

## 日本海中部地震津波において能代港の(旧)中島水面貯木場に来襲した津波クノイダルボアの現地再調査および砕波シミュレーション

千田 健一\*

### 1. はじめに

津波のソリトン分裂・砕波に関しては、岩瀬\_後藤<sup>1)</sup>、松山<sup>2)</sup>、嶋原\_藤間<sup>3)</sup>、佐藤<sup>4)</sup>らにより、シミュレーションモデルが開発されている。一方、津波ソリトン分裂・砕波シミュレーションを実際の津波の波高・周期で検証した事例は少ない。それは、沿岸に設置された潮位計は、水理フィルターの影響で短周期の津波ソリトンを記録できず、シミュレーションの検証データが少ないことが一因

である (N.Shuto, F.Imamura)<sup>5)</sup>。

1983 日本海中部地震津波の際、秋田県能代港湾奥の(旧)中島水面貯木場(図 1 参照)では、津波がソリトン分裂し、砕波中のクノイダルボアとなって来襲した(写真 1 参照)<sup>6)</sup>。

その写真の電柱・護岸が撮影の寸法がわかればクノイダルボアの波高・波長が写真判読できる。

本研究は、現地再調査により同津波クノイ



図 1 クノイダルボア撮影地点(図中★⑩)

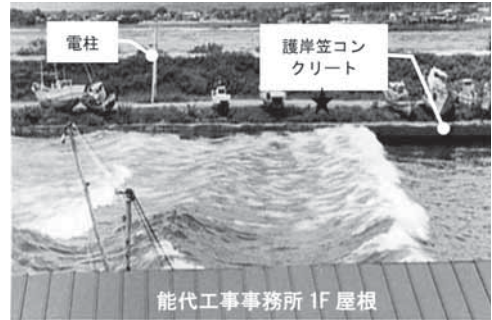


写真 1 旧建設省能代工事事務所前面の津波クノイダルボア(同事務所 2F から撮影)

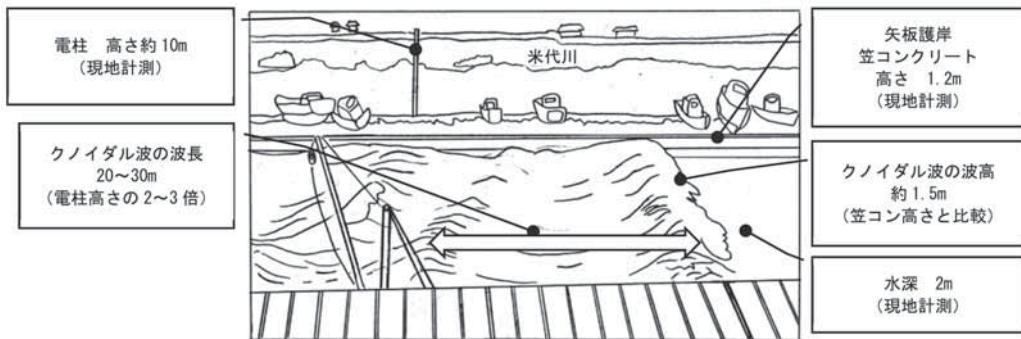


図 2 クノイダルボアの波長・波高の写真判読結果(現地再調査に基づく)

\* (株) 防災技術コンサルタント

ダルボアの波長・波高を特定し、シミュレーションにより再現するものである。

## 2. 現地再調査

### (1) 現地再調査結果要旨

現地再調査結果より判明したクノイダル波の波長・波高を図 2 に要約する。

### (2) 再調査の詳細

現地調査は 2017 年 5 月 3 日 12:00 ~ 14:00 に下記要員にて実施した。

調査主任 千田健一

調査補助 千田聖

ロジステクス 千田智香子

調査時は、晴天・無風で波は穏やかであった。調査時潮位は、海上保安庁水路部の予報より、平均潮位  $-0.1\text{m}$  であった。図 3 に調査写真位置図を示す。



