

津波が作用する石油タンク周辺の流動特性

CHARACTERISTICS OF FLOW AROUND THE OIL TANK ACTED BY TSUMAMI

秋山真吾¹・池谷毅²・大森政則³・藤井直樹³

Shingo AKIYAMA, Tsuyoshi IKEYA, Masanori OHMORI and Naoki FUJII

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 東電設計株式会社 港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

In order to take countermeasures against tsunami disasters, it is important to understand deformation of tsunami runup on shore, characteristics of flow around structures, and mechanism of tsunami wave force acting on the structures. In this study, we carried out the hydraulic model test and the numerical analysis to clarify characteristics of flow around the oil tank on shore acted by tsunami. Thorough the hydraulic model test, the following findings were obtained. Separation vortexes appeared behind the tank and the fast-flowing area shifted to the rear of the tank as the distance from it was farther. Maximum velocity was close to 0.8m/s and there was great possibility of scour of foundation around the tank. It was possible to simulate these characteristics around the oil tank by numerical analysis.

Key Words : tsunami, oil tank, countermeasures, scour, hydraulic model test, numerical analysis
separation vortex, max velocity

1. はじめに

近年, 東海, 東南海, および南海沖地震の発生する可能性の高まりとともに, 地震によって引き起こされる津波の防災対策の構築が指摘されている。日本は太平洋沿岸部に人口が密集するだけでなく, 工場や発電所が立地しており, 多くの施設が津波による被害を受ける危険性がある。特に, 工場や発電所には石油タンクが設置されているため, ひとたび津波を受けると火災や燃料漏れなどの2次災害が発生する恐れもある。昨年の12月に発生したインド洋津波では, スマトラ島北端で直径約23mの石油タンクが数十メートルも流されて押しつぶされているのが発見されている。

しかしながら, 浅海域や陸上での津波の遡上現象は非常に複雑であり, 石油タンクに及ぼす影響については十分に解明されていない。津波防災対策を構築するためには, 陸上への遡上津波変形を評価するとともに, 石油タンク周辺での流動特性や石油タンクに作用する力の発生メカニズムについて解明する必要がある。

本研究では, 石油タンクに想定される津波災害の防止を目的とし, 津波が作用した場合の石油タンク周辺における流動特性について検討を行った。

2. 水理実験のモデル化

(1) 津波による被害の想定

津波の遡上により, 石油タンクには様々な被害が想定される。石油タンクが設置される基礎は砂地盤であることが多いが, 津波による速い流れが来襲すると, タンク周辺の地盤が洗掘されて(図-1) 構造物が転倒する可能性がある。そこで, 実験では津波が遡上する際のタンク周辺の水位と流速分布について計測を行った。

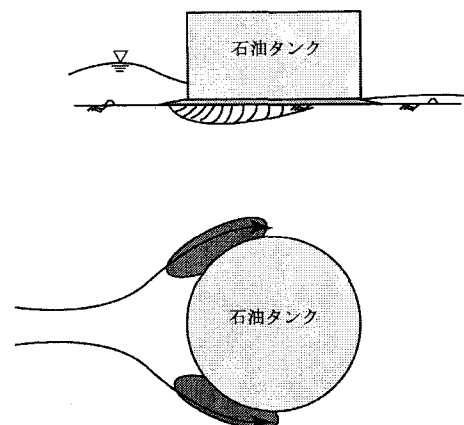


図-1 津波による石油タンク周辺の洗掘

(2) 津波条件

日本近海で観測された津波は、沖合での波高が3～10m、周期が近地震津波で5～30分、遠地震津波で数時間である。そこで、実験では波高7.5m、周期15分の津波を対象とし、初期位相は押波とした。また、海底地形は日本沿岸で地震津波が来襲する地域の海底地形を調査した結果を基に、平均的な値として1/100勾配を選定した。

(3) 石油タンク施設のモデル化

実験で対象とした石油タンク施設については、各地のタンク施設の調査結果、さらにタンクメーカーからのヒアリングに基づいてモデル化を行った。

タンクの高さは規模によっても変化するが、容量が大きくなると20m程度のものが多いことがわかった。また、タンク内径Dと高さHの比D/Hが1から4に分布していることから、実験ではD、Hともに20mとした。護岸からタンクまでの距離は、タンク内径Dを用いると1Dから4Dに分布している傾向があり、津波が遡上した際に最も浸水深が大きくなる1Dとした。なお、実際のタンクは基礎地盤に直接置かれているだけであり、実験も同様とした。

