

津波時の港内流況の可視化計測

VISUALIZATION OF FLOW PATTERN OF TSUNAMI IN A HARBOR

大谷英夫¹・小林昭男²・高尾誠³・藤井直樹⁴・大森政則⁴

Hideo OHTANI, Akio KOBAYASHI, Makoto TAKAO, Naoki FUJII, and, Masanori OHMORI

¹正会員 工修 大成建設株式会社技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工博 大成建設株式会社技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 工修 東京電力株式会社原子力技術部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号)

⁴正会員 東電設計株式会社原子力土木部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

Tsunami causes extreme erosion and accretion in the bottom of a harbor. The collision force of the floating objects is also one of the problems in tsunami's disaster. To understand them, hydraulic model experiments are carried out. Flow pattern in a harbor by tsunami are measured by PTV (Particle Tracking Velocimetry), one of the flow visualization methods.

Tsunami intrudes in the harbor along the breakwater, and generates a circulation inside. In case of tsunami that has a large wave gradient, the super-critical flow and hydraulic jumps can be seen in the mouth of a harbor.

Accuracy of PTV was also verified in the experiment. The velocity by PTV is compared with that by an electromagnetic current meter. Those have quite good agreements except the space where the hydraulic jump exists.

Key Words : Tsunami, harbor, current, water surface elevation, PTV analysis, flow visualization

1. はじめに

津波に関する検討は、従来、主として水位に対して行われてきた。しかし近年、津波による侵食や堆積作用に起因した構造物の倒壊や港湾の機能障害¹⁾、流れに運ばれてくる漂流物の衝突力²⁾など、流れに関する新たな課題が挙げられている。これらの課題を検討するためには、津波によって発生する流況場を正確に把握する必要がある。しかし、実際に津波の流れを観測した例や津波の流況に着目した実験的研究は少ない。そのため、津波の流れに関する数値計算手法の検証データを入手することが非常に困難となっている。

一方、港内へ津波が到来すると、港の形状に起因した渦や流れの収束域・分散域が発生すると予想される。例えば、数値計算によって渦の再現性の検証を行う場合、実験や観測の結果にも渦が精度よく計測される必要がある。流速計による点計測ではその渦を見落とす可能性もある。渦などの流況を計測する方法として、近年、流れにトレーサーを混入して可視化し、PTV (Particle Tracking Velocimetry)³⁾やPIV (Particle Image Velocimetry)⁴⁾によって解析する方法が盛んに行われて

いる。

そこで、本研究では港内を対象とし、津波時の特徴的な現象を抽出することを目的に、津波時の流れの可視化実験を行った。本研究で採用した可視化計測方法の特徴は、通常微細なトレーサーを用いるのに対し、比較的大きなトレーサーを用いていること、かつ、水面に浮かべていることである。しかも、津波時の比較的高流速に対して適用した。そのため、ここで用いた可視化計測方法の精度を明らかにしておく必要があると考えられる。藤井らは⁵⁾本論文に述べる実験結果を用いて、非線形長波理論式にもとづく計算が、港内の渦、射流や跳水現象、剥離渦、循環流に対して実験結果と良好な一致を示すことをすでに明らかにしている。その論文の中で藤井らは、定量的な流速比較を流速計で得られたデータにより検証し、可視化計測によって得られた流況に対しては定性的な比較にとどめている。

本報では、可視化計測で得られた流速データが計算との定量的な比較に資することを示すことも目的とし、PTVと電磁流速計によって得られた流速データを比較し、可視化計測方法の検証を行った。