図 3 調査写真位置図  
丸番は以下の写真番号に対応

調査結果詳細は下記の通り。

【波長】クノイダル波の波長は、波頂部の間隔で電柱の高さの 3 倍程度である (図 2)。電柱の高さが現地計測より 10m なので波長 30m 程度である (写真 2.2)。

【波高】笠コンクリートの高さは 1.2m (写真 2.4) である。クノイダル波の波高は、3.5m

(水底から笠コンクリート天端)  $- 2.0\text{m}$  (水深)  $\div 1.5\text{m}$  である。

【水面貯木場の水深】水面貯木場の水深は、約 2.0m (写真 2.4)。



写真 2.1 クノイダルボア撮影地点 (図 3①) 能代工事事務所跡地は現在更地となっている。



写真 2.2 電柱高さ測定状況 (図 3②) クノイダルボアの写りに撮影されている電柱の高さは、5m スタッフの 2 倍 ( $\div 10\text{m}$ ) であった。



写真 2.3 電柱間隔確認 (図 3②) 電柱と電柱の間隔は 30 ~ 50m (現地確認)



写真 2.4 鋼矢板護岸笠コンクリート高さ及び貯木場水深(図 3③)

クノイド波の波高判定のため、鋼矢板護岸の笠コンクリートの高さを測定した。1.2mであった。

調査時水深は、1.9mである。調査時潮位は、平均潮位 -0.1m であるから、平均潮位では、水深は、2.0m 程度である。

### 3. CIP 法を用いた非線形分散長波モデル

#### (1) 支配方程式

シミュレーションは筆者が開発中の CIP 法を用いた非線形分散長波モデル<sup>7)</sup>で実施する。

支配方程式を表 1 に示す。

表 1 支配方程式

<p>連続方程式</p> $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$ <p>運動方程式</p> $\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$ $= \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} + \nu_\beta \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$ $\nu_\beta = 0.23 \sqrt{gD\eta}$ <p>ここに、<math>\eta</math> : 水位, <math>t</math>: 時刻, <math>x</math>: 空間座標, <math>M</math>: 流量フラックス, <math>h</math>: 水深, <math>D</math>: 全水深 (<math>=h+\eta</math>), <math>U</math>: 断面平均流速 (<math>=M/D</math>), <math>g</math>: 重力加速度, <math>\nu_\beta</math>: 渦動粘性係数。</p>
--

表 1 の支配方程式中、運動方程式は移流方程式であり、シミュレーションの際誤差を生じやすい。そこで、本研究では、誤差を小さくする目的で CIP 法にて移流方程式を差分する (表 2)。線形移流方程式に対する CIP 差分を表 2 に示す。

表 2 線形移流方程式の CIP 差分<sup>8)</sup>

<p>CIP 法による線形移流項の差分</p> $\frac{\partial M}{\partial t} + c \frac{\partial M}{\partial x} = 0$ <p>if <math>c &gt; 0</math></p> $M_i^{n+1} = [(a_i \xi + b_i) \xi + M_i^n] \xi + M_i^n$ $M_i'^{n+1} = (3a_i \xi + 2b_i) \xi + M_i'^n$ $a_i = \frac{M_i'^n + M_{i-1}^n}{\Delta x^2} - \frac{2(M_i^n + M_{i-1}^n)}{\Delta x^3}$ $b_i = \frac{3(M_{i-1}^n + M_i^n)}{\Delta x^2} + \frac{2M_i'^n + M_{i-1}^n}{\Delta x}$ $\xi = -c \Delta t$
--

ここに、 $c$ : 移流速度,  $n$ : 空間格子番号,  $i$ : 時間格子番号,  $\Delta x$ : 空間格子間隔,  $M'$  は  $M$  の  $x$  微分。もし  $c < 0$  なら、 $\Delta x \rightarrow -\Delta x$  とし、 $i-1 \rightarrow i+1$  と書き換えた式を用いる。CIP 法は、 $M$  の初期条件とともに  $M'$  の初期条件も必要であることに注意。