タンク施設の立地条件としては、護岸前面の水深や護岸の形式・天端高さなども考慮する必要がある。護岸前面の水深や護岸の天端高さについては、調査した施設の平均的な値として、ともに4.0cmとした。また、護岸形状については、直立堤や消波ブロック被覆堤等が採用されているが、遡上水深が大きくなる直立堤とした。

なお、実際にはタンクは複数基設置されていることが多いが、実験では1基を対象とし、防油堤や配管などの施設も省略した。また、陸上部は水平とし、背面側に反射板を設けた。図-2、写真-1に構造形式の概要を示す。

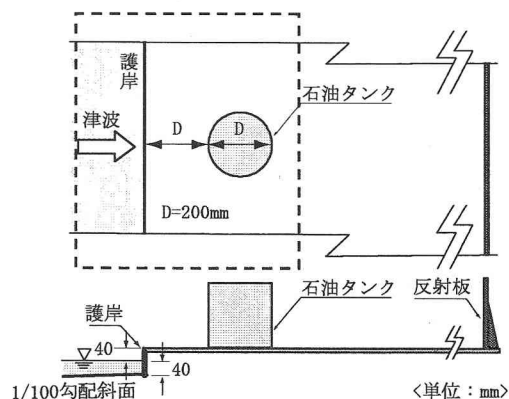


図-2 タンク施設の構造形式

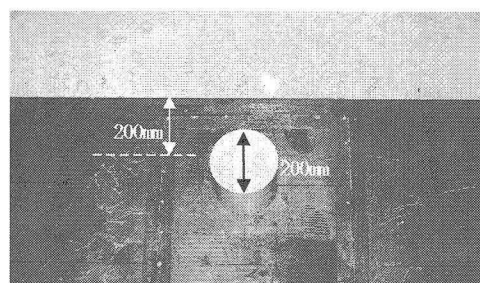


写真-1 タンク模型設置状況（図-2点線範囲）

(4) 実験方法

実験には大型平面水槽を用い、軸流ポンプ装置により所定の津波を発生させた。また、実験の縮尺はフルード則に従い1/100とした。表-1に実験条件を、図-3に実験模型のセットアップを示す。

表-1 実験条件

項目	諸元
津波条件(正弦波)	7.5cm, 90s, 押波初動
斜面勾配	1/100
タンク形状 (H: 高さ, D: 直径)	形状: D/H=1 (H=20.0cm)
護岸からの距離	距離: 1D
護岸前面の水深	4.0cm
護岸の形式・天端高さ	直立護岸, 4.0cm

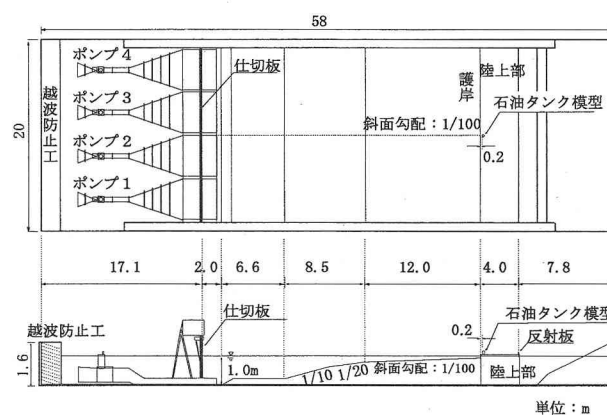


図-3 実験模型セットアップ

図-4に流速計測地点を示す。円周方向(deg)の計測は石油タンクに沿って180度までを30度刻みに7点、水平方向(L)の計測はタンク際から0mm, 50mm, 100mmの3点、鉛直方向(V)の計測は地盤から5mm, 10mm, 15mmの3点とし、計63点で流速を計測した。計測にはレーザー流速計を用い、サンプリング周波数は200Hzとした。なお、流速計はタンクの周囲に沿って回転させるため、タンクの接線方向と法線方向の流速成分を計測した。また、水位の計測には超音波水位計を用い、計測地点は平面方向に21点とした。

