

沿岸域における高潮・津波災害予測のための 長波遡上伝播計算に関する研究

長岡技術科学大学大学院 英 恵司
指導教官 細山田得三

1. はじめに

日本は、古くから高潮や津波などの長周期波の遡上による被害が多く、その対策も長年行われてきた。このため高潮の長周期による人的災害はかなり軽減した。しかしながら、1999年9月24日の9918号台風では、熊本県の不知火町において12名の犠牲者を出すなど、高潮の被災が完全になくなってしまったわけではない。一方、津波による被害は、発生源の予測が困難であり、今後ともその危険性を回避することは困難である。また地球温暖化による平均水位の上昇により長周期波の遡上による被災の発生の可能性が増大している。日本の各自治体は、高潮・津波による冠水域についてのハザードマップを作成してその対策に取り組んでいる。水災害における被害を軽減し、人口、資産の集積する都市・地域における海岸の安全性を向上させるために、波の遡上の力学的性質や地形との干渉について十分理解しておく必要がある。従来、長周期波の遡上について、数多くの数値計算例が報告されているがそれらの多くは沿岸の地形情報、例えば標高値の精度が十分でない場合が多く、また様々な方向から襲来することを想定した波の入射方向の検討が不十分である。遡上を計算するには、冠水域とそうでない領域とを判別するアルゴリズムが必要であり、また水塊が分離しても安定して計算できるスキームである必要がある。本研究は、高潮や津波などの長周期波の遡上に関する簡便な数値波動プログラムを作成した。さらに格子点上の地形データ (DEM) を生成する手法を開発し、新潟西港および東港を対象として地形や海洋構造物の配置によって影響を受ける長周期波の遡上の挙動を検討したものである。

2. 詳細な地形情報データの作成

DEM (デジタル標高データモデル) の作成は、新潟港の東西 21.3 km、南北 15.9 km の範囲を対象とした。この範囲には 700 点を越す海・陸標高データが海図および地形図上に示されている。この地図をスキャナで読み込み、該当範囲内にある海・陸の水平座標と標高値を読み取り、保存する。この後、平面 2 次元上の格子点と任意に分布している標高点との水平距離を求め、距離の逆数に関係した重みつき平均をとって格子点上の標高とした。作成された DEM の格子間隔は 30m である。図 1 にはこのようにして作成された新潟市周辺の海底地形図を示す。新潟東港の掘削、信濃川などの地形の他に港湾構造物な

ども含まれている。

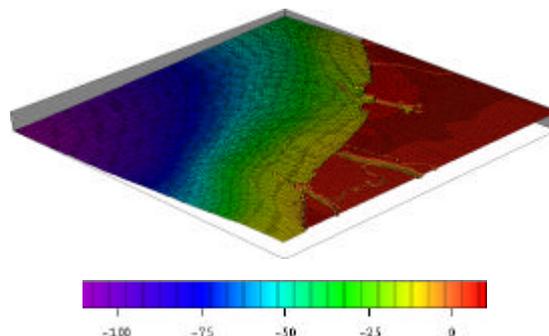


図 1 新潟市周辺の海底地形図

3. 数値計算法

3.1 非線形長波方程式

平面 2 次元の流体運動を表す基礎方程式は、非線形方程式であり式(1), (2), (3)のように表される。ここで、 xy 座標は水平座標、 t は時間、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向の線流量、 MD, ND は減衰項、 g は重力加速度、 z^* は地盤標高を示し、式(4), (5)では x, y は xy 方向の海底摩擦力、 n はマニング係数であり、底面が土であると想定して 0.017 とした。 u, v は断面平均流速であり、それぞれ M, N を水深で除して求めた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) + MD \\ = -gh \frac{\partial (z^* + h)}{\partial x} + A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{t_x}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) + ND \\ = -gh \frac{\partial (z^* + h)}{\partial y} + A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{t_y}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{t_x}{r} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{t_y}{r} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

