

1964 年新潟地震時における地盤沈下・液状化を考慮した 津波浸水・油流出の再現

Simulation of Oil Spreading and Inundation Including Liquefaction
Caused by the 1964 Niigata Earthquake Tsunami

岩渕洋子¹・越村俊一²・今村文彦³

Yoko IWABUCHI, Shunichi KOSHIMURA and Fumihiko IMAMURA

The destruction of storage of flammable materials by the hydrodynamic force of tsunami may result spread of large fires, flammable materials such as spilled oil and ignited material advected and diffused by the tsunami current in a harbor or on inundation land. To prevent damage from spreading in tsunamis and oil spills and functional decline in harbors, we carried out numerical simulation for oil spreading in the 1964 Niigata Earthquake Tsunami, in which the initial conditions of land, water level, and oil are carefully given by considering the fault motion, liquefaction, and storage of oil. We proposed some conventional method to estimate each initial condition in the tsunami simulation.

1. はじめに

1964 年新潟地震では、臨海工業地帯の石油タンクから油が漏洩し、その後来襲した津波が油流出や火災の被害を拡大させた(岩渕ら, 2006a)。油流出による複合津波被害では、市街地へ油が流れ込むと、救助活動・復興の妨げとなる他、住環境の悪化という観点から、浸水のみによる被害と比較して資産価値を極度に低下させる。その上、1964 年アラスカ地震津波や同年の新潟地震津波の様に、臨海工業地帯での大規模な火災へ発展することが危惧されている。著者らは、このような複合津波被害の軽減をめざす防災計画の立案に資することを目的とし、解析によって被災シナリオを検討するための水・油 2 層流モデルの開発をおこなってきた。

本稿では、臨海工業地帯での津波被害の連鎖として、「液状化による沈下や浸水、地震動と不等沈下による油流出、津波氾濫流による油の運搬」が発生確率の高い被災シナリオと考え、油の流動解析を行う場合に不確実であった液状化による噴水の空間分布を、1964 年新潟地震での資料から明らかにした上で、現象の再現を行った。

2. 1964 年新潟地震における地盤の液状化と断層運動による地盤沈下

1964 年新潟地震では、地盤沈下・陥没が新潟市内各所で見られ、浸水域の拡大に影響を及ぼした。海上保安庁(1964)によると、地震により浸水した地帯は、全般に 50 cm 程度沈下陥没し、特に地下水の噴出した地域や埋立地(0 m 地帯)の陥没は大きかった。信濃川左右

の護岸から 300 m 以内は 50 ~ 80 cm、万代橋、昭和大桥周辺及び信濃川左岸の低地部は 100 ~ 150 cm 陥没した。この浸水域は、断層運動による地盤沈下が助長した津波の浸入と液状化による噴水が複合的に重なったものである。「複合的」と表したのは、浸水域拡大の原因は、大量の地下水噴水のみならず、堤防が崩壊することによる津波の浸入も考えられるためである。一方、沈下量という観点からは、津波来襲前の地盤の全沈下量は、断層運動による地盤沈下と液状化による沈下の総和である。陸上域での全沈下量(断層運動によるもの+液状化によるもの)の定量的評価が可能となれば、臨海工業地帯の地震・津波被害想定やそのための解析に有用である。そこで、これらの分析に用いることのできるデータを収集した。表-1 にその一覧を示す。断層運動による地盤沈下量については、局所的な分布であれば観測結果(図-1(a): 海域)が得られている。これまでは、陸上遡上域での全沈下量(断層運動+液状化)の分布に関しては、海上保安庁(1964)の情報以外に検討材料が得られなかった。液状化による沈下量については、計測や判別が難しかったためか、地図上に位置情報と沈下量が詳細に整理されている例はほとんどないといっていよい。

ここでは、まず、全沈下量の分布について海域・陸域を含めて平面的にとらえ、次に、最終的な浸水域と液状化による地下水の噴水を関連づけて考察をおこなう。次に、断層運動に起因する地盤沈下が、陸上遡上域の新潟市における全沈下量に含まれているのかを解析でも確認する。

(1) 水準点による全沈下量の把握

図-1(a)に Mogi ら(1964)による海底変動量の等変位線を示す。沈降域を示す破線は、海底測量をおこなった調査領域のみであり、新潟市への沈降の影響が判定でき

