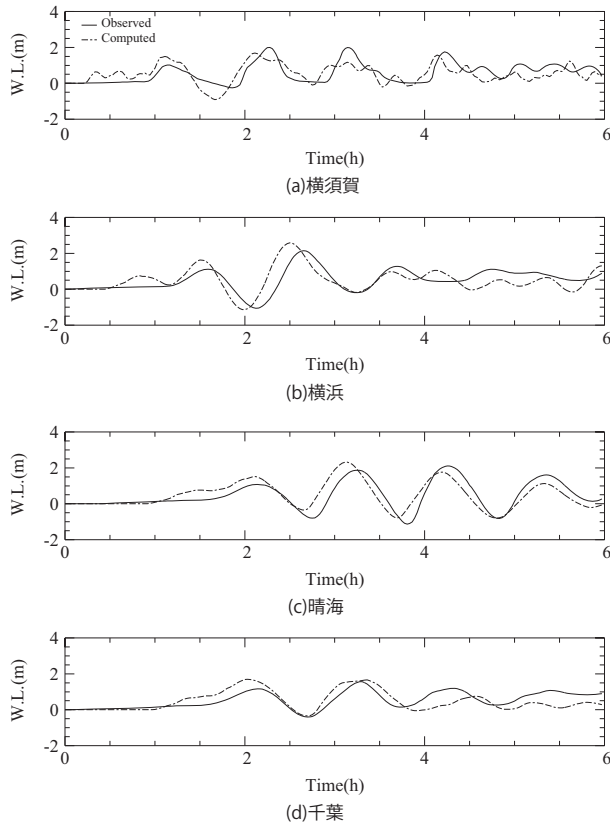


図-2 沿岸における観測波形

沿岸で観測された波形を図-2の実線で示した。

まず、波高の観点から湾口と湾内の4地点の実測波形を比較する。湾口部での最大波高が1m程度であったのに対し、湾内の4地点では湾口での最大波高よりも高い2mの波高が観測されている。その一方で、東京湾に入射した津波は、湾口から湾奥に向かうに従って減衰することが既往の研究により指摘されている<sup>1)4)</sup>。このことは、羽鳥<sup>2)</sup>が示した既往の津波の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。

次に、周期の観点で湾口と湾内の4地点の波形を比較する。湾口部のアシカ島での波形をスペクトル解析して得た卓越周期は72分程度であった。一方で、湾内の4地点のうち、横須賀では60分、横浜では90分、晴海、千葉では72分が卓越周期となっていた。高山

ら<sup>4)</sup>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。

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言い難い。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沖地震津波の再現計算を実施することにした。

## (2) 境界適合法

図-3に東京湾の海岸線形状を示した。この図から分かる通り、東京湾は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