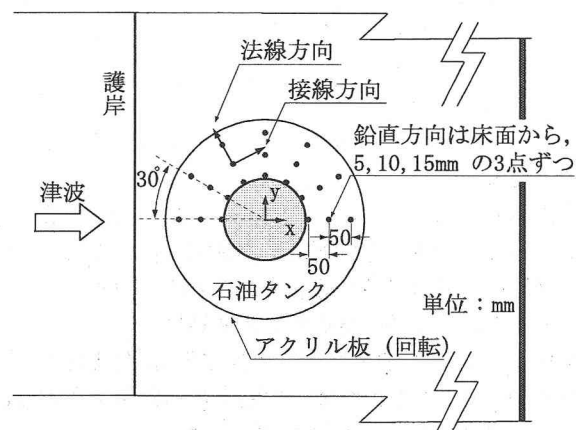


図-4 流速計測地点

3. 実験結果

実験では陸上部の背面側に反射板を設けたため、遡上した津波は反射板により再び沖側に向かう戻り流れとなる。図-5に $L=100\text{mm}$, $V=10\text{mm}$, 60度における各流速成分と水位変動の時系列を示す。実験では、護岸を遡上してくる波を進行波、背面からの戻り流れを反射波と定義し、それぞれの波に対して流速の最大値 $U_{\max}$ を求めた。写真-2に進行波の作用状況を、写真-3に反射波の作用状況をそれぞれ示す。

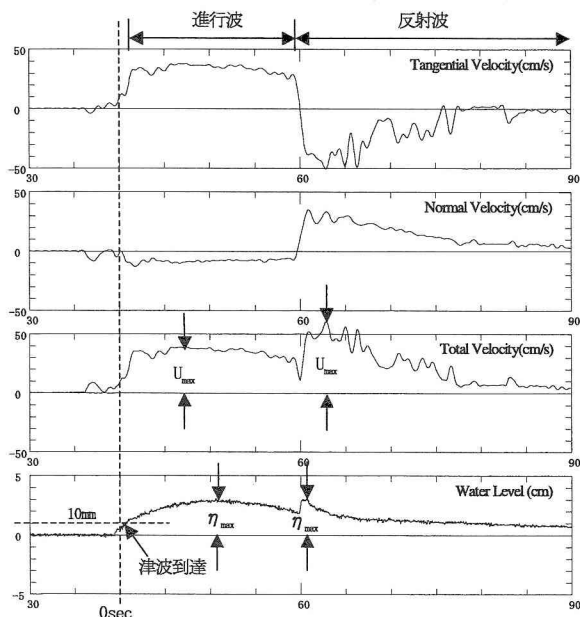


図-5 流速・水位変動時系列 (フィルター処理)

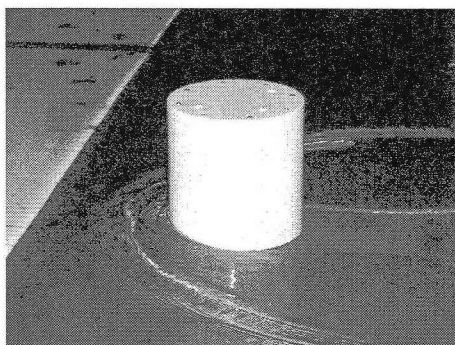


写真-2 進行波作用時

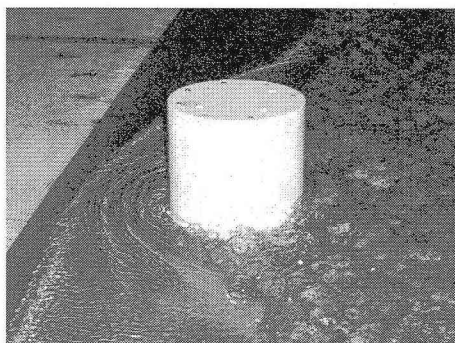


写真-3 反射波作用時

なお、レーザー流速計で得られたデータには、乱れが多く含まれており、そのままでは流速の評価が難しい。そこで、得られたデータにフィルターをかけ、定常的な成分を取り出して評価を行った。図-6にフィルター処理を行う前の図-5と同じ接線方向流速の時系列を示す。