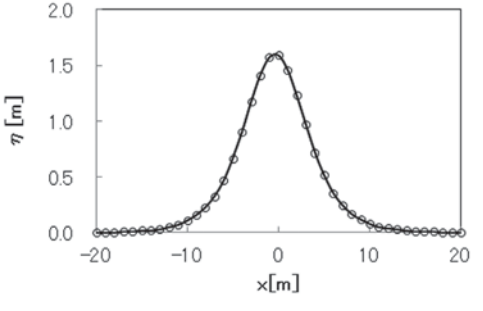
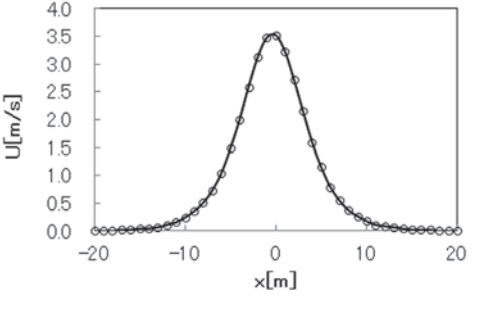
#### (2) 線形移流方程式による CIP 法の精度検証

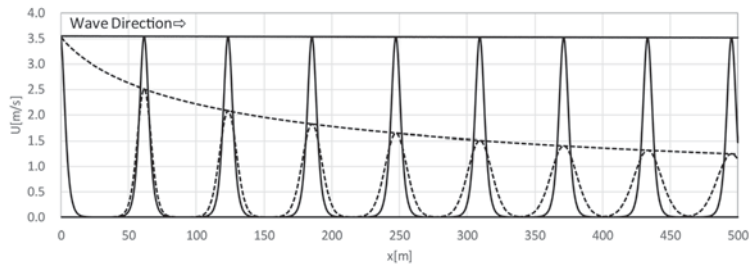
移流方程式の解法として、CIP 法が従来手法に対して精度上有利であることを以下に示す。

実務で多用される一次精度風上差分と、CIP 法の精度を表 3 の線形移流方程式のシミュレーションにより検証した。

図 3 ~ 図 5 は、孤立波の流速分布を  $x = 0m$  から右側に移流させた場合の 10 秒毎の流速分布スナップショットである。一次精度風上差分を用いると、津波ソリトン波状の短周期波では数値粘性により波形ピークが減衰する (図 3)。一方、CIP 法では、格子間隔を

表 3 線形移流方程式の境界条件

<p>水深 <math>h = 2.0\text{m}</math> (一定: 能代港中島水面貯木場の水深)</p> <p>孤立波波高 <math>H=1.6\text{m}</math> (<math>h</math> に対する孤立波の碎波波高)</p> <p>孤立波水位空間分布 2次近似孤立波</p> <p>流速分布 孤立波水位空間分布より下記の式で変換</p> $U(x-ct) = \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta(x-ct)$	<p>移流項の精度検証に用いる線形移流方程式</p> $\frac{\partial U}{\partial t} + c \frac{\partial U}{\partial x} = 0$ <p>波速 <math>c</math> (2次近似孤立波)</p> <p>空間格子間隔 <math>0.5\text{m}, 1.0\text{m}</math></p> <p>時間格子間隔 <math>0.05\text{Sec}</math> 波形出力間隔 <math>10</math> 秒</p>
	