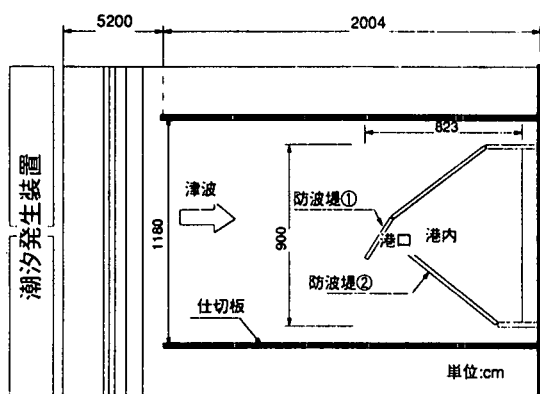


図-1 実験模型

表-1 実験ケース

	種類	造波時間(s)	初期水深(cm)
case1	押し波	30	8.5
case2	正弦波	280	8.5

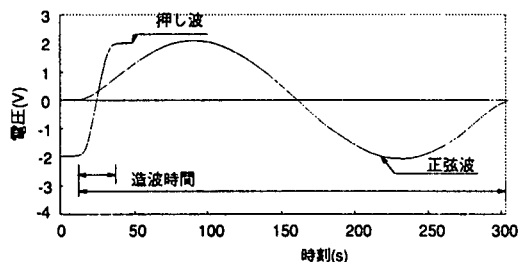


図-2 造波信号

2. 実験方法

(1) 実験装置および模型

実験は、長さ25m、幅11.8mの平面水槽内に、幅9m、奥行き8mの港湾模型を設置して行った(図-1)。模型縮尺は1/76.5であり、水深は、8.5cm(実機換算6.5m)とした。津波は、プランジャー式の潮汐発生装置によって造波した。なお、図-1中、港湾上方の長い方の防波堤を「防波堤①」、港湾下方の短い方の防波堤を「防波堤②」と呼ぶことにする。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。津波の模擬波は、押し波(case1)と正弦波状に水位が変化する場合(case2)を想定した。津波の周期に対する影響を見るために両ケースで初期水位と最大水位を一致させた。津波の周期は、押し波のみのケースでは定義しにくい。そこで、プランジャーが動いている時間(造波時間)を津波の周期に関する量として定義した(図-2)。case1は造波時間 $T_m=30$ 秒(実周期 $T_p=4.4$ 分)、case2は造波時間 $T_m=280$ 秒(実周期 $T_p=40$ 分)とした。なお、case2は現実的な津波を想定したケースであり、case1は、波形勾

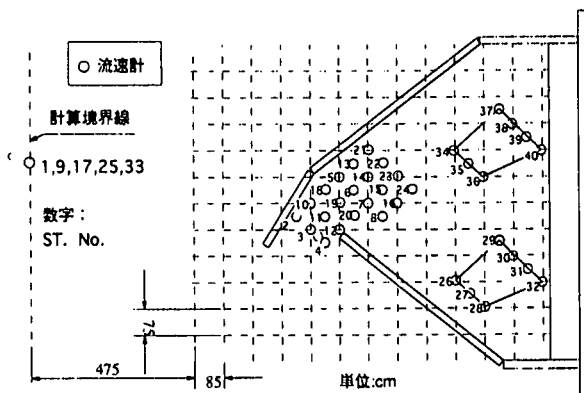


図-3 流速計測点

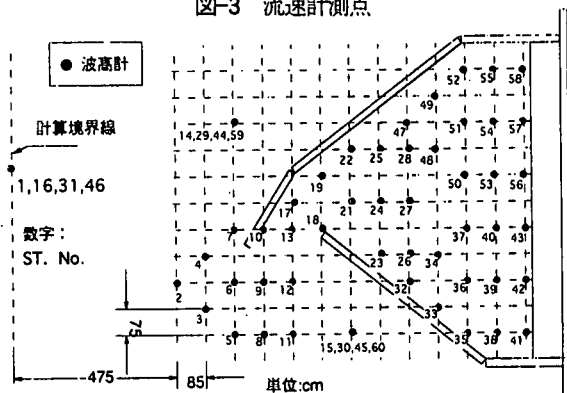


図-4 水位計測点

配が大きな津波の例とした。

(3) 計測方法

港内の流況は、流れを可視化する方法(可視化実験)で計測した。水面にコルク製の浮標(径4cm)を投入し、津波によって発生する流れを浮標の移動としてとらえ、ビデオ撮影した。浮標は径4cm、高さ1cmの円筒形状で、側面には浮標同士の付着を防止する目的で針を8本等間隔に差し込んである。浮標の動きを定量化するためにPTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて画像解析した。PTV解析は、各時刻間での浮標の位置を対応付けることにより、流速を求めるものである³⁾。PTV解析による平面流況の精度は、画像から得られる情報量(流速データの数)によって決まるため、造波を3回繰返し、同じ時刻毎に足し合わせて情報量を増やした。また、港内全体に流速ベクトルが均一に得られるように、浮標の少ない場所には浮標を補充した。流速を算出する画像の取込み時間間隔は、流速の大小に応じて、case1は1/30秒、case2は11/30秒とし、計4枚の画像から一時刻の流速ベクトルを算出した。すなわち、一時刻の流速ベクトルを得るために必要な画像の取込み総時間は、case1は0.1秒、流速が小さいcase2は1.1秒である。可視化計測では、浮標の水平移動を求めているため、水面波による誤差、浮標の流れに対する追従性の問題がある。そこで、流速および流れの曲率が大きい水域には流速計を水槽底面より2.5cmの高さに設置した(図-3)。また、波高計も設置し水位分布を求めた(図-4)。沖側には計算の境界条件となる水位と流速を得るため、計測線(計