1 正会員 博(工) (独)原子力安全基盤機構 解析評価部
2 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科
3 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

表-1 沈下量分布および浸水域

	沈下要因	データ保有領域		実測	解析
		陸	海		
海底変動量分布 (Mogi ら, 1964)	断層運動	—	○	図-1(a)	図-3
水準点の沈下量 (本稿)	断層運動 液状化	○	—	図-1(a)(b)	—
0 m 地帯分布 (海上保安庁, 1964)	断層運動 液状化	○	—	図-2	—
浸水域 (海上保安庁, 1964)		○	—	図-1(b)	—

なかった。ここでは新たに、地盤沈下の長期観測に用いられている 1 等・2 等水準点の新潟地震による鉛直沈下量（国土地理院，1965）を GIS 上で浸水域に重ねて整理する。水準点は陸域の鉛直変位量を面的に捉えるために十分な数とは言えないが、浸水域内での沈下量が得られており、地盤沈下量分布と浸水範囲を定量的に関連付けることができると考えたからである。この重ね合わせから、水準点の内 3 箇所の沈下量は 500 mm を超えていることが明らかとなった。局所的に大きな沈下がみられる上、その 2 点が信濃川に近接する水準点であることから、被災地で液状化現象の影響が大きかったことを裏付けることができた。ただし、水準点の鉛直変位の内訳として、断層運動の影響も含まれることを否定できないため、注意が必要である。

（2）浸水域と液状化による地下水噴水

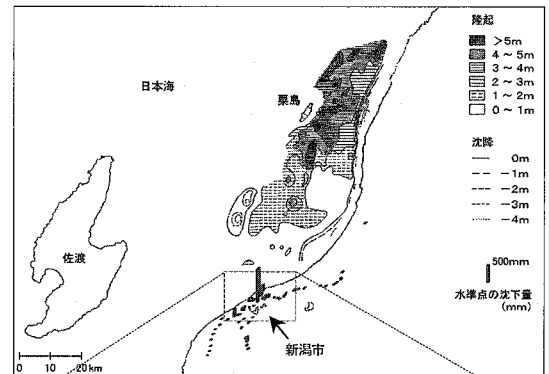
次に、最終的な浸水域と液状化による地下水の噴水を関連づけて考察をおこなう。まず、図-1(b)に示すように、当時の現地調査で報告されている浸水範囲から、津波が遡上していない浸水域は液状化によって噴水したものと考えることができる。前述の水準点で沈下量が大きかった 2 地点もこの領域もしくはそれに限りなく近い地点となっている。図-2 には新潟市内の地震前後の 0 m 地帯を示す（海上保安庁，1964）。信濃川周辺で地盤が陥没・沈下していることから、液状化の影響が大きいことが推測できる。

（3）断層運動の解析による陸上域での沈下量予測

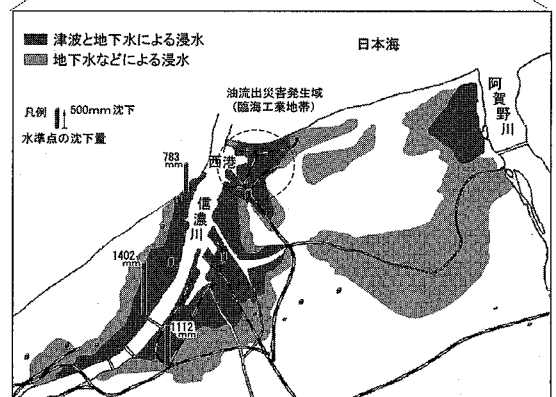
震源域は被災地である新潟の近海に位置しているため、津波遡上域の地形が断層運動によって沈降（または隆起）することも十分に考えられる。震源域の真上に位置する粟島の隆起量は観測で 0.5～1.6 m である。2. (1) 節の冒頭で述べたように、図-1(a)の Mogi ら（1964）による実測値では陸上域の実測の沈下量が得られないため、その欠落部分を補うために、断層モデルによる解析を行なう。図-3 に Mansinha・Smylie（1971）モデルを用いた数値解析による地盤変動を示す。用いた断層パラメータを表-2 に示す。これは岩淵ら（2006a）が Mogi ら（1964）の隆起域に整合するように求めたものである。