基礎方程式の他に構造物上を越流する際に水塊そのものが分離して計算せざるを得ない条件も発生する。そのような場合には式(6)に示す越流公式を適用して計算を行った。

$$q = 0.35 h \sqrt{2gh} \quad (6)$$

3.2 遡上計算のアルゴリズム

支配方程式は差分化され、計算領域は矩形の格子に分割された。計算に先立ち地形の情報を取り込み、冠水域を判別するために、フラグgingデータを用意した。図2,3には、水と陸の境界計算格子の側面図と平面図を示す。ここで1を冠水域、0を陸部とする。基礎方程式による計算は、冠水域と判定された領域に対してのみ行う。波が引いていく場合には、エラーとして水深が負の値になる格子が発生する。これを補正するために、周囲の冠水状態を参照にしながら水深が0になるように線流量を調整した。

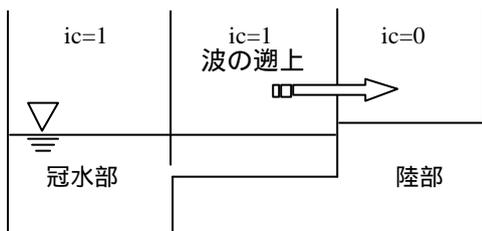


図2 波の遡上(側面図)

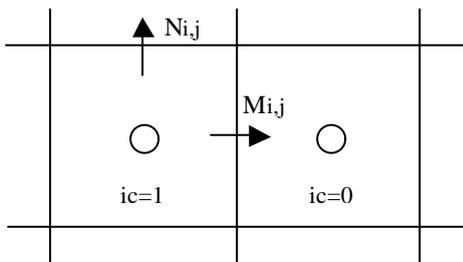


図3 格子および変数の配置(平面図)

3.3 モデル地形および波の条件

本研究では、新潟港に対して計算を行った。(図1には、計算に用いたモデル地形図(DEM)を示す。) 計算領域は沿岸方向 21.3km、沖方向 15.9kmを対象としており、この領域の最大水深は 120mである。全計算時間 1500秒、入射波は新潟地震の際の周期 960s、波高 2.0mで入射方向は北を 90度として 30度間隔で与えている。波は計算領域内、上端で発生させ、右、左、下端ではスポンジ層を設けて反射の影響を除外した。

4. 数値計算結果

4.1 入射方向 30° の数値計算結果

図4には入射方向 30°の時の新潟港の水位分布を示す。新潟西港では、初期には引き波から波が入射し、600sの時には新潟西港の離岸堤とほぼ同じ高さの水位変動が生じており、信濃川へと流入して行く。750sから900sにかけては、押し波が新潟空港付近に到達し、陸からの反射と海洋構造物に囲まれた西港内での多重反射や地形形状の影響を受けて新潟西港の水位が上昇し、新潟西港の防波堤の天端を越流して行く。その後水塊は、新潟西海岸方面と信濃川方面の二手に分かれ、一方は西港防波堤が遮断壁となり、再び信濃川に流入し、水位変動が大きくなっている。

阿賀野川では、引き波から波が入射し、600s後から水位が上昇し始める。900sの時には、阿賀野川に流入してきた波と新潟空港付近の反射波と東港の防波堤で反射した波が地形形状の影響を受けてぶつかるように重なり、阿賀野川に流入するため水位が急に高くなっている。

新潟東港では、引き波から入った波が時間の経過と共に高くなり、600sから750sにかけては東港の防波堤に到達した後、防波堤の傾きに沿って進行し東港で多重反射となるため、水位が高くなっている。同時に東港は、この波向に対して湾内にスムーズに侵入しやすい。東埋立地区・加治川付近で反射した波はすぐに東港湾内に侵入し、水位変動は大きいと考えられる。