算境界)を設けた。データは、水位については5Hz、流速については1Hzのローパスフィルターを用いて処理した。また、水位分布には1Hzのローパスフィルターを使用した。

3. 接近津波の特徴

まず、実験に用いた津波の特徴を示す。case1 (周期30秒、押し波)の水位変化を沖側から順に示す(図-5(a))。ST.1については流速も示した(最上段)。Uは岸沖方向の流速、Vは沿岸方向の流速である。ST.1では、 $t=10$ 秒で津波が到達した。ST.1における進行波の水位のピーク(5.8cm)は $t=23$ 秒であり、流速のピーク(56cm/s)は $t=20$ 秒であった。水位のピークより流速のピークが先に現れるのは、底面摩擦の影響である⁶⁾。ST.2では、 $t=16.7$ 秒に津波が到達した。ST.2のピーク水位は6.5cmであり、ST.1のピーク水位5.8cmに比べ0.7cm水位が増加した。津波の水位ピーク部は、津波先端部に比べ流速が大きいために、津波が進行する過程で水位ピーク部が津波先端部に近づく。そのため、津波先端部の波形は切り立つように変形し、その分水位も増加したと言える。港口部に位置するST.13では、 $t=24$ 秒で水位がピーク(3.0cm)になった後、急激に水位が低下した。これは沖側の防波堤により流れが剥離して加速するためである。これにより港口部では跳水が発生した。港外のST.15では、 $t=33$ 秒以降に大きな短周期の水位変動が発生した。これは、港外の反射波に伴う分裂である。

図-5(b)は、case2 (造波時間280秒、正弦波)の水

位変化である。波形は造波信号と同様正弦波状であり、一部の凹凸は反射波成分による。ST.1では、 $t=10$ 秒程度で津波が到達した。水位のピークは $t=78$ 秒に2.5cmを示した。ST.1の流速のピーク値は、水位が最大になる前の $t=32$ 秒で13.5cm/sとなった。水位のピークに相当するところでは、反射波により流速足が打ち消されている。港口のST.13には、case1にみられた急激な水位低下が現れない。また、港外にcase1のような短周期の水位変動を示す反射波は現れなかった。

4. 港内の流況変化

図-6は、PTV解析で得られたcase1 (造波時間30秒、押し波)の流速ベクトル、図-7は、同じ時刻の水位分布である。図-6中の太線は、ビデオ画像により確認した跳水の位置を示す。津波が港内に進入した直後の $t=23$ 秒では、防波堤①の端部(図中左側)で流れが加速し、港口部へ回り込んだ。 $t=26$ 秒では、防波堤①端部の背後で渦を形成し、防波堤②の端部(図中右側)の存在と合わせて実質的な港口幅が半分程度になっていることが分かる。港口部には防波堤①②それぞれの端部を結ぶように帯状の強流域が形成された。水位分布(図-7)からは、流速の加速とともに水位が低下したことが分かる。 $t=29$ 秒では、防波堤①端部の背後の渦が発達し、実質的な港口幅を狭めた。このため防波堤②先端の流速がさらに大きくなり、射流と跳水が生じた。また、防波堤②の港内側にも渦が発生した。この渦の中心部に当たる位置で水位が顕著に低下した。 $t=32$ 秒以降は、防波堤①に沿って強流