この断層パラメータによる解析の結果、新潟市より北部が主な変動領域であるため、新潟市内では断層運動による沈下はほとんど起きない結果となった。

以上、表-1 のデータ群とそれらの整合によって、新潟市内の陸上遡上域における全沈下量分布に対する、断層運動による地盤沈下量（または、液状化による沈下量）の内訳の分析をおこなった。液状化の影響については、①水準点の沈下と②地下水の噴水として現れていることがわかり、沈下量と地下水噴水の範囲が得られた。



(a)断層運動に起因した地盤変動量の分布 (Mogi ら, 1964)



(b)新潟港周辺の津波浸水域（土木研究所，1965）と水準点の沈下量

図-1 地盤変動量と浸水域

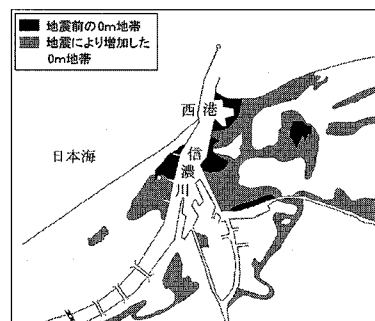


図-2 地震前後の 0m 地帯の変化（海上保安庁，1964）

表-2 1964年新潟地震津波の断層パラメータ(岩渕ら, 2006a)

D	θ	δ	λ	L	W	U
10	200	70	90	100	40	4

D : 深さ (km), θ : 走向 ($^{\circ}$), δ : 断層面の傾斜角 ($^{\circ}$), λ : 滑り角 ($^{\circ}$), L, W : 断層長さおよび断層幅 (km), U : 食い違い量 (m).

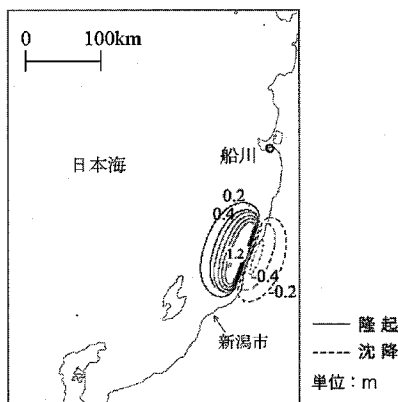


図-3 新潟地震による推定地盤変動量分布 (岩渕ら, 2006a)

3. 地盤沈下・液状化を考慮した津波浸水および油流出の再現

地震断層が近地に存在し、液状化が生じやすい地盤条件の港湾や臨海工業地帯である場合、地震動や液状化による不等沈下によって陸上構造物が傾斜・損傷する。津波被害推定では、地盤沈下による浸水被害の増大や、工業地帯からの可燃物の流出を考慮した解析が必要である。前節では、この両者に帰着する沈下量や噴水現象の把握ができた。図-1(b)に示した、臨海工業地帯の油の流出域に着目すると、津波来襲前には既に液状化によって浸水していたことがわかる。臨海工業地帯での津波被害の連鎖として、「液状化による沈下や浸水、地震動と不等沈下による油流出、津波氾濫流による油の運搬」が発生確率の高い被災シナリオと考え、この被災のプロセスを簡略的に考慮した条件で、津波氾濫流による油の流出の数値実験を行なう。ただし、岩渕ら (2006a) で述べるように、1964年当時と現在の対策は異なっており、本解析では、地震動や津波に対して防油堤が十分に機能しなかった1964年新潟地震を想定した解析条件としている。

(1) 数値モデルと計算条件

数値モデルは、非線形長波理論に基づく水・油2層流モデル (岩渕ら, 2006b) を用いる。各層の運動方程式には界面抵抗の項を付加して運動量を受け渡す。数値モデルの油の拡がり特性は、埜口 (1991) の水理実験との比較によって、妥当であることが示されている (岩渕ら,