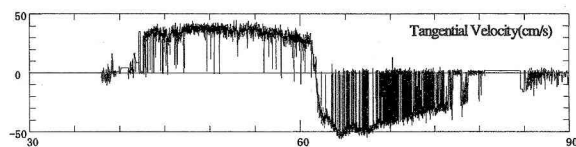


図-6 流速変動時系列 (フィルター未処理)

(1) 円周方向の流速特性

図-7に $L=100\text{mm}$, $V=10\text{mm}$ における、円周方向7点での接線方向流速の時系列を示す。この結果を見ると、進行波作用時は60度付近から流速が大きくなり、120度で最大、さらに150度から180度にかけてタンクの背面側では接線方向流速がプラス側とマイナス側で大きく変動している。また、反射波作用時には180度逆の特性が見られ、120度付近から流速が大きくなり、60度で最大となっている。

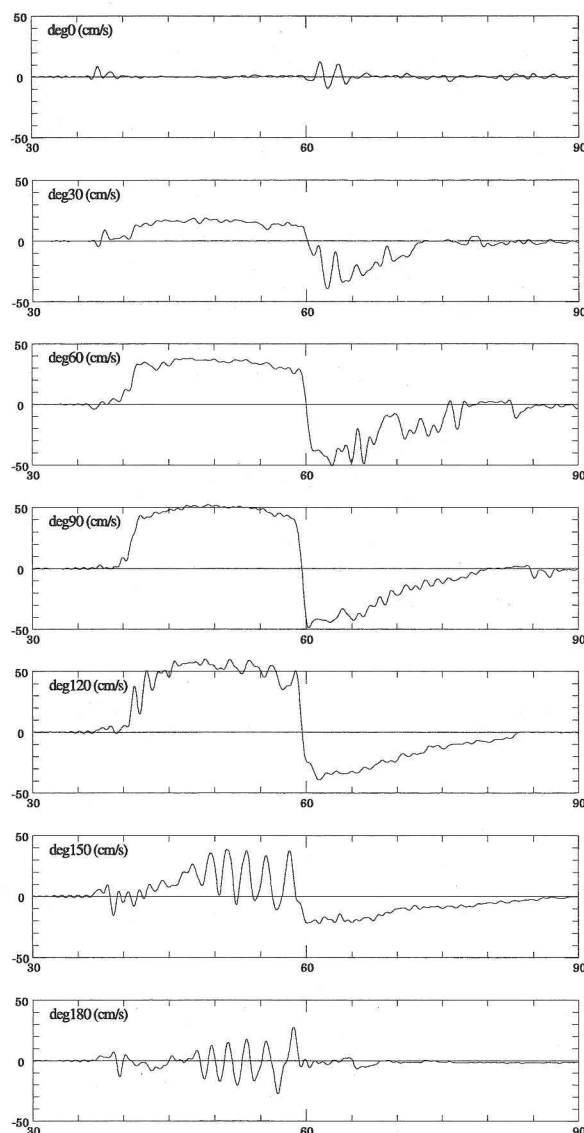


図-7 接線方向流速の変化 ($L=100\text{mm}$, $V=10\text{mm}$)

(2) 流速ベクトル

図-8に $V=10\text{mm}$ における、石油タンク周囲の流速ベクトルを示す。津波は計測開始から約40秒でタンクに到達するため(図-5参照)、40secをゼロとして整理した。

この結果を見ると、タンク側面の120度付近で剥離が生じ、背面側は徐々に渦が形成されている様子がわかる。さらに、津波が到達してから約20秒後に反転した流れが発生し、反射波となって進行波とぶつかりながら沖に向かっていく。

(3) 最大流速・最大遡上水深分布

図-9に $V=10\text{mm}$ における、進行波と反射波作用時の円周方向の最大流速分布を示す。図中には、比較のために $L=0\text{mm}$, 50mm , 100mm の位置での結果を併せて表示している。また、図-10に石油タンク周囲の最大遡上水深の分布を示す。ただし、遡上水深にはタンクからの距離による差が見られなかったため、平均値とした表示した。なお、計測はタンク半面のみで行ったが、特性がわかるように左右対称に表示した。

