

# 複雑な3次元地形における津波氾濫流に関する数値計算

Numerical analysis of Tsunami runoff onto a complex 3 dimensional beach

北海道開発土木研究所 正会員 安田 浩保 (Hiroyasu YASUDA)  
 北海道開発土木研究所 正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu WATANABE)

## 1. はじめに

1993年の北海道南西沖地震に伴い発生した津波は、20世紀最大といわれる湖上痕跡を奥尻島の藻内海岸に残した。その痕跡値は標高約31mの地点で発見された。現在までに水理実験<sup>2)</sup>や2次元<sup>3)</sup>および3次元モデル<sup>4)</sup>に基づく数値計算が行われているが、なぜこれほど高い地点にまで津波が押し寄せたのかは完全に解明されていない。米山ら<sup>4)</sup>は3次元の数値計算を実施してその原因は流れの3次元性が卓越していたためとしている。しかし、その痕跡値が発見された藻内海岸の地形形状を観察してみると、非常に複雑な3次元的な谷地形を呈している事が分かる。つまり、特異な湖上痕跡高さは流れの3次元性だけでなく、この地形形状も相まって生じたものと考えられる。

本文では、この地形形状に着目し、複雑な地形形状を柔軟に計算へ組み込む事が可能な地形適合格子を導入した2次元平面解析<sup>1)</sup>によってその再現を試みた。なお、本研究では、松山ら<sup>2)</sup>によって実施された水理実験が藻内海岸における津波の陸上湖上の再現に成功していることから、豊富な実験値を有するこの実験結果の再現計算を行うことにした。

## 2. 解析対象地形

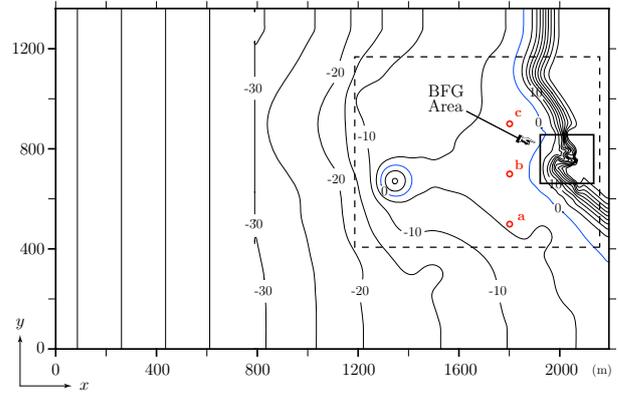
### (1) 藻内海岸の地形特徴

藻内海岸は奥尻島の西岸に位置する、海に面する開口幅が100mに満たないポケットビーチである。最大湖上高はこの海岸の奥まったところにある谷地形で発見された。

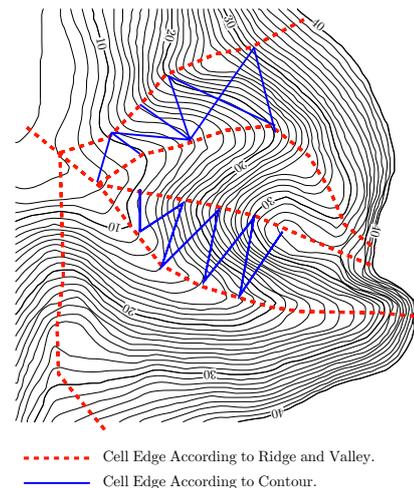
藻内海岸の地形と周辺海域の水深分布は図-1(a)に示した通りである。周辺海域は、汀線から沖側に1000m程度までは1/100ほどの緩やかな水深分布となっているが、さらにそれより沖側ではその勾配は1/25程度の急勾配を呈するようになる。一方、同図(b)から分かるように津波が湖上した谷地形は非常に急勾配で、その斜度は場所によっては20°以上に達する。