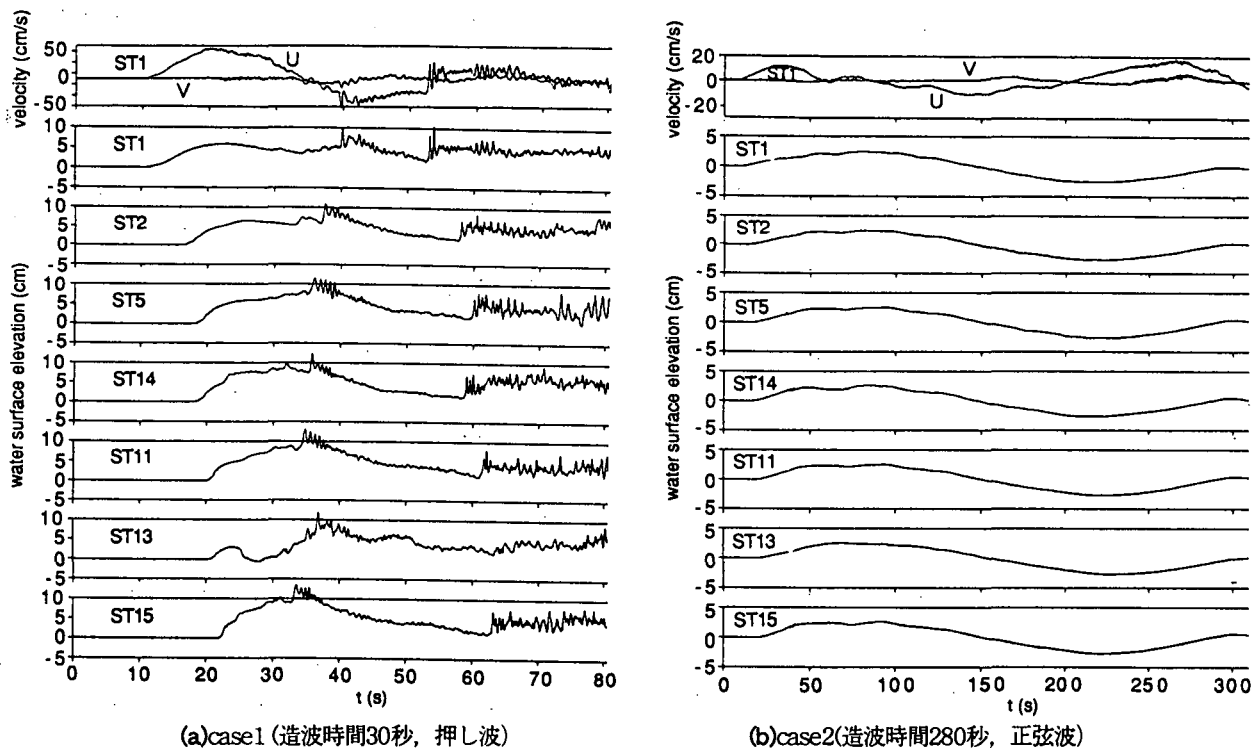


図-5 津波の流速・水位変化

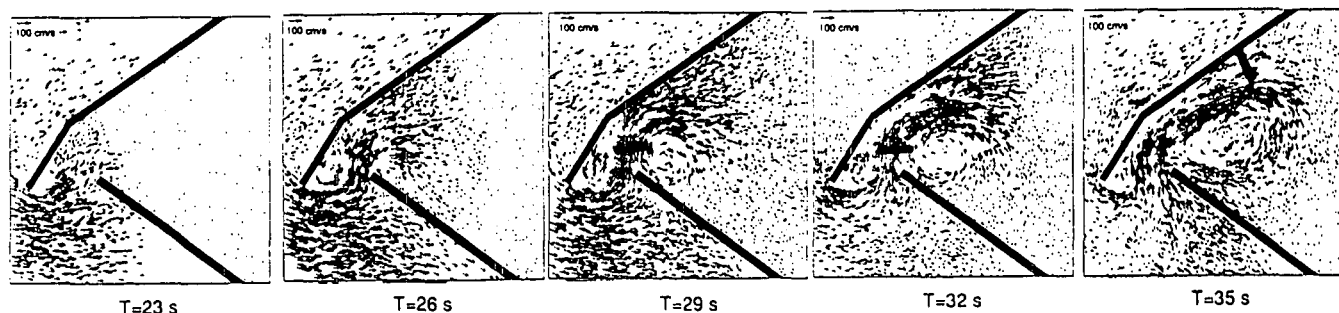


図-6 津波時の港内流況 (case1)