2007)。今回の検討では、水との密度比が0.7の油とし、水と油層の界面抵抗係数は0.01を用いる。本稿では、油流出解析の基礎検討であるため、図-3の領域全体でなく、図-4に示すように昭和石油、新潟西港、信濃川を含む領域 (計算格子 $\Delta x = 6.25$ m, 1044×1124 メッシュ) のみを対象とし、津波の入射条件は規則波を用いる。西港は図-4の中央付近に位置し、その東に昭和石油の構造物群が数十個林立している。図-5(a)は同地区の地震発生直後の上空写真を示し、図-5(b)は、石油タンクの配置と事後調査による浸水域を示す。津波の入射条件としては、図-4の計算領域の北端1列の水位変化 $\eta = A \sin(2\pi t/T)$ で与え、岩渕ら (2006a) を参考にして振幅 (A) = 2 m とした。周期は (T) = 10 分、計算時間格子は $\Delta t = 0.1$ 秒とする。正弦波を入射波として設定したのは、入射波に対する遡上波と油層の挙動との関連を把握することが容易なためである。水・油2層の計算では、油を伴った遡上過程で数値振動に起因する計算誤差が発生し易いのが現状である。この影響を把握するために、本稿では便宜上正弦波を入力波として採用することとした。

(2) 地震動に起因する現象と解析上の初期条件

津波氾濫流との複合により被害を拡大させる要因として考慮すべき①地盤変動、②初期水面、③流出油量について表-3に整理し、その評価方法をまとめる。これらの評価結果は、津波氾濫流と油流出の2層流計算を実行する際の初期条件として利用する。

油の流出の初期条件は、臨海工業地帯を浸水させ、油をその水面上に浮遊させた状態とする。陸上遡上域の標高はフラットではないため、海水面を基準とした水位1.2 mで噴水による浸水を与えるため、水の厚さ (浸水深) としては数10 cm程度で標高に応じて分布させてある。これに対して初期油量は、当時の残油量 (消防庁, 1964) を基に作成した図-5(c)を参考にして設定した。初期油層厚さについては、設定域全面に均一に0.7 mと仮定した。液状化を想定した水の層と損傷タンクからの漏洩油の解析過程における出現時間については、津波が汀線に達した時点で出現させる設定とした。以上により沿岸部での液状化による噴水を簡略的に考慮した条件で、津波氾濫流による油流出現象を評価できるものと考ええる。

(3) 計算結果

昭和石油に油層を設置した場合の計算結果として、計算領域の一部分 (図-4の破線部) を拡大して、図-6のスナップショットで示す。実線は汀線および建物 (石油タンク群を含む) の輪郭を表す。右列の計算結果は油厚、左列は津波の水位を示す。津波が汀線に達した時点 ($t = 280.1$ 秒) で液状化後の浸水を模擬した水位1.2 mを任意の範囲に与え、その一部にさらに油層厚0.7 m

を与えている。この浮遊する油層が、図-6の350秒～500秒の図に示されるように、津波氾濫流によって一気に押し流される過程が再現できており、本モデルで解析可能であることが確認された。臨海工業地帯でのこれまでの地震津波災害の経験から、被害の連鎖として、「液状化による沈下や浸水、地震動と不等沈下による油流出、津波氾濫流による油の運搬」が発生確率の高い被災シナリオと考え、解析上の初期条件として設定した場合の一例が示された。

表-3 地震動に起因する現象の整理

	要因	評価方法	本稿での評価結果 (1964年新潟地震)
①地盤変動	断層運動	断層モデル、または実測	本研究の提案する断層モデルでは対象地域での変位量は5cm未満。
	強震動や液状化現象	数値モデル、または実測値(水準点変位量、0m地帯の変化など)から断層運動分を除いて地盤変動後を算出	断層運動による変動量が微小なため、すべて液状化の影響による変動であると仮定した。
②初期水面	平常時水面	津波来襲当時の水位を推定(検潮記録から潮汐)	津波発生当時の記録より、T.P.0.35m。今回、図-4領域内のみ計算であるためこれを無視した。
	液状化による噴水	地質条件を考慮した解析、または実測	陸域での噴水後の浸水高さを、海水面を基準とした水位Zで与える。(※水の層厚(浸水深)ではない。)今回は、昭和石油(任意の領域)にZ=1.2mで与えた
③流出油量	強震動や液状化現象	各損傷タンクからの流出量と流出時間を考慮して算出する。流出時間の算定が難しい場合には、全流出量をタンク周りや防油堤内に与え、初期油層厚さを仮定する。	今回は、図-5(b)、(c)を参考にして初期油量を設定し、初期油層厚さを0.7mとして均一に与えた