孤立波 波高空間波形	孤立波 流速空間波形

図 3 CIP 法 (実線) 1次精度風上差分法 (点線)  $Dx=0.5\text{m}$   $dt=0.05\text{Sec}$ 

適切に選ぶことにより、短周期波の移流項を少ない格子数で、数値粘性の影響をほとんど受けずに計算することができる (図 3)。

#### 4. 水面貯木場クノイダル波のシミュレーション

海上保安庁水路部の海図と、本研究の現地再調査を基に、能代港から水面貯木場に至る地形モデルを一次元で作成した (図 4)。

本地形モデルと CIP 法を用いた非線形分

散長波モデルを用い、クノイダル波の再現シミュレーションを実施した。入力波は、沖側境界で、水位  $0 \sim 1.0\text{m}$  に漸増する段波とした。碎波判定は、表 4 の通りである。

結果を図 5 に示す。

##### 【CASE1 碎波項無視】

波が水面貯木場に侵入した後、波が過大に増幅し続け、波高  $2.5\text{m}$  に達する。これは、本研究の写真判読波高  $1.5\text{m}$  より  $1\text{m}$  高い。また、現地の水深  $h=2.0\text{m}$  に対する孤立波の碎波限界波高をも超えている。



表4 砕波判定式

$$\gamma = \frac{u_s}{c} = \frac{\eta}{D} - \frac{h}{3D} \left\{ D \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - 2 \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

ここに、 $\eta$  : 水位、 $c$  : 波速、 $x$  : 空間座標、 $h$  : 水深、 $D$  : 全水深 ( $=h + \eta$ )。砕波の限界  $U_s/c$  は、笠原・藤間・嶋原<sup>3)</sup>の研究より、 $\gamma = 0.6$  と設定。