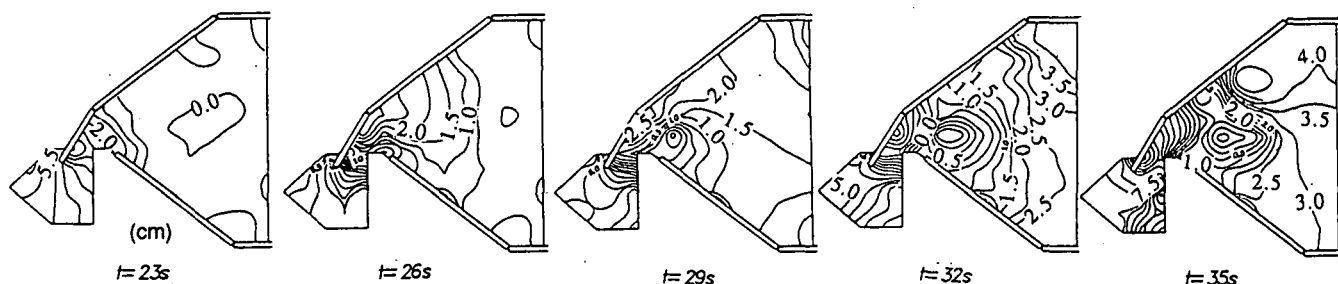


図-7 津波時の港内水位 (case1)

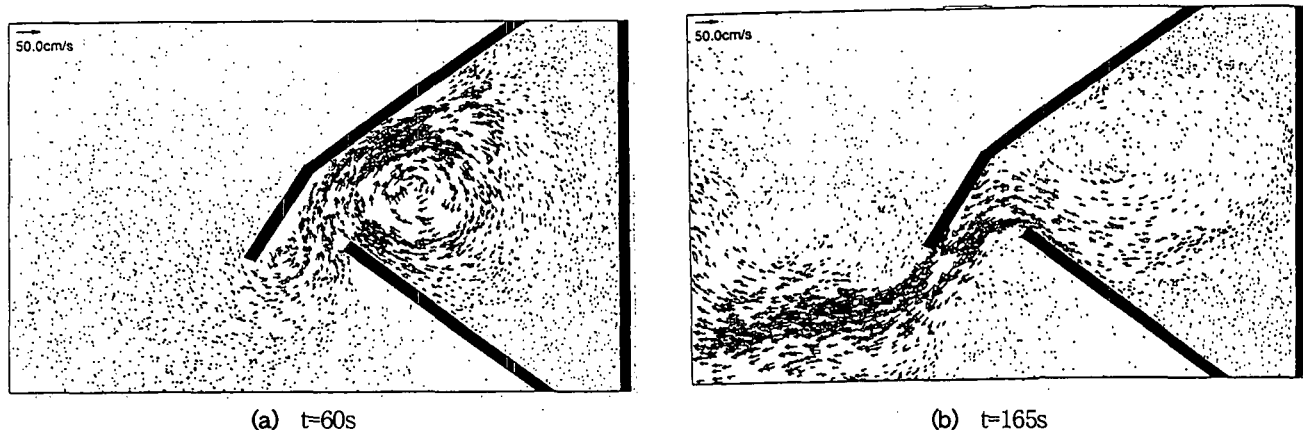


図-8 津波時の港内流況 (case2)

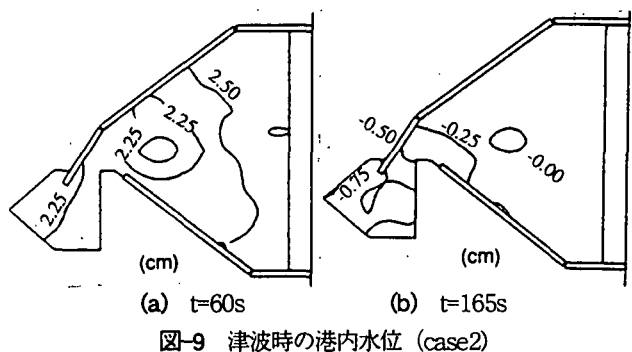


図-9 津波時の港内水位 (case2)

域が港内に発生した。また、防波堤②港内側の渦が発達し、港内で時計まわりの流況となった。t=35秒では港口部の跳水は消え、同時に防波堤①沿いの強流域が発達し、港内に跳水が発生した。跳水の下流側は、水深が大きいため急激な減速を示している。35秒以降は、水位の上昇

と港内に流れ込む流速の低下により、港内の跳水は消え、港内は時計まわりの流況となった。図-7から水位は、港内を時計まわりに上昇している。これは、図-6の流況パターンと一致し、津波の進入経路を示していると言える。