### (2) 地形適合格子の構成法

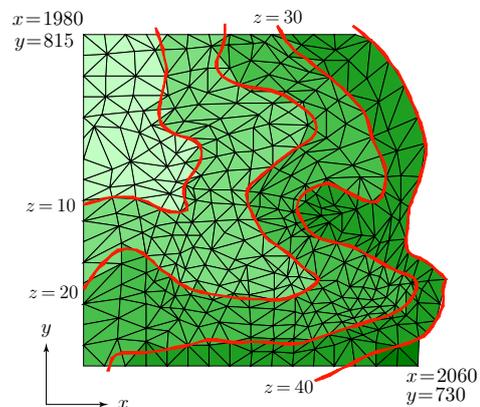
最大痕跡高さが発見された図-1(b)に示した藻内海岸奥部の谷地形は、東西、南北方向それぞれ100mほどの狭い領域である。しかし、この領域の中に急勾配の2つの谷地形と尾根地形を有しており、例えばこれを矩形格子を用いて地形の特徴を表現できるように離散化しようとする5m以下のかなり細かな格子を用いなければならない。これに対して、任意多角形(セル)の適用が可能な地形適合格子による離散化を行えば、効率よくしかも的確に場所毎の地形の特徴を反



(a) 藻内海岸の地形とその近傍の等水深線



(b) 詳細な等高線図と地形適合格子の構成手順



(c) 藻内海岸の地形適合格子を用いた離散化

図-1 藻内海岸の地形概況 (縮尺: 1/1, 単位 m)

映したセル形状を決定できる．同図 (b) で示したように，地形形状の離散化は，まず谷線と尾根線に沿った離散化線を定義し，つぎに等高線と平行か直交するように離散化線を定義する手順で行っている．その結果，同図 (c) を得た．地形の特徴に合わせてセル群を構成できることから，著者らはこのようにして構成したセル群を地形適合格子と呼んでいる．

### 3. 地形適合格子法

#### (1) 地形適合格子を導入した場合の2次元平面計算の支配方程式

地形適合格子を導入した2次元平面計算法は，複雑な平面形状を成す場における流れの数値解析を実施する際にその地形形状を計算に柔軟に取り込む手法として安田ら<sup>1)</sup>によって開発された．この計算法は，三角形格子と任意多角形を自由に組み合わせて平面形状を的確に取り込めるだけでなく，道路や壁構造物などの計算格子として計算に組み込むには幅の狭いが流れに対して大きな影響を及ぼしかねない線状構造物の取り込みを可能にしている．そのうえ，三角形格子と任意多角形を組み合わせた格子構成が可能のために対象地形を効率的に離散化することで計算格子数を抑制でき，その結果として計算時間を大幅に短縮することにも同時に成功している．一様な細分矩形格子を用いた場合に比べ，最大で100倍程度の高速化を図ることが可能である．また，対象領域を任意多角形によって離散化するため，曲線座標系を適用した際に留意が必要な座標軸の交差を意識することなく格子構成ができる利点があり，特に都市部における氾濫解析で威力を発揮する離散化手法である．

その支配方程式は，移流項を無視した2次元平面場における浅水理論式を矩形格子以外の多角形(セル)でも計算が可能のように拡張して得られる，

$$\frac{1}{l} \frac{\partial Q}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{gn^2 Q |Q|}{D^{7/3}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{A} \sum_{i=1}^k Q_i = 0 \quad (2)$$

である．ここで， $Q$  はセル辺上の流量， $\eta$  は水位， $D$  は水深， $g$  は重力加速度， $n$  は Manning の粗度係数， $A$  は水位を求めるセルの面積， $k$  はセルの辺数である．

#### (2) 数値計算スキーム

式(1)，(2)の数値計算スキームには，陽的差分スキームのひとつである Staggered Leap-Frog 法に基づくスキームを用いた．ただし，計算の不安定を回避するために摩擦項に関しては半陰的差分スキームを適用した．

### 4. 藻内海岸における津波氾濫流の再現計算

#### (1) 計算領域の分割

藻内海岸における津波氾濫流の再現計算を実施するにあたり海域での津波の伝播計算が必要になる．この

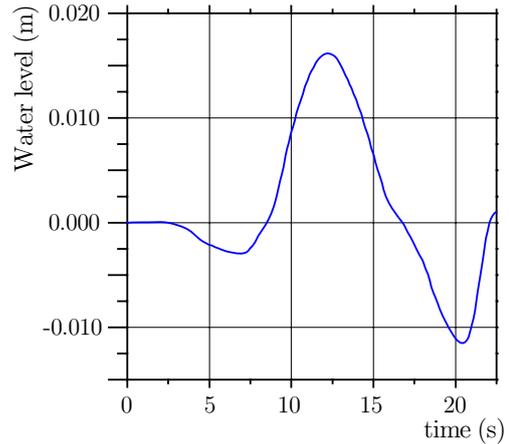


図-2 入射境界で与えた入射波の時間波形(縮尺:1/40)