4.2 入射方向 60° の数値計算結果

図5には入射方向 60°の時の新潟港の水位分布を示す。新潟西港では、初期には引き波から入射し、ゆっくりと押し波が押し寄せてくるため、徐々に水位が高くなる。900sの時には、押し波が東海岸地区に到達し、陸からの反射と海洋構造物の反射と回折、直後に来る押し波が重なって離岸堤を巻き込むため、水位が高くなっている。信濃川では、入射方向 30°の時と同じように、新潟空港付近で反射した波が地形形状を感じ取って新潟西海岸に流れていこうとするが西港防波堤が遮断壁となり、信濃川に流入し、水位変動が大きくなっている。また、1050s付近で、水位が再び高くなっているのは、新潟空港付近から地形の影響を受けて反射した波の一部が、新潟西港の防波堤の天端を乗り越え、新潟西海岸方面へと流れていこうとするため水面が散乱する。

阿賀野川では、引き波から波が入射し、750sの時に水位が上昇してくる。1050sから1200sの間は、水位の高さが維持されている。第一波が進入した波と東港(西埋立地区)付近から地形に沿って流れてくる反射波の水塊が重なり、2,3分間河口内で反射を繰り返しているため、水位の高さが維持されていると考えられる。

新潟東港では押し波から入り、450s以降には東港の防

波堤に到達した反射波と西埋立地区で反射した波が重なるため水位が散乱している。加治川・東埋立地区に直撃した反射波は、東港湾内に浸入しようとする力と東港防波堤を回折し、また東港湾内では加治川・東埋立地区付近で反射した波が浸入するが、すぐ波が引いている。その後第二波目が押し寄せて、東港周辺に押し波と陸からの反射波が集中して水位が高くなる。西埋立地区の反射波は阿賀野川付近に進行していき、東埋立地区・加治川で反射した波は東港湾内に侵入し、多重反射の影響を受けているせいか、波エネルギーが減衰していない。

4.3 入射方向 90° の数値計算結果

図 6 には入射方向 90° の時の新潟港の水位分布を示す。新潟西港では、初期には引き波から入ってすぐに押し波が入射する。600s 後には、新潟西港の防波堤の天端を越流して、そのまま信濃川に浸入していく。750s を見ると、東港・阿賀野川付近と西港付近に到達した大きい反射波が、地形形状に沿って再び西港の防波堤の天端を越流して新潟西海岸方面と信濃川方面に波が進行していく。この時、信濃川付近・新潟西港海岸に進行していく水位は、入射方向 30° と 60° の時と比べて高くなっている。

阿賀野川では、阿賀野川の河口付近に直に進入してくる波と東港付近から地形に沿って進入してくる水塊が同時に流入してくる傾向があるため、水位上昇の立ち上がりが早い。直角に入ってきた波は、先に東港付近に到達したら、すぐに地形形状の影響を受けるため、陸からの反射波が新潟西海岸方面に流れる進行速度が速い。一度入ってきた波は、すぐに引いていき、水位が落ち着いている。

新潟東港では、90° で入ってきた波は水位の立ち上がりが早く、防波堤を滑るように西埋立地区・阿賀野川へと反射波が流れていく場合と東埋立地区・加治川から流入してくる反射波が地形の影響を受けて東港湾内に流入していく様子が明瞭に示されている。その後第二波目に入るが、1050s 以降は次第に水位が高くなり、東港を囲むように陸と防波堤からの多重反射が著しい。今回は 25 分間計算したが長時間計算を行うと遡上する可能性が考えられる。

4.4 入射方向 120° の数値計算結果

図 7 には入射方向 120° の時の新潟港の水位分布を示す。新潟西港では、初期には押し波からすぐに引き波となっている。600s から 750s 付近を見ると押し波の一部が入舟地区と東海岸地区に到達した波が反射・回折するため、防波堤周辺の水位が散乱している。後半になるにつれて水位が上昇し、加治川付近で反射した波が、東港の防波堤を巻き込むように回折する。西埋立地区に到達した後、押し波と重なって多重反射波となり、滑り台を

滑るように地形形状に沿い次第に水位を上げて進行していく。1200s 付近では新潟西港の防波堤の天端を越流し、信濃川・西海岸へと流れて行く。このとき西港離岸堤の標高 (+1.5m) よりも 2.5 倍以上の水位上昇を計測し、信濃川付近の水位変動も大きくなっている。この角度で波が入射した場合、西埋立地区で発生した多重反射波は地形形状の影響を受けやすく、新潟西港付近に大きな被害をもたらすと考えられる。