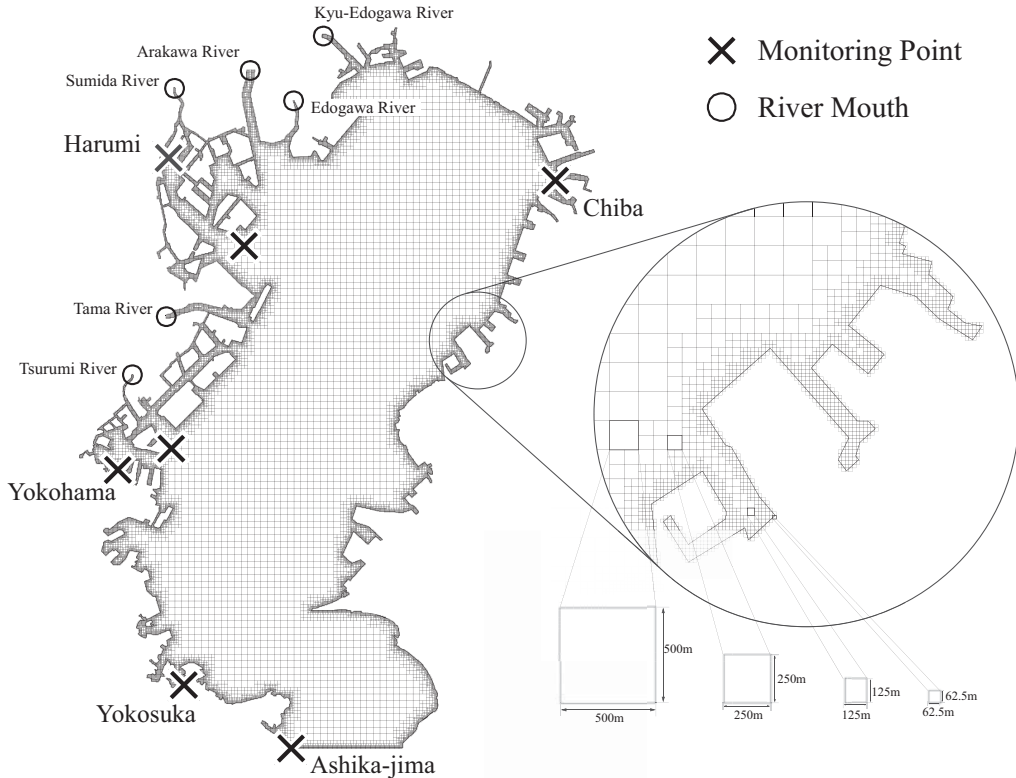


図-3 格子構成図

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、ここでは格子構成の簡便性と計算効率の観点から規則性重合格子とも言える四分木構造格子<sup>7)</sup>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と、東京港の運河形状や荒川の川幅などにに基づき、最長格子辺長を500m、また境界適合が必要な箇所が十分に解像されるように辺長を1/2ずつ縮小していき、250m、125m、最短格子長を62.5m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。四分木構造格子による格子構成図を図-3に示した。なお、東京湾の水深分布については、日本海洋データセンターが提供している500mメッシュ水深データから、四分木構造格子の格レベルごとに構造格

子型の水深情報を生成して用いた。

### (3) 支配方程式

各面積レベルの格子層の座標系は直交直線座標系で記述される。それぞれの層内におけるx、y方向の流量フラックス、水位は以下の式(1)から(3)の浅水方程式により計算される。また、式(1)、(2)で用いる $\tau_{xb}$ 、 $\tau_{yb}$ は、式(4)、(5)により算出した。

$$\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k}{\partial x_k} + \frac{\partial N_k}{\partial y_k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{M_k^2}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \frac{M_k N_k}{h_k} \right) + gh_k \frac{\partial H_k}{\partial x_k} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( v_t \frac{\partial M_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( v_t \frac{\partial M_k}{\partial y_k} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{M_k N_k}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \frac{N_k^2}{h_k} \right) + gh_k \frac{\partial H_k}{\partial y_k} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( v_t \frac{\partial N_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( v_t \frac{\partial N_k}{\partial y_k} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{xb} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$\tau_{yb} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

ここで、M,N は x,y 方向の流量フラックス、t は時間座標、x,y は平面座標、h は水深、g は重力加速度、H は水位、 $\tau_{xb}$ 、 $\tau_{yb}$  は x,y 方向の底面せん断応力、u,v は x,y 方向の流速、 $\rho$  は水の密度、 $\nu$  は渦動粘性係数、それぞれの変数に下添えされた k は格子面積レベルである。これらの式の数値計算は、連続の式、運動の式ともにスタaggerド格子に基づく 2 次精度の Leap-Frog 法を適用した。

#### (4) 計算条件

初期条件は、計算開始時刻を 2011 年 3 月 11 日 15 時 00 分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-1 に示したアシカ島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。また、海岸線は完全反射の境界を基本とするものの、図-3 に白抜き丸印で示した江戸川、旧江戸川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川の 6 河川の河口は透過境界とした。なお、図-4 に河川を反射境界にした場合と透過境界にした場合の最大水位の差異分布図を示す。分布図における値は河川を反射境界とした場合の最大水位から河川を透過境界にした場合の最大水位を引いた値を最大水位の差異とする。透過境界とした場合、例えば荒川では河川への供給流量が最大で 12,000 m<sup>3</sup>/s に達し、その他の河川でも川幅に応じた流量となった。その結果として最大水位分布が沿岸部では最大で 2 m 程度異なり、湾央でも最大で 0.1 m 程度異なる。このため、河川を有する港湾では河川の透過境界としての処理が極めて重要であることを付記する。