これらの結果を見ると、最大流速、最大遡上水深の特徴としては、①流れの向きに対して90度から150度付近で流れが速く、最大で 80cm/s 程度の流れが見られる、②タンク側面の120度付近で流れが剥離するため、背面側での流速が小さい、③水平方向ではタンクから距離が離れる($L=0\text{mm} \rightarrow 100\text{mm}$)ほど、流れの速い領域が背面側に移行している、④津波の向きによらず、流速の分布特性はほぼ対称となっている、⑤進行波に比べ、反射波作用時の方が遡上水深は大きい、⑥進行波作用時にはタンク背面の遡上水深が小さくなり、フルード数が1を超える場所も見られる、といった点が挙げられる。

なお、鉛直方向の流速分布特性は概ね一致していた。

(4) 円柱構造物周りの流れの特性

これまで、円柱構造物周りの流れの特性に関する研究が数多く行われている。このうち、大口径の円柱構造物に作用する潮流を対象とした佐伯ほか¹⁾、石野ほか²⁾の研究によると、円柱近傍の流速は流下側90度付近で最大になるとともに、135度付近で流れが剥離することが

わかっており、津波を対象とした今回の実験でもほぼ同様の特性が見られた。また、円柱構造物周りの洗掘深と時間変化について検討した中川、鈴木³⁾の研究によると、一方向の流れに対しては初期に急速に洗掘が進むことが確認されている。今回の実験では、進行波の作用時間は現地換算で3分程度と潮流に比べて短いものの、最大流速が 8m/s 近いこと、背面では遡上水深が小さく流れが乱れていることから、石油タンク周囲の基礎地盤が津波により洗掘される可能性が十分にあると考えられる。

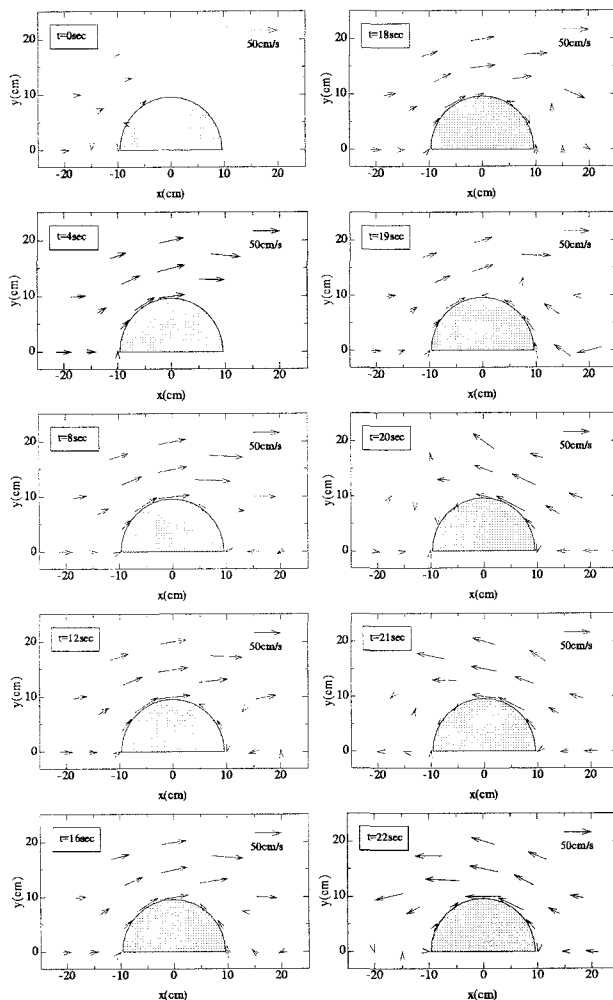
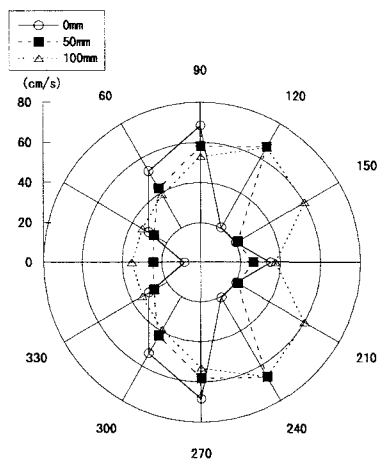
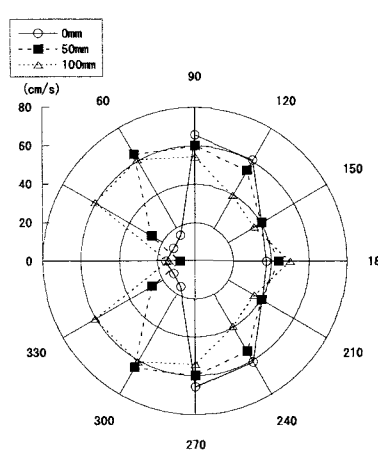