計算は図-1 (a) に示した範囲の全体で行うことにした．一方で，藻内海岸における氾濫流の計算は，同図 (a) 内の BFG Area に独立した領域を設け，そこで実施した．

なお，松山ら<sup>2)</sup>は水理実験を1/40の縮尺で実施しており，本文における計算もこの縮尺に基づいている．

#### (2) 海域の津波伝播の計算

##### a) 数値計算の方法

海域での津波の伝播に関しては，2次元平面計算を行ってその挙動を求めている．この計算の支配方程式には，断面平均流速で表現された浅水理論式のすべての項を水底から水面まで積分した連続の式，海底面の摩擦抵抗を Mannig 則で表現した運動の式，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{gn^2 M}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{gn^2 N}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5)$$

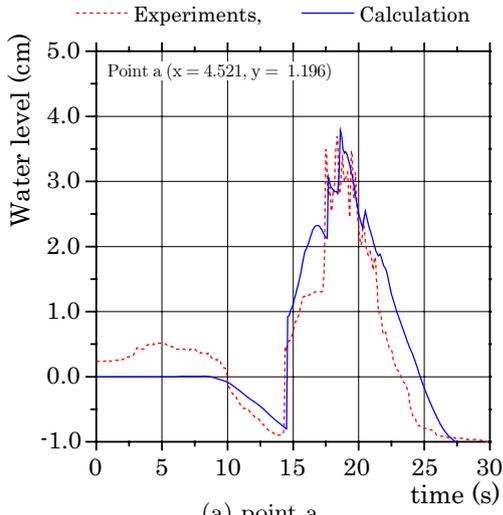
を適用した．ここで， $M, N$  はそれぞれ  $x, y$  方向の単位幅流量である．

##### b) 境界および初期条件

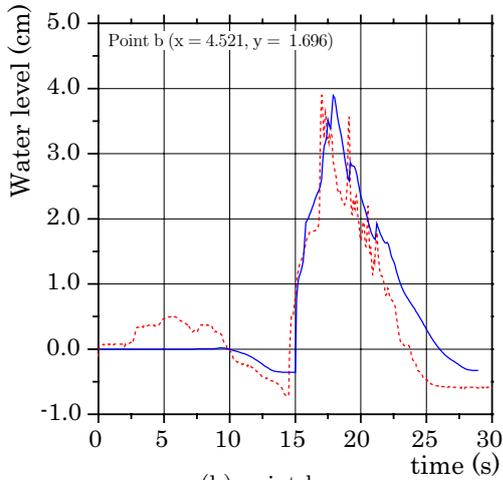
海域領域では，次のとおり境界条件を与えた．

まず，入射境界を最西端面の  $x = 0, 0 \leq y \leq 1360$  (実縮尺) に設定し，図-2 に示した入射波をこの面で一様に与えた．一方で，最南端，および最北端面の  $y = 0$  と  $y = 1380$  の  $0 \leq x \leq 2180$  の2つの境界と最東端面の  $x = 2180$  のうち標高値が0以下の区間を完全反射境界に設定した．ただし，最東端面の標高値が0以上の区間は反射境界とせず津波の陸上溯上を許容した．初期条件は，標高値0を静水面として与えた．

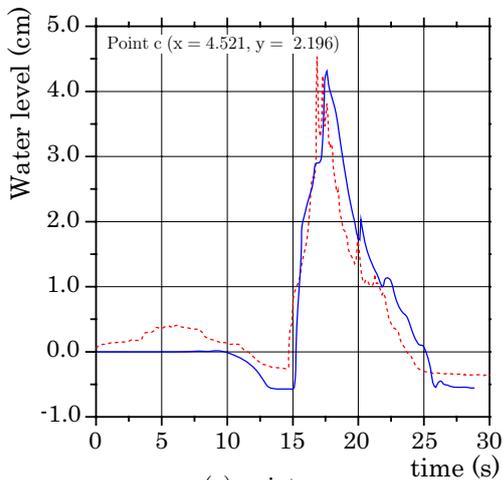
計算格子の空間分割間隔は，領域全体で辺長5.6mの正方形とした．



(a) point a



(b) point b



(c) point c

図-3 水理実験と数値計算で得た水位時間変化の比較 (縮尺:1/40)

c) 計算結果

海域における津波の伝播に関する計算結果を図-3として3地点の数値計算と水理実験から得た水位の時間波形、および図-4として藻内海岸における最大潮上高さに達した時刻の水位の空間分布に分けて示した。