図-8(a), (b) は、case2 (造波時間280秒, 正弦波) の流速ベクトルである ((a)t=60秒, (b)t=165秒)。また、図-9(a), (b)は同じ時刻の水位分布である。押し波時の流況 (t=60秒) は、大局的にはcase1と同様で、防波堤①の端部で流れが加速し、港口部へ回り込む。さらに、防波堤②端部で流れが剥離し港内に時計まわりの渦が形成された。case2では、case1に見られた跳水は発生しなかった。時計まわりの渦は、図には示していないが、t=60秒以降港の奥側へ径を増大しながら移動し、港内全体に時計まわりの循環流を形成した。引き波時のt=165秒では、港口から港外にかけて帯状に強流域が形成された。引き波時は、押し波時に比べ港内の流速は小さい。

水位分布（図-9(a), (b)）から、case1の造波時間が短い押し波のケースに比べ港内の流速が小さいため、港内の渦中心の水位低下が小さいことが分かる。また、水位が上昇している位相の図(a)では、港内と港外の水位差は0.25cm程度、水位が低下している位相の図(b)では0.5cmの水位差であり、港内外の水位差も造波時間が30秒の押し波のケースに比べ小さいことが分かる。case1, case2の結果から、港内の流況は津波の波形勾配によって大きく異なることが分かる。

5. 可視化計測方法の検証

4.に示したように津波時に渦や循環流が港内に形成されることが可視化計測によって非常に明確に示された。ただし、本計測で使用した可視化計測方法は、水面の浮標の動きを捕らえている。そのため、浮標が水面の擾乱や流れの曲率に影響を受け、流速に誤差を生じている可能性がある。そこで、case1の津波を対象に、可視化計測方法と点計測を比較するため、図-10に示すAからDの位置に電磁流速計を配置した。押し波時(a), 転流時(b), 引き波時(c)の流況データを無作為に3時刻抽出し、可