図-8 流速ベクトル図 ($V=10\text{mm}$)



進行波



反射波

図-9 最大流速分布 ($V=10\text{mm}$)

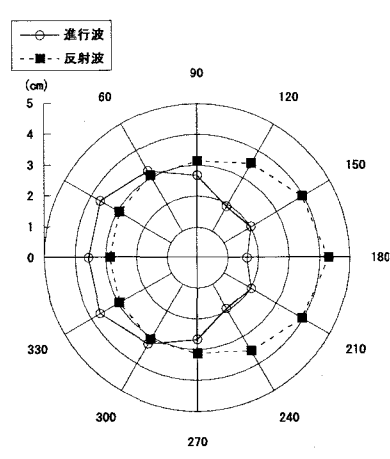


図-10 最大遡上水深

4. 数値解析による遡上現象の再現

実験で対象とした津波（波高7.5cm，周期90秒，押波初動）に関する数値解析を実施し，陸上部に遡上した津波の水位と流速について検討を行った。

(1) 数値解析の概要

数値解析には，非線形長波方程式をスタッガード格子でリープフロッグ法によって差分化する一般的な計算手法を用いた．解析の沖側境界は，図-3に示した実験模型図の1/100勾配の始点とし，そこで計測された水位・流速波形からGuza et al.⁴⁾の入反射分離式によって入射波成分を作成したものを境界水位として与えた．また護岸の越流には相田⁵⁾の方法を用い，底面の粗度はManningの粗度係数で，海域を $n=0.02$ ，陸上部を $n=0.005$ として解析を実施した．解析格子間隔 dx は1.0cm，解析時間間隔 dt はC.F.L.条件を満足するよう0.0025秒とした．

(2) 水位・流速時系列波形の比較

図-11に示したP-1地点（ $L=100\text{mm}$ ，0度）およびP-2地点（ $L=100\text{mm}$ ，90度）について，水位および流速の時系列波形に関する比較を行った．図-12に水位の比較結果を，図-13に流速の比較結果を示す．これらの結果より，初期の流速波形に若干のずれが見られるが，両地点共に水位，流速を概ね再現していることがわかる．

(3) 最大遡上水深・最大流速の比較

図-14は，タンクから10cm離れた地点での進行波と反射波の最大流速分布について，実験結果と解析結果を比較したものである．反射波の180度で，解析結果は実験結果より大きな値を示しているが，その他の地点では進行波・反射波共にタンク周辺のピーク流速を概ね再現していることがわかる．

図-15は，タンクから100mm離れた地点での進行波と反射波の最大遡上水深の解析結果を示したものである．図-10に示した実験結果と比較しても，解析結果はタンク周辺の水位分布を概ね再現していることがわかる．