#### (5) 実測波形との比較

図-2 に横須賀、横浜、晴海、千葉の実測値と計算値を示した。実線で示した実測値、



-0.05 0.00 0.05 0.10 0.15 0.20 (m)

図-4 河川の有無による最大水位の差異分布図

破線で示した 4 地点の計算値に共通して言えることは、最大波高は湾口部での最大波高よりも大きなものとなっていたことである。

計算値と実測値と比較する。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が、波高、位相は共に良好に再現されている。同図 b) に示した横浜の計算値は、位相のずれが若干生じるものの、波高周期は共に良好に再現されている。同図 c) に示した晴海での計算値は、第 1 波と第 2 波の最大波高が過大評価されていることを除けば、各到達波の周期、位相はいずれとも良好に再現されている。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較的良好であったものの、第 3 波以降は実測値と比べて若干の位相のずれが生じるなどの相違があった。

これらの結果から、この解析手法は概ね良好な精度を有していると考えられる。そのため、波の伝播に対する応答特性の把握には有効であるとみなし、以降においても同様の解析手法および解析条件を用いた。

### (6) 海岸線形状が振動特性に与える影響

計算時間内における最大波高の分布図を図-5に示した。同図で示すように、湾中央における最大波高が2mにも満たない地点が存在しているのに対し、沿岸部に位置する東京港や横浜港では最大波高が2mをも超えるものとなっている。このことから、これらの地点が位置する港内に到達後に港の形状に応答する共振現象を起こし、波高増幅が生じ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波高の増幅は局所的な地形形状に起因するもので、そこでの固有振動が寄与しているものと考えることが妥当であろう。

## 3. 長波に対する振動特性

ここではまず、東京湾の平面的な幾何学形状に応答する振動特性について調べる。これは平面2次元場における固有振動を求めていることに該当する。すでに日野ら<sup>1)</sup>と相田<sup>3)</sup>によって東京湾の固有振動は調べられているが彼らが調べ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横浜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Loomis<sup>9)</sup>の方法がしばしば用いられている。この方法は線形長波理論に基づくPoisson方程式を解くだけなので簡便に数値解が得られる。しかし、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、前章で採用した浅水理論に基づく局所的な高解像度境界適合を導入した解析方法をここでも適用



1.5 1.75 2.0 2.25 2.5 (m)

図-5 最大水位分布図

する。

なお、対象とする問題を最も単純化するなら、1次元の自由振動問題ととらえることもできよう。このとき、固有周期は、

$$T = \frac{2L_0}{m \sqrt{gH_0}} \quad (6)$$

と求めることができる。ここで、 $L_0$ は湾の縦断長、 $H_0$ は平均水深、 $m$ は振動モードである。湾長 $L_0$ を72km、 $H_0$ を17mとした場合の固有周期を図-6に示した。丸で示したものが各モードに対応する固有振動周期、三角形で示したものがモード数2.5と3.5となる周期となっている。図中の値は相田<sup>3)</sup>が示している値とほぼ一致するほか、日野ら<sup>1)</sup>は60分から90分が共振周期となりエネルギー増幅率が極大となると指摘していることも一致する。

### (2) 計算条件

式(6)に基づいて算出した周期を参考に、周期波を入射条件として、湾内の振動特性を調べる。図-6で塗りつぶした印に対応する30分、52分、60分、75分、90分、120分を

入射波の周期とした。これらの周期はそれぞれモード数 6, 3.5, 3, 2.5, 2, 1 に該当する。入射波形は最大波高を 2 m の正弦波とし、周期の異なるどれも 3 波長入射させる計算時間とした。これらの波形を与える合計 6 ケースの計算を実施した。

### (3) 計算結果

実施した計算結果は図-7 に最大水位と最小水位の差（必ずしも一對の波峰と波谷の組み合わせとはならない）をとった最大水位変動量分布図、図-8 に晴海と横浜での時間波形、図-9 に伝播に伴う周期と波高の変化率の関係として示した。