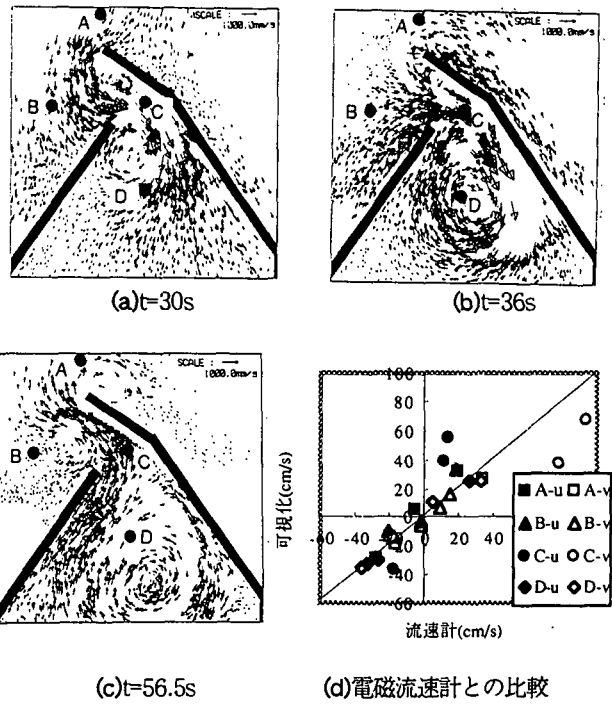


図-10 可視化計測方法の検証

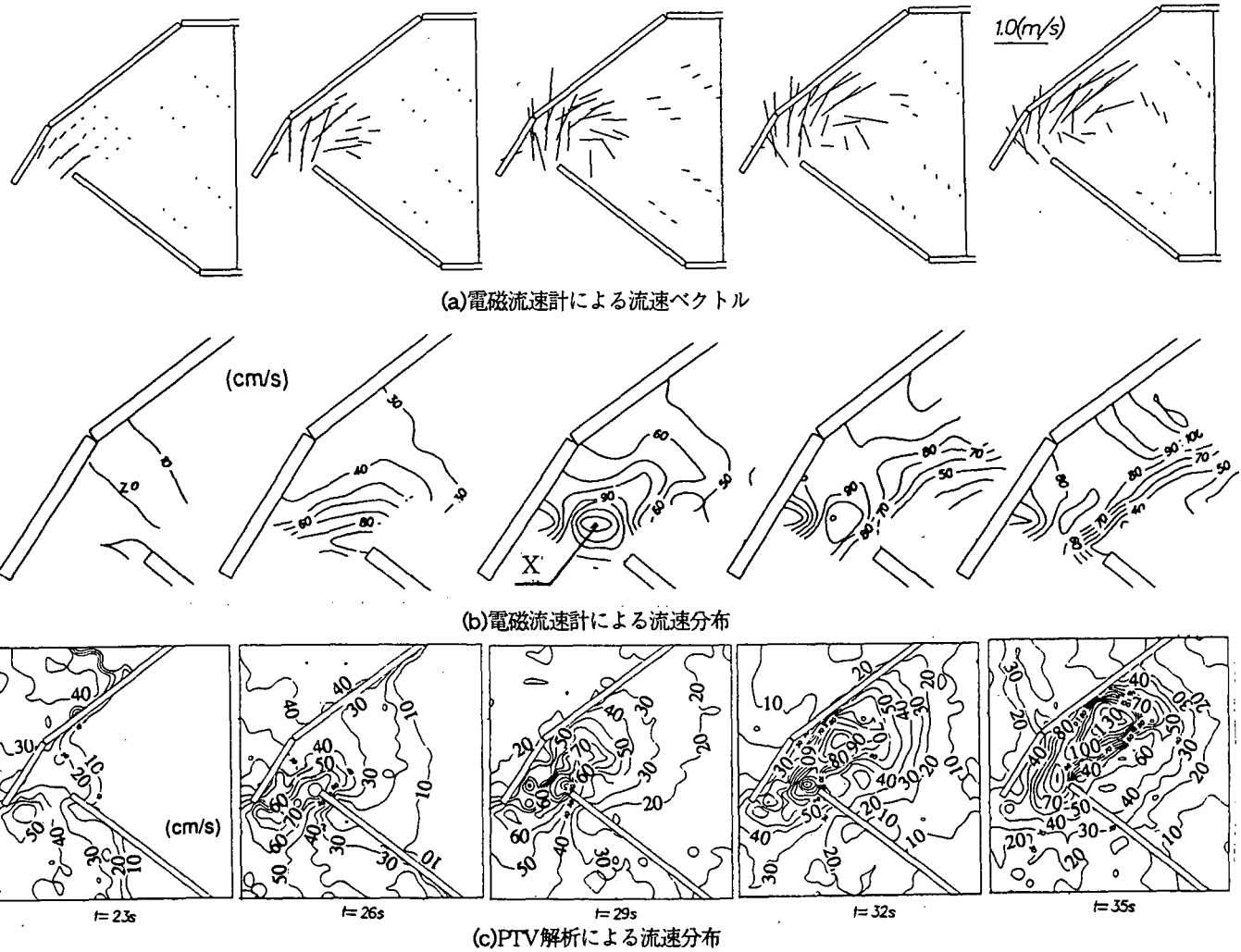


図-11 PTVと電磁流速計の比較 (case1)