阿賀野川では、押し波の一部が阿賀野川の河口付近で反射・回折して浸入する。その後阿賀野川付近・西港付近は引き波に入る。1350s 以降は、加治川・西埋立地区で反射した波と再び襲来する押し波が重なり地形形状の影響を受けて流れてくるため、波が引いていた場所の水位が急激に上がる。地形に沿って伝播してくる波は、新潟西海岸付近まで進行してくるため阿賀野川を通り過ぎるまで河口の水位は上昇し続ける。

新潟東港では、引き波から入ってきた波が、東防波堤の外側に到達するが、波の散乱はそれほど見られない。この波向に対して、加治川付近に直撃した高い反射波は、水塊となり地形形状の影響を受けて加速し、東港湾内に流入していく場面が目立つ。図 9 に示すグラフから水位変動がそれほど大きくならなかったのは、加治川付近で反射した高い波の大部分は東港湾内に流入し、それほど高い波は東港防波堤を巻き込むように回折してから西埋立地区に直撃し反射する。西埋立地区で反射した波は、すぐに地形形状の影響を受けるため、阿賀野川に遡上する力が働くので、新潟東港では大きな水位変動は見られなかった。

4.5 入射方向 150° の数値計算結果

図 8 には入射方向 150° の時の新潟港の水位分布を示す。新潟西港では、初期には押し波から波が入射し、450s の時には西港の防波堤の天端を越流し、波の反射と回折を見ることができる。その後、東海岸地区・新潟空港付近で反射した波は再び防波堤の天端上部を乗り越えるため、陸からの反射と海洋構造物からの反射と回折で、波の散乱が顕著にあらわれている。また新潟空港・新潟西港付近で反射した波は地形形状の影響を受けるため新潟西海岸、信濃川方面に進行していく。1050s を見ると、第二波目が加治川付近に直撃し、波が反射して地形形状に沿って次第に水位を上げて流れてくるため、新潟西港付近は、2重・3重の被害を受ける。本研究では 25 分間の計算を行ったが、長時間計算を行うと、新潟西港での水位変動はもっと大きくなる可能性があり、危険区域であると言える。

阿賀野川では、押し波から入り、450s 以降には阿賀野川に流入してきた波が河口付近で多重反射し、すぐに西埋立地区よりやや左側に到達し、反射した波が地形形状

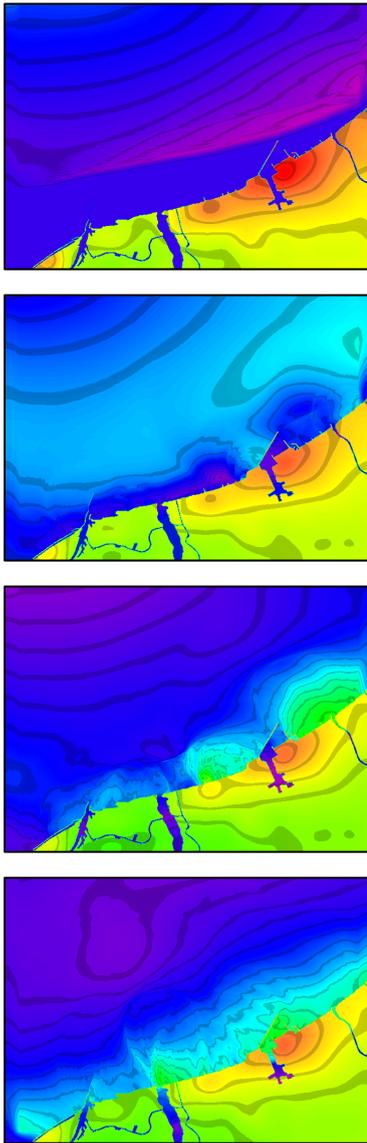


図4 入射方向30°の波を与えた時の新潟港の水位分布(上から 30 0 s , 600 s , 750 s , 900 s)