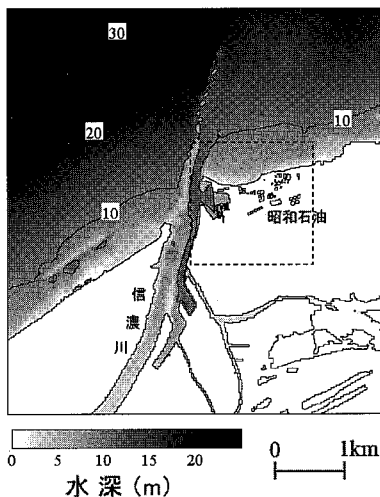
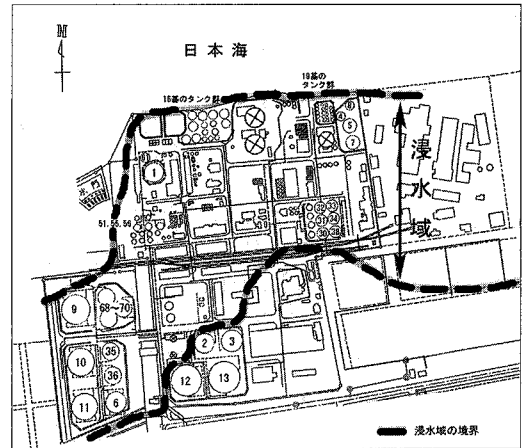
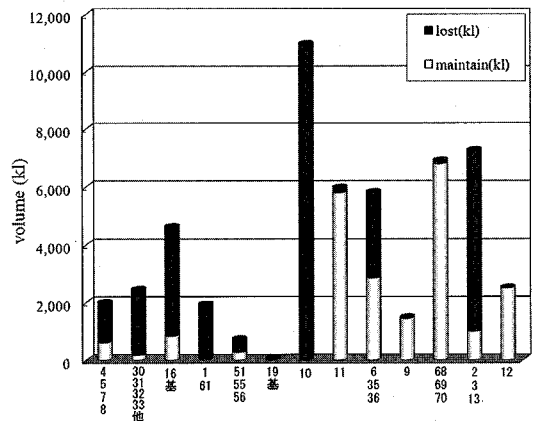


図-4 2層流モデルの計算領域と水深

(a) 臨海工業地帯の構造物群の様子
(昭和39年6月16日新潟地震直後14:00頃、撮影:弓納持氏)

(b) 昭和石油タンク群の配置と浸水域(消防庁, 1964)



横軸: 石油タンク (b)に対応)

(c) 昭和石油タンク群の地震・津波・火災による損失油量と被災後の残存油量 (kl)