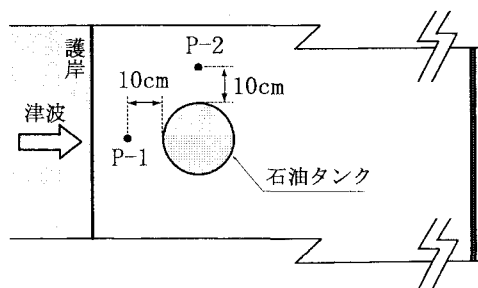


図-11 時系列比較位置

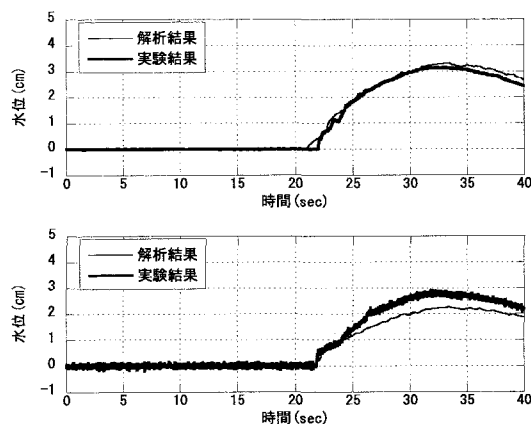


図-12 水位時系列波形の比較（上:P-1，下:P-2）

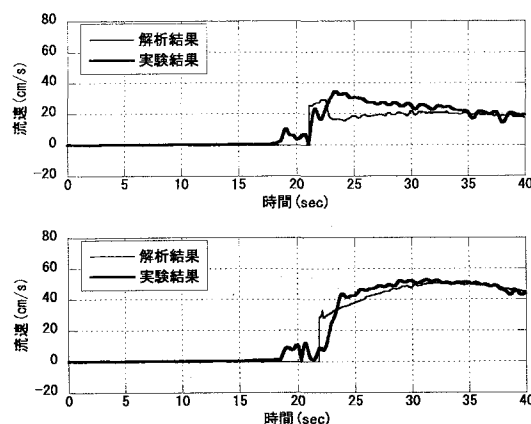
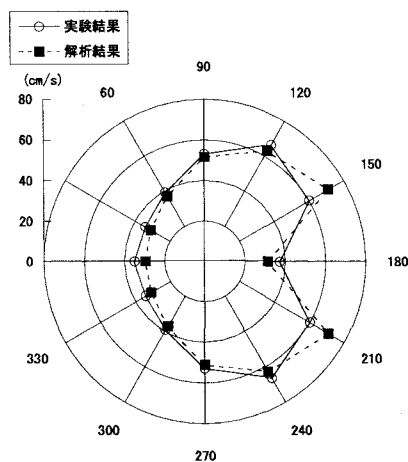
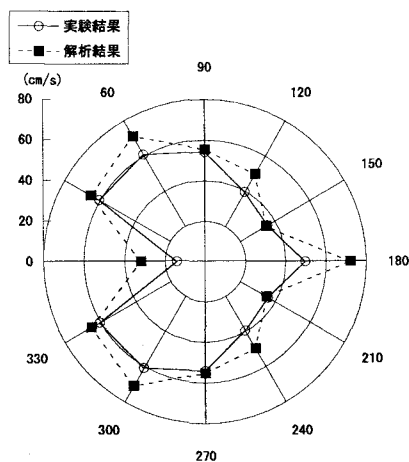


図-13 流速時系列波形の比較（上:P-1，下:P-2）



進行波



反射波

図-14 最大流速分布（ $L=100\text{mm}$ ）

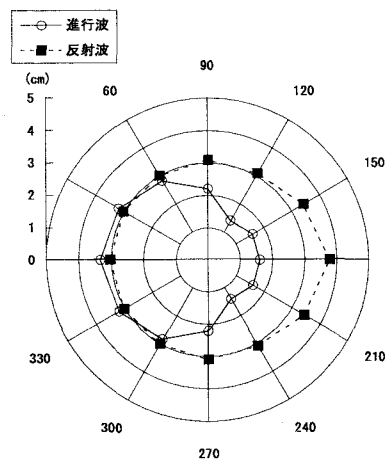


図-15 最大遡上水深（ $L=100\text{mm}$ ）

(4) 解析による複数基タンク設置時の試算結果

本解析により、タンク1基の場合の水位、流速特性を概ね再現できたことから、複数基のタンクが設置された場合の試算を行った。図-16に複数基のタンク配置を示す。前後に3基のタンクを配置し、護岸からタンクまでの距離、タンク間隔は内径Dと同じ距離とした。なお、タンクの配置以外の条件は、単体の解析と同様とした。

図-17にタンク周辺での最大流速分布を、図-18に特に流速の大きい二列目端のタンクについて、10cm離れた地点での進行波と反射波の最大流速分布を示す。計算の結果、タンク間で速い流速が発生しており、この影響によってタンク周辺での洗掘が1基の場合より大きくなる可能性があることがわかった。