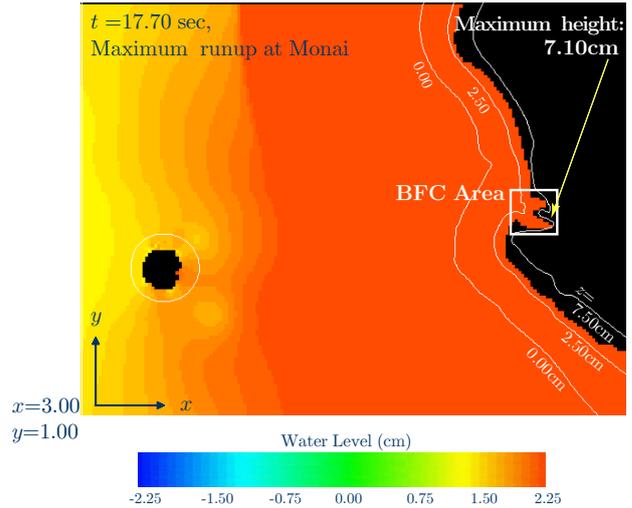


図-4 藻内海岸で最大潮上高さを生じた時刻の水位の空間分布

図-3から分かるように、3地点のいずれにおいても各時刻で両者の水位は良く一致していることが分かる。一方、水位の時間的変化(位相)についてもおおむね一致する結果を得た。しかし、いずれの地点ともに減衰期に関しては実験値の位相に比べ計算値のそれは遅れる傾向となった。これは、この時刻になると各反射境界から反射波が発生してこれらによる複雑な水位変動が生じ、その影響を受けるなどしたためである。

図-4は、図-1(a)の点線内の領域の水位分布を示したものである。この図から、藻内海岸で最大水位を記録したこの時刻ではかなり広い範囲で平均海面から10m(実縮尺)以上の水位上昇が発生していることが分かる。また、沿岸部では標高15m地点程度まで津波が潮上していることが分かる。最大痕跡高さ31mを記録した藻内海岸では、この計算から28m地点まで津波が浸入する結果を得た。5.6mという細分格子を用いた結果、従来までの多くの研究例よりも実現象に近い値を得たものの、いまだに十分な再現値とは言えない。

(3) 藻内海岸の津波氾濫流の計算

a) 数値計算の方法

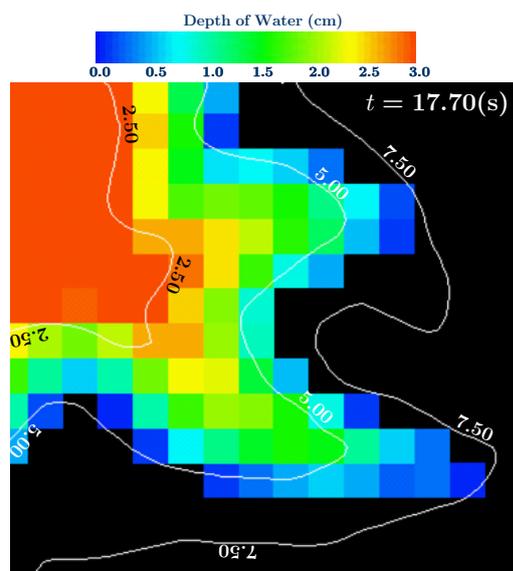
藻内海岸における津波氾濫流の計算は、前述した地形適合格子を用いた2次元平面計算を行ったほか、これとの比較のため、浅水理論式を支配方程式とする矩形格子を用いた計算も実施した。

b) 境界および初期条件

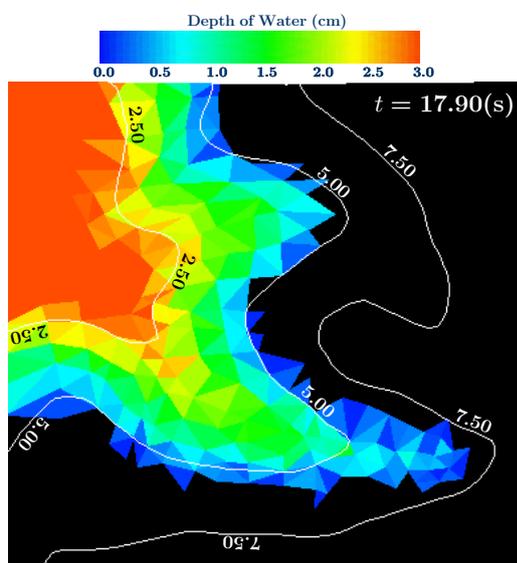
この領域における計算では、その境界条件として、海域の計算で得られた水位をその領域境界格子に与えた。また、初期条件は領域全体で水深を0に設定した。

c) 計算結果

図-5(a),(b)がその計算結果で、地形形状をそれぞれ矩形格子で表現した場合、地形適合格子で表現した場合での最大氾濫面積が発生した時刻の水深分布を示している。この図面内の曲線は等高線を示しており、図面の左から右に向かって実縮尺で10, 20, 30mの等高線を示している。