図-5 臨海工業地帯の油流出被害

4. まとめ

本稿では、1964年新潟地震での地震動・津波被害の

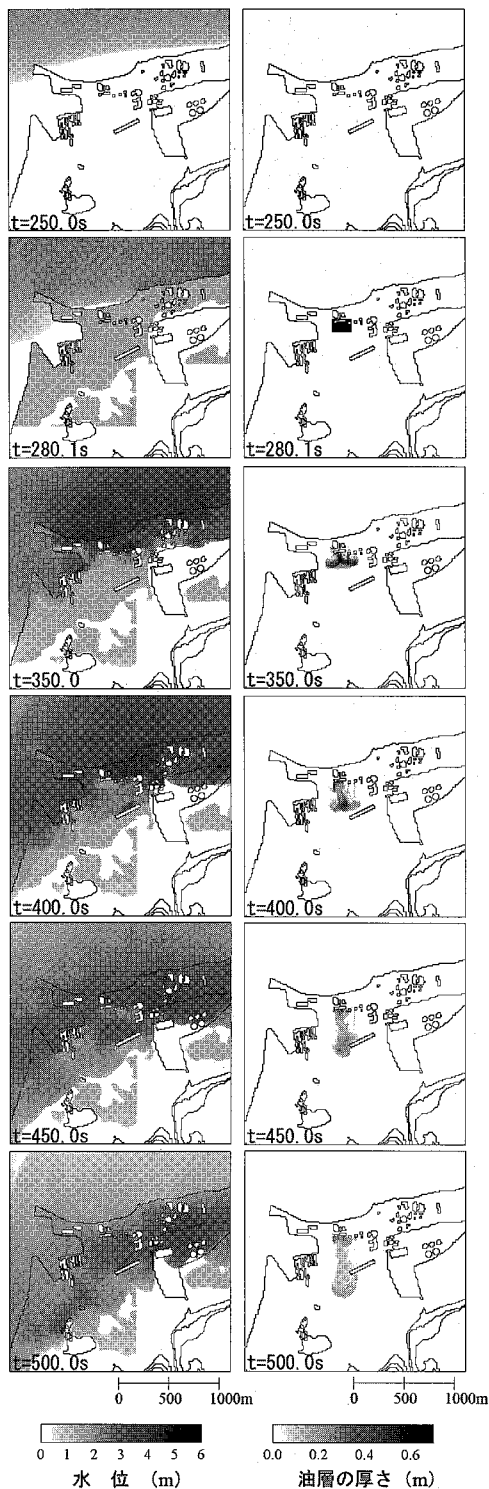


図-6 西港および昭和石油での油流出の解析結果

複合性を分析した上で、水・油の2層流モデルを用いて、津波氾濫流による油の移流を再現した。得られた結論を以下に列挙する。

- [1] 1964年新潟地震について、複数の文献から海底および陸地の地盤変位量の分布を平面的に捉えた結果、新潟市の信濃川周辺で地盤が陥没・沈下していることから、液状化の影響が大きいことが推測できた。浸水範囲から、津波の影響のない浸水域は液状化によって噴水したものと結論づけられる。
- [2] 1964年新潟地震での油の流出域に着目すると、津波来襲前に既に液状化によって浸水していたことがわかった。臨海工業地帯での津波被害の連鎖として、「液状化による沈下や浸水、地震動と不等沈下による油流出、津波氾濫流による油の運搬」が発生確率の高い被災シナリオと考え、この被災のプロセスを簡略的に考慮した条件で、津波氾濫流によって移流する油の数値実験をおこなった。水面上を浮遊する油層が、津波氾濫流によって一気に押し流される過程が再現でき、本モデルで解析可能であることが確認できた。事例に基づいた数値計算を行うことによって、臨海工業地帯での被災シナリオに沿った被害想定の一例を示すことができた。
- [3] 今後、津波氾濫流による被害が予測されるコンビナート地域に対して、当該地域の油火災や市街地への油流出といった2次的被害への対策を具体的に検討するために、それらのリスク評価を、数値解析を用いて追加的におこなうことを考えている。そのために、今回の解析手法の利用性を向上させるとともに、現在の施設・設備に適用していくための解析条件の設定についても検討する必要がある。

参考文献

- 岩渕洋子・今村文彦・越村俊一(2006a):1964年新潟地震津波にみる港湾域での複合災害の実態と今後の課題, 海岸工学講演会, 第53巻, pp.1326-1330.
- 岩渕洋子・越村俊一・今村文彦(2006b):津波の陸上遡上域における油・水輸送問題の数値実験, 海岸工学講演会, 第53巻, pp.1361-1365.
- 岩渕洋子・越村俊一・今村文彦(2007):津波・油2層流モデルと既往水理実験との比較検証, 平成19年度土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM.
- 国土地理院(1965):新潟地震地盤変動調査報告, pp.3-13.
- 消防庁(1964):新潟地震火災に関する研究, 224p.
- 土木研究所(1965):新潟地震調査報告, 土木研究所報告, 第125号, pp.35.
- 埜口英昭(1991):水面上に流出した油の拡がりに関する研究, 通商産業省中国工業技術試験所研究報告, 第9号, 109p.
- Mogi, A., B. Kawamura and Y. Iwabuchi(1964):Submarine Crustal Movement due to the Niigata Earthquake in 1964, in the Environs of the Awa Sima Island, Japan Sea, Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 10, pp.180-186.
- Mansinha, L., and D. E. Smylie(1971):The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 61, pp.1433-1440.