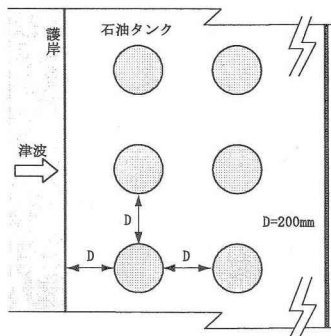


図-16 複数基タンクの配置

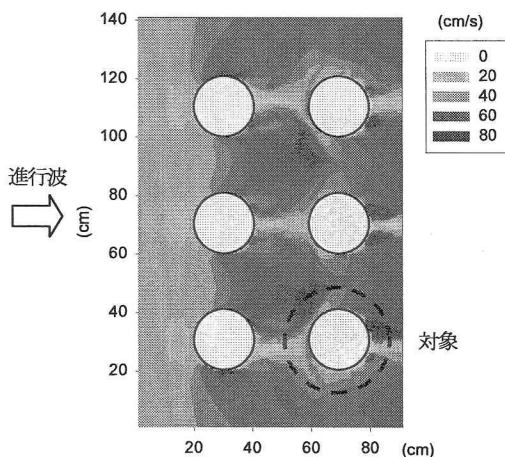


図-17 複数基タンクの最大流速分布（進行波）

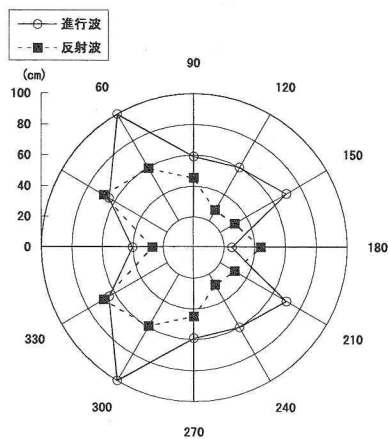


図-18 最大流速分布（二列目）

5. おわりに

津波が作用する石油タンク周辺の流動特性について検討を行った。結論及び今後の課題は以下の通りである。

(1) 結論

- ・ 石油タンク側面では流下方向の120度付近で流れが剥離し、流速の変動が大きくなるとともに、後方に渦が形成されている。
- ・ 円周方向では、流下方向の90度から150度にかけて流れが速く、最大で80cm/s近い流速が観測された。
- ・ 水平方向では、タンクからの距離が離れるほど、流れの速い領域が背面側に移行する。
- ・ 進行波作用時にはタンク背面の遡上水深が小さく、フルード数が1を超える場所も見られた。
- ・ 流速の初期の時系列波形に若干のずれが見られたが、非線形長波方程式により、タンク周辺での時刻歴変位及び最大遡上水深・最大流速を概ね再現できた。
- ・ 解析の結果、複数基のタンクを設置した際にタンク間でより大きな流速が発生することが懸念された。

(2) 今後の課題

今回の実験では石油タンク1基を対象とし、防油堤などの施設も再現しなかったが、実際の石油施設では防油堤や複数基のタンクが設置されていることが多い。解析の結果、複数基設置した方が大きな流速が発生していることから、今後はタンクの形状や配置など、より現状に近い条件で石油タンク周囲の流動特性について評価を行う必要がある。さらに、洗掘を防止するための対策工についても検討を行うことが重要である。

謝辞：本研究は、消防防災科学技術研究推進制度による補助を受けていることを付記する。また、本研究の遂行にあたり、東北大学大学院今村教授にご指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯康二, 北川信, 山懸守, 今井貫爾, 利穂吉彦, 小池司: 強潮流下における大規模構造物周りの局所洗掘現象に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 海岸工学論文集, 第32回, pp. 435-439, 1985
- 2) 石野和男, 大谷英夫, 坂巻明人, 遠藤信治, 那須清吾: 急潮流下海洋構造物周辺の洗掘防止工内の浸透流特性, 海岸工学論文集, 第38回, pp. 191-195, 1991
- 3) 中川博次, 鈴木幸一: 潮流による橋脚周辺部の洗掘特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第22回, pp. 21-27, 1975
- 4) Guza, R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman: Runup of random waves on gentle slopes, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 708-723, 1984
- 5) 相田勇: 陸上に溢れる津波の数値実験-高知県須崎および宇佐の場合-, 東京大学地震研究所集報, Vol. 52, pp. 441-460, 1977