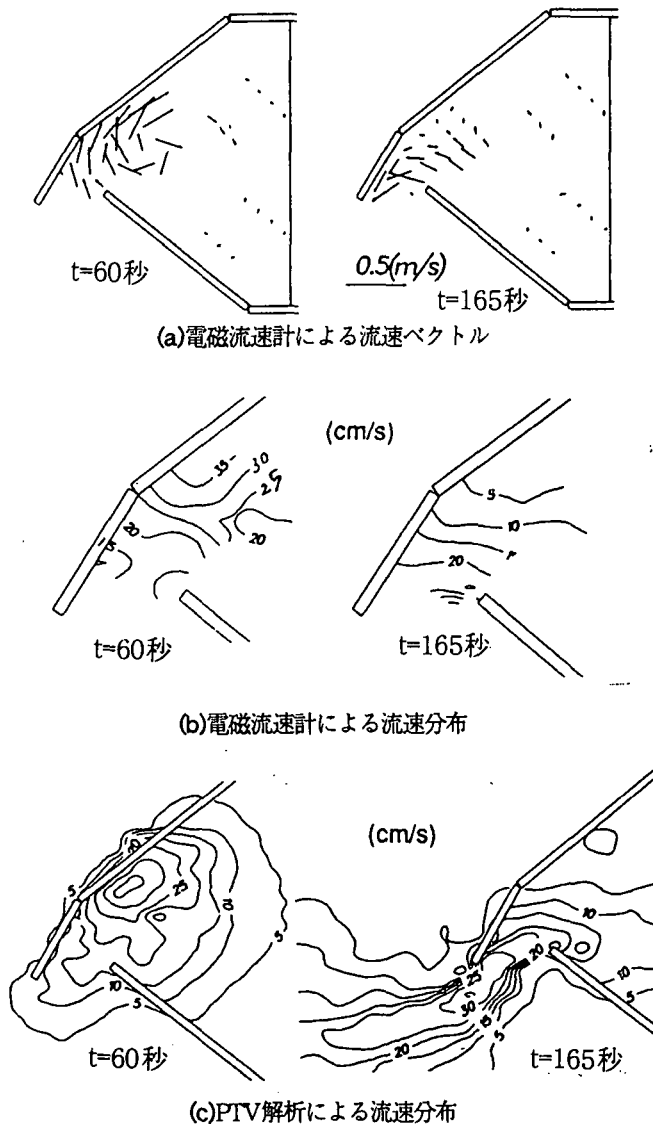


図-12 PTVと電磁流速計の比較 (case2)

視化画像をPTVで解析した結果と電磁流速計で得られた結果を比較する (図-10(d)). 図中、キャプションの黒抜きが流速のU成分、白抜きがV成分である。測点A, B, D においては、電磁流速計で得られた流速と良好な一致を示した。図-10(a)~(c)に示された港内外の渦、すなわち本実験程度の曲率を持つ流れに対して、本計測結果から定量的な流速の評価が可能であると言える。しかし、測点CではPTVによる値が電磁流速計の値と大きく異なった。これは、測点Cでは $t=30$ 秒前後に跳水 (後述) が生じ、その後も水面が大きく変動していたためである。

図-10の測点Cの周辺のデータを検証するため、流速の絶対値に関して、PTV解析と電磁流速計を比較する。図-11にcase1の結果を示す。図(a)は電磁流速計から得られた流速ベクトル、図(b)は電磁流速計の流速値、図(c)は図-6のベクトルに対して空間的に補完操作を行い得られた港口部付近の流速値である。流速ベクトルに対して比較すると、防波堤① (図中上側) に沿う流速の加

速減速、時計まわりの循環流などに関して、PTVの結果 (図-6) は、図-11(a)の電磁流速計と同様に計測されている。流速値は、補完操作上の値の違いが防波堤近傍では見られるものの、PTVの結果も電磁流速計の結果もほぼ一致している。ただし、 $t=29$ sの跳水が発生している場所周辺では、電磁流速計のデータの方が射流状態を示す流れの向きに対して横断方向に長いピークを有した流速分布形を示している (X点)。したがって、ここに示した可視化計測方法は、跳水の前後、すなわち射流から常流への遷移点近傍では誤差が伴うと言える。

図-12は、case2についてPTV解析と電磁流速計を比較したものである。case1で見られた跳水が発生しないため、両者の一致度は高い。

以上より、本研究で用いた可視化計測方法は、跳水近傍では誤差を生じやすいものの、その点を除けば定量的にも電磁流速計と同程度の精度の結果が得られることが示された。

5. おわりに

津波時の港内流況に対して可視化計測を行った。可視化計測することにより、津波が沖側に突出した防波堤に沿って港内に進入し循環流を形成すること、港口での剥離渦など詳細な流況データが得ることができた。

また、流速データに関してPTVと電磁流速計を比較し、ここに示した可視化計測手法の検証を行った。跳水近傍では、大きな水面変動により誤差を生じやすいものの、その点を除けば電磁流速計と同等の精度であることを確認した。

津波時の流況計測方法として、可視化計測が有効であり、得られた結果が津波の流速計算の検証に定量的にも十分使用できるものであることが示された。

謝辞：本研究を進めるに当たり、岩手県立大学の首藤伸夫教授、東北大学の田中仁教授、今村文彦助教授、京都大学の高橋助手から貴重な御指導を頂いたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：津波による土砂の輸送，東北大学工学部津波防災実験所研究報告，第6号，pp.1-56，1989.
- 2) 首藤伸夫：津波-その発生から沿岸への影響まで，ながれ 13pp.196-203,1994
- 3) 津田宣久，小林敏雄，佐賀徹雄：汎用PTVの開発とその応用，流れの計測，Vol.10，No.13，pp.107-115，1992.
- 4) 社団法人可視化情報学会：実戦集中講義PTVの要点，(社)可視化情報学会講習会，1998
- 5) 藤井直樹，大森政則，高尾誠，大谷英夫：津波による港内流況の数値計算，海岸工学論文第44巻，pp.291-295,1997
- 6) R.G.Dean and R.A.Dalrymple：Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Prentice-Hall, Inc., pp.146-154,1984.

(1999.4.19受付)