#### a) 湾央の振幅特性

図-7 に一様周期の波形を入射させた水位変動量の分布図を示した。まず、共振点である振動モードの腹が 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。振動モードの腹に位置する地点では沿岸部でも波高増幅を示している。30 分では富津岬よりも湾口に位置する領域で共振現象が起きているため、富津岬より湾奥部ではエネルギーの減衰が著しいために共振現象による波高の増幅は認められない。

以上のことから、60 分から 90 分程度の周期の波では入射波高を上回る波高が港などの沿岸部を除く領域でも生じるようである。また、52 分と 60 分では湾央地点での最大波高よりも沿岸部での最大波高が高くなっている。

#### b) 沿岸の振幅特性

図-7 から港を有する沿岸部では共振現象を起因とする波高増幅が確認できる。中でも、その影響が顕著である大規模港湾が所在する晴海（東京港）、横浜（横浜港）に着目した。この 2 つの港の港口部と港奥部の時間波形を図-8 に示した。同図で示すように、晴海、横浜 2 地点共に港口部よりも港奥部の波高が高くなっていることが分かる。特に、晴海では 52 分、60 分、75 分の周期の波が鋭く応答し、横浜では 52 分、60 分の周期の波が鋭く応答していることが分かる。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

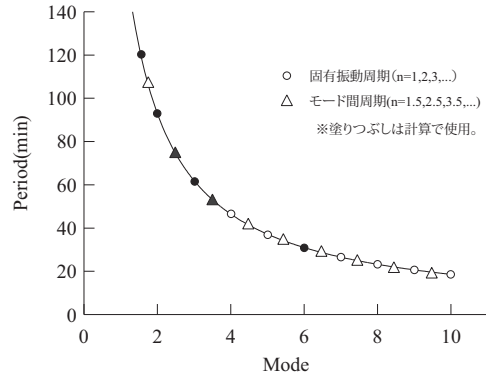


図-6 1次元固有振動周期

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。

さらに、晴海と横浜の港口部と港奥部における最大波高の変化率と卓越周期の変化率を図-9 に示した。この図の横軸は湾口（アシカ島）で入射させた周期に対する観測地点で観測された周期の変化率、縦軸は湾口（アシカ島）で入射させた最大波高に対する観測地点で観測された最大波高の変化率を示している。同図 a) から晴海では港口部では湾口部で入射させた波高と同程度の最大波高だったのに対し、港奥部では全ての波が波高増幅を示している。特に 52 分と 60 分と 75 分の波は 2 倍程度もの波高増幅を示す。一方で、30 分と 90 分の波は港奥部での周期の変化率が大きいことが分かる。同図 b) の横浜でも港口部と港奥部を比べて、30 分、52 分、60 分、75 分、90 分、120 分の全ての波が波高増幅する。周期に関しては全ての波で港口部で観測された周期と湾口部で入射させた周期とが良好な一致を示したが、港奥部では全ての波で周期が短くなり、約 0.7 倍に低下していることが分かる。

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が存在し、その周期が明らかとなった。つまり、4 つの地点（横須賀、横浜、晴海、千葉）において卓越周期の変化が観測されたのは、それぞれの港の固有振動が卓越するようになり見かけ