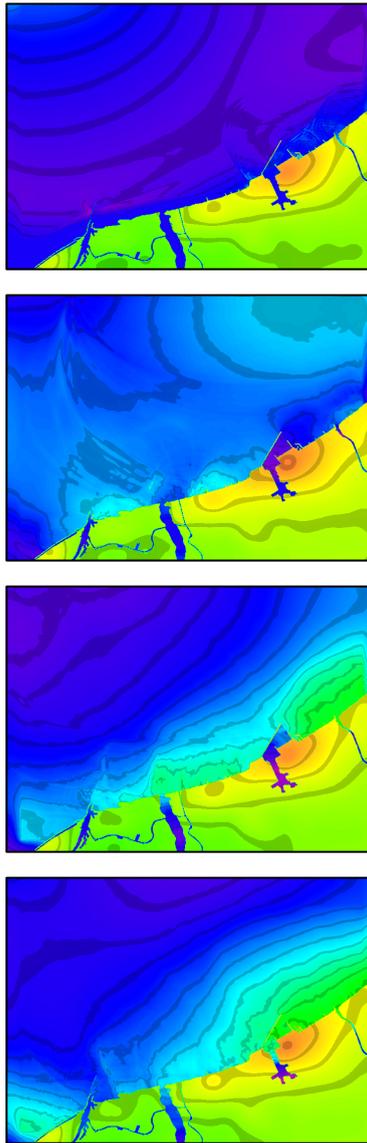


図5 入射方向60°の波を与えた時の新潟港の水位分布(上から 450 s , 900 s , 1050 s , 1200 s)

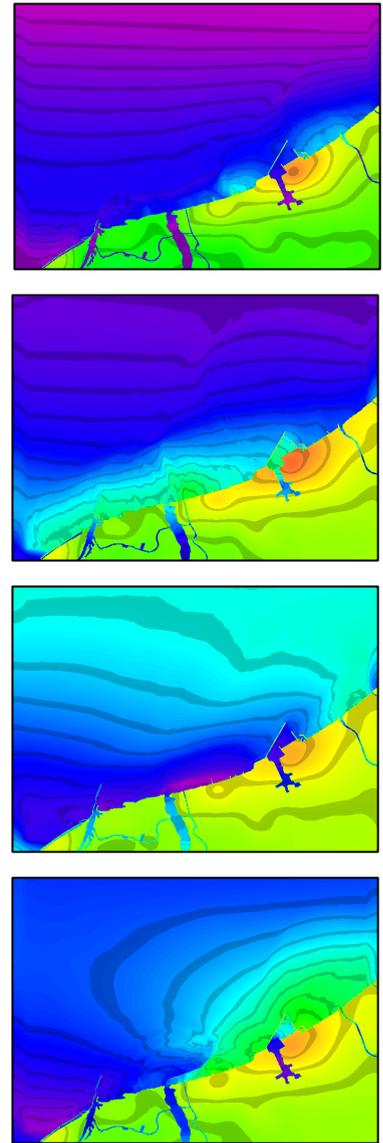
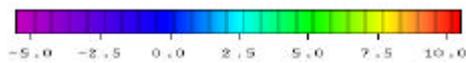


図6 入射方向90°の波を与えた時の新潟港の水位分布(上から 600 s , 750 s , 1350 s , 1500 s)



に沿って河口内に浸入してくるため波の散乱が著しい。900 s 以降は阿賀野川河口付近の波が引いていくので、水位は落ち着くが第二波目が加治川付近に到達し、反射した波は多重反射波となって地形形状に沿って押し寄せてくるため、再び阿賀野川河口付近の水位が上昇し始める。入射方向 120° の時と最大水位変動がほぼ同じであるが、入射方向 150 度の時は、さらに水位が上がると予想できる。今回は 25 分間計算を行ったが、長時間計算を行う必要があると考えられる。現段階を見ると、阿賀野川はこの波向きに対しては、地形形状の影響を受けやすく多大