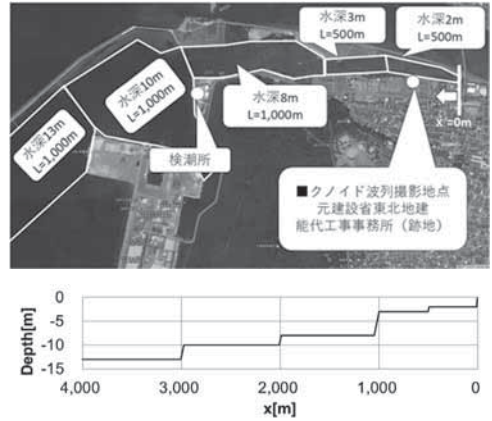


図4 1次元地形モデル

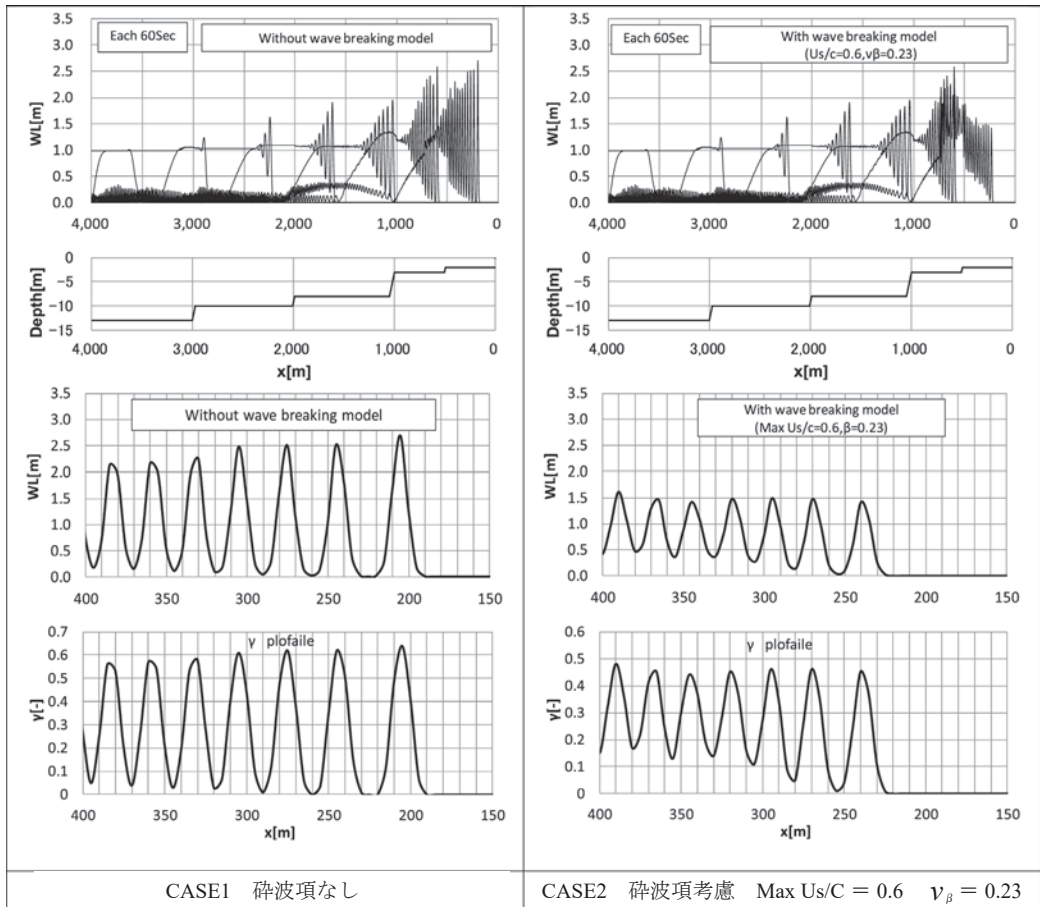


図5 シミュレーション結果

## 【CASE2 砕波項考慮】

砕波指標  $\gamma (= U_s/C) = 0.6$  渦動粘性係数  $\nu_\beta = 0.23$  として計算した結果、砕波により波高は 1.5m となり、写真判読結果とほぼ一致した。

## 5. まとめ

①日本海中部地震津波において、能代港中島水面貯木場に来襲した津波クノイダルポアの波長・波高等を確認するため、現地再調査を実施した。その結果、波長は約 20 ~ 30m、波高は約 1.5m であった。また、同貯木場の水深は 2m 程度であった (図 2)。

②移流項を CIP 法で差分化し、砕波モデルを組み込んだ非線形分散長波シミュレーションモデルを開発した。線形移流方程式により CIP 法の精度を確認したところ、格子間隔を適切に設定することにより数値粘性誤差はほとんど生じないことが分かった (図 3)。

③ ①の境界条件、②の非線形分散長波モデルを用いて水面貯木場のクノイダルポアのシミュレーションを実施した。砕波を考慮しない場合、波高は過大に算定された。砕波モデルを組み込むことにより、①の結果と整合するシミュレーション結果が得られた (図 5)。

## 【参考文献】

- 1) 岩瀬浩之・深沢雅人・後藤智明 (2001) : ソリトン分裂波の砕波変形に関する水理実験と数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻 .pp.306-310.
- 2) 松山昌史・池野正明・榊山勉・武田智吉 (2006) : 陸棚上における津波のソリトン分裂波に関する砕波モデル, 海岸工学論文集, 第 53 巻 .pp.226-230
- 3) 笠原健司・藤間功司・鳴原良典 (2008) : 流れを遡る津波の砕波機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻 .pp.101-105
- 4) 佐藤慎司 (1995) : 波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学講演会論文集, 第 42 巻 .pp.376-380
- 5) N.Shuto K.Chida F.Imamura Generation mechanism of the first wave of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake tsunami. Tsunami:Progress in Prediction,Disaster Prevention and Warning.P37-54
- 6) 昭和 58 年 日本海中部地震写真報告集
- 7) 千田健一 (2009) 「一次元非線形分散波の方程式を用いた CIP 法による河川を遡上する津波の数値計算」, 平成 20 年度土木学会東北支部研究発表会 /II-48 p.189-190 (CDR)
- 8) 工藤哲洋 (2009) CIP 法入門 数値 MHD 入門セミナー (場所:野辺山太陽電波観測所) インターネット