(a) 矩形格子の場合



(b) 地形適合格子の場合

図-5 藻内海岸の津波氾濫流の再現計算結果 (縮尺:1/40)

本図 (a) に示したとおり、この矩形格子を用いた計算における最大潮上高さは28mであった。従来までの2次元計算の最短格子辺長は20m程度である。これに対し、前述したとおり、本文の矩形格子計算では実縮尺で5.6mの正方形格子を用い、約4倍の解像度で地形形状を表現している。つまり、従来までの計算例で十分な潮上高さが得られなかった理由のひとつは、谷地形の形状に対する表現解像度が不十分であったためであると言える。なお、等高線の間隔から判断できるとおり、谷地形の奥部では5.6m格子としても南北方向で2個の格子で表現しているに過ぎない。この谷地形においてはこの格子長でも必ずしも十分な解像度とは言えないかも知れない。

地形適合格子を用いた場合の計算結果である同図 (b) と矩形格子を用いた同図 (a) を比較すると、まず氾濫

面積、水深分布ともにおおむね一致しているほか、それぞれの計算で最大氾濫面積が発生した時刻の差異についてもごくわずかであることが見て取れる。最大潮上高さに関しては矩形格子を用いた計算のそれを上回ることを期待したが、同程度の29mにとどまった。

地形適合格子を用いた計算でさえ実績値に匹敵する潮上高さに至らなかった最大の理由は、慣性力が卓越する流れであるにもかかわらず、移流項を無視した支配方程式に基づく計算を行ったからであろう。一方で、本文で取り扱った津波による氾濫流は高速な流速を生じる流体现象である。それを氾濫流などの緩やかな流れを本来の解析対象とする支配方程式に基づき計算を行ったにもかかわらず、適当な精度の計算結果を得た。これは、破堤部近傍などの慣性力の影響を無視できない流れに対しても簡略化された浅水理論式を用いることが可能であることを示唆する結果と言えよう。

### 5. おわりに

本文では、解析対象となる地形形状を十分に細分化された格子やセルによって表現したうえで津波氾濫流の再現計算を行った。その結果、3次元計算を行うことなく実績値に近い最大潮上高さを得ることができた。このことは、流れの特性や対象地形に見合った計算格子を用いることが非常に重要であることを示している。

なお、本文で示した簡略化された浅水理論式を用いる計算法は、元来、流れの緩やかな氾濫流などの解析に適している。従って、それと比べると格段に高速な流速を生じる津波の陸上潮上のような現象への適用はその適用範囲を超える面があることも否めず、当然、移流項を考慮した計算が望ましい。しかし、氾濫面積の時間的変化、各地点での水深の時間的変化を十分な精度で計算できることが分かった。つまり、慣性力が卓越する流れを含みながらそれにもかかわらず演算時間などの理由で移流項を無視した計算をせざるを得ない場合においてさえこの計算法を適用できる可能性は小さくない。今後は、本文で対象とした領域において移流項を考慮したうえで地形適合格子を用いた計算を実施し、その差異について議論する予定である。

謝辞: 本研究は国土交通省北海道開発局、および米国 National Science Foundation からの支援を一部受けて実施されている。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 安田 浩保, 白土 正美, 後藤 智明, 山田 正: 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発, 土木学会 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.1-17, 2003.
- 2) Matsuyama, M. and Tanaka, H.: An Experimental study of the highest run-up in 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami, *International Tsunami Symposium*, pp.879-889, 2001
- 3) Myers, E. and Baptista, A. M.: Finite Element Solutions of the Hokkaido Nansei-oki Benchmark, *Long-Wave Runup Models*, pp.272-290, 1996.
- 4) 米山望, 松山昌史, 田中寛好: 1993年北海道南西沖地震津波における局所潮上の数値解析, 土木学会 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-159, 2002.