な被害を受ける可能性を秘めていることがわかる。

新潟東港では、押し波からすぐに引き波に入る。450 s の時には第一波目が東港の防波堤に波が到達し反射した波と西埋立地区に到達して反射する波、東埋立地区で反射した波とが複雑に重なるために水位が散乱している。その後引き波に入り、900 s 以降には第二波目が押し寄せてきて加治川付近に波が到達し、反射した水塊が新潟東港付近を飲み込むように地形形状に沿って阿賀野川付近へ徐々に水位を上げて流れていく。

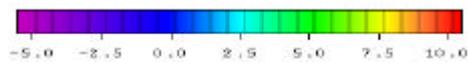
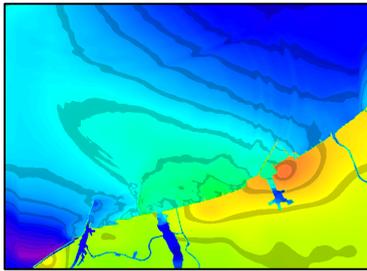
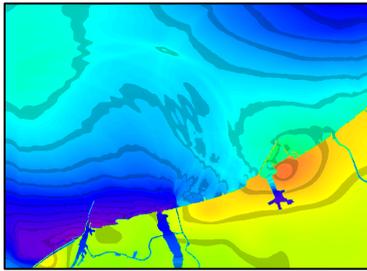
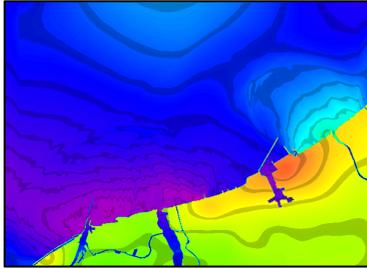
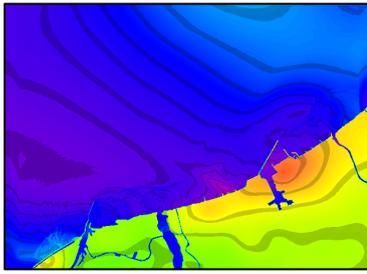


図7 入射方向 120° の波を与えた時の新潟港の水位分布 (上から 600 s ,750 s ,900 s ,1050 s)

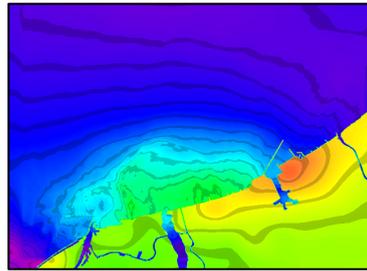
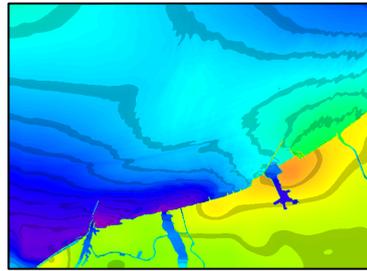
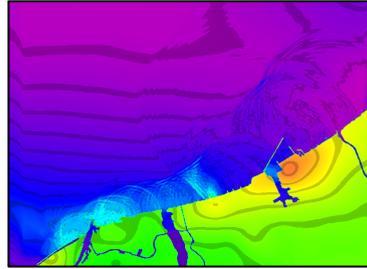
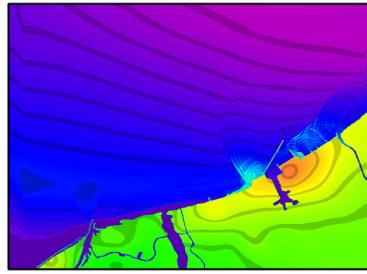


図8 入射方向 150° の波を与えた時の新潟港の水位分布 (上から 450 s ,600s,1200s,1500s)