図-7 最大水位変動量分布図

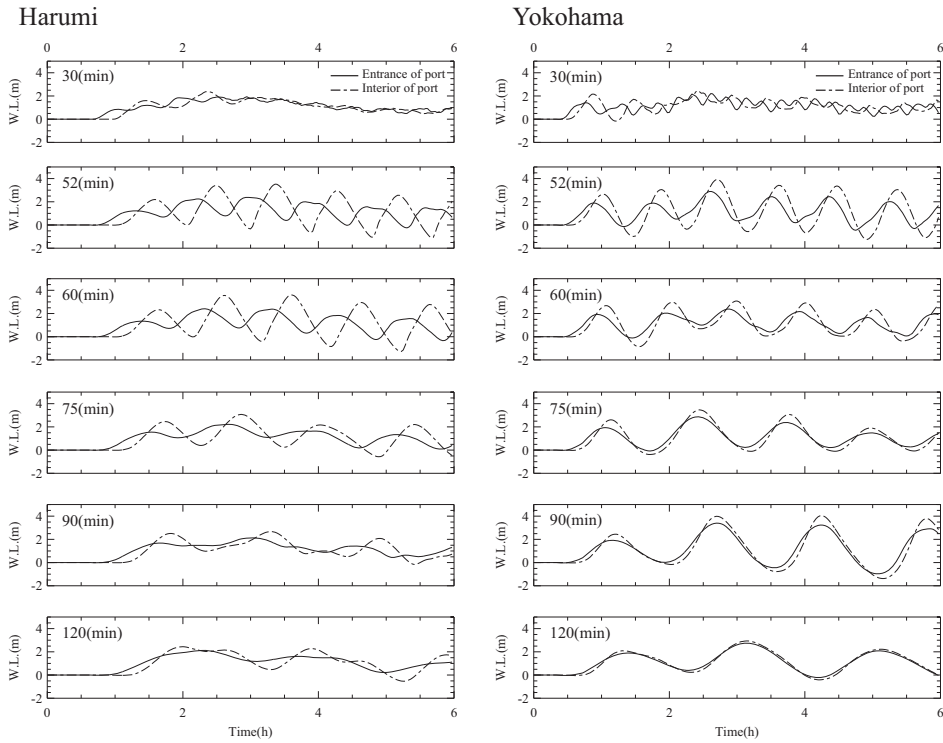


図-8 港の港口と港奥の時間波形

+: 30min \* : 52min ○ : 60min × : 75min □ : 90min △ : 120min

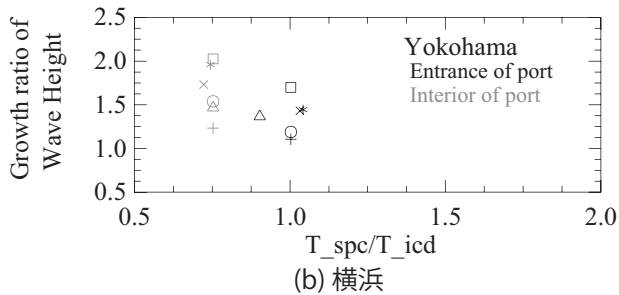
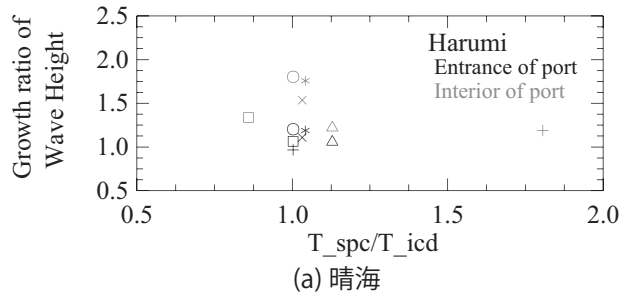


図-9 伝播に伴う振幅と波高の変化率



として周期が変化したと考えることが妥当である。

#### 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からは湾奥部の沿岸での振動特性は十分に説明できない。その要因として、港などの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。数 km スケールの港の形状を持つ、幾何学形状に応答する共振の効果によって波高が最大で 2 倍程度にまで増幅される。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にの取扱い直結するため、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，pp.98-107，1964.
- 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) 相田勇：東京湾近傍の地震による津波の特性，地震，2 輯，pp.217-226，1996.
- 4) 高山知司・永井紀彦・平石哲也：東京湾の津波計算，港湾技研資料，No.454，1983.
- 5) 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，pp.18-27，2009.
- 6) 港湾空港技術研究所：東北地方太平洋沖地震による津波観測データ，<http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub301.htm>，2012.3.23
- 7) 安田浩保・星野剛：四分木構造格子による局所的な高解像度格子を導入した浅水流方程式の数値解析法，応用力学論文集，Vol.14，pp.693-702，2011
- 8) 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所調査課：東日本大震災における荒川下流管内の被災状況等について，2011
- 9) Loomis,H.G, 1996, Some numerical hydrodynamics for Hilo Habor,, Institute of Geophysics, Univ.Hawaii, HIG-66-7.