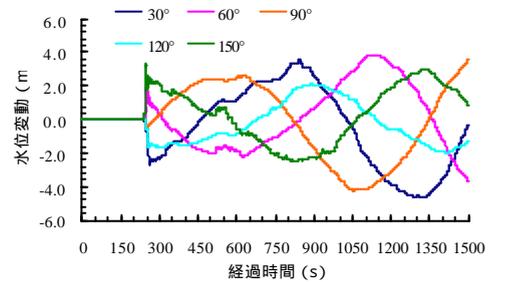
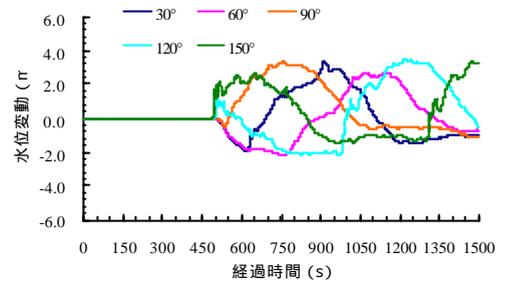
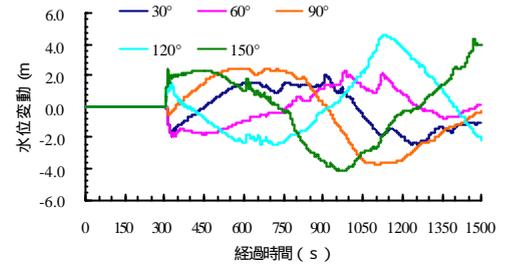
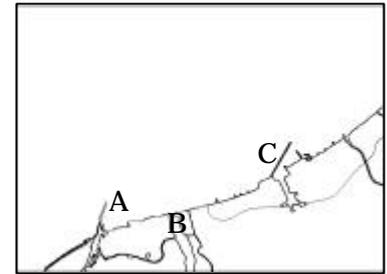


図9 様々な入射方向に対する各点での水位変動の時系列 (上から点 A、点 B、点 C)

4.5 様々な入射方向に対する各点での水位変動の時系列
 図9には様々な角度の入射に対する各点での水位変動の時系列を示す。新潟港での津波波形を見ると、阿賀野川付近(点B)、新潟東港付近(点C)では、様々な角度から波が入射して来てもほぼ同じ水位変動を示すが、新潟西港付近(点A)では、120°、150°の方向から波が入射して来た時、他の角度と比べて水位変動が大きくなっている。

これは加治川・新潟東港西埋立地区で反射した波の背後を押し波が押し寄せて高波となり、地形形状に沿ってゆっくりと進行した波が、徐々に水位を上げて波が引いている新潟西港付近に押し寄せてくるため、急激に水位が上昇する。このことから新潟西港では120°と150°の角度から波が押し寄せてきた場合、多大な被害を受ける可能性があり、危険区域であると言える。

5. 結論

本研究では、波の遡上すなわち押し波時の水際の後退、また遡上していく波と引き波とによる水塊の分離などが計算できるプログラムを作成し、実海岸に適用して様々な波向きを考慮した津波シミュレーションを行い、沿岸域における遡上計算を行った。その結果、長周期波の空間的な分布特性が地形形状に鋭敏に影響されることや新潟港の危険区域の予測を行うことができた。

今後、更に研究を進めていく上の課題を述べる。

土地の利用情報を含め、長時間にわたる遡上計算を行い、更なる微細な地理情報を考慮する必要がある。本研究では、沿岸域での津波シミュレーションを行ったが、より広い領域を対象とした津波シミュレーションを行い、海岸の安全性と被害区域の予測精度を向上する必要がある。

津波シミュレーションを行った際、波の遡上による海洋構造物の波圧を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 合田良實：港湾構造物の耐波設計， 波浪工学への序説， 鹿島出版会（1990），pp.173～174.
- 2) 平口博丸・丸山康樹：斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張，第33回海岸工学講演会論文集（1986），pp.565～570.
- 3) 磯部雅彦・藤城透：ベンガル湾における高潮遡上計算、海岸工学論文集第44巻(1977)，pp.346～350.
- 4) 服部昌太郎：土木系大学講義シリーズ13， 海岸工学，コロナ社（1987），pp.64～82.
- 5) 渡辺 晃・丸山康樹：屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法，第31回海岸工学講演会論文集（1984），pp.114～118.
- 6) 榎木 亨・岩田好一郎・松本 昇：碎波後の波の変形について，第20回海岸工学講演会論文集(1973)，pp.565～570.