

臨海工業地帯沿岸での津波の挙動

島田富美男*・森 泰 宏**・酒井哲郎***

1. ま え が き

昨年 の 日本海中部地震津波は、当然のことではあるが、津波が三陸、東海沿岸だけではなく日本沿岸のどこでも発生することを示した。その東海、三陸沿岸では、津波の沿岸での変形計算手法はほぼ完成の段階に入り、現在は陸上での津波の挙動の計算法に研究の中心が移っている。

一方、日本の大規模な臨海工業地帯の存在する東京、伊勢、大阪湾では、津波のスケールと湾のスケールの関係から、津波はむしろ減衰すると言われている¹⁾。また現在では高潮防災対策のため護岸天端高も高くなって、津波の浸水の被害はあまり考えられないとされている。しかし、港湾の築造、埋立地の増加により湾の平面形状がかなり複雑になり、反射波の影響で局所的に津波高が大きくなったり、水路状となっている埋立地間の水域では流速が速くなるなど過去に発生した津波災害と災害形態が異なることが考えられ、防災対策上このような埋立地近辺での津波の挙動を明確にする必要がある。

この問題については、東京湾に関して最近検討がなされた²⁾。ここでは、特に大阪湾を例にとり、大阪湾沿岸で比較的津波資料の多い1946年の南海道地震津波を対象とし、この問題を明らかにする。なお、紀伊半島沖で過去に発生した地震の断層モデルの検討を目的とした、大阪湾を含んだ幅広い領域における摩擦項、非線型項を無視した簡単な線型の変形計算手法がすでにある^{3),4),5)}。しかし、大阪湾の水深がそれほど大きくないことを考え、ここではまず摩擦項、非線型項(移流項)をも考慮した大平洋、紀伊水道、大阪湾での津波の変形計算の数値モデルの開発を行ない、その後このモデルを用いて、上述の問題を検討する。

2. 計算手法

大阪湾での津波変形の数値モデルの開発に際して、大阪湾および紀伊水道における摩擦項、移流項の効果につ

いて前もって検討を加えた結果、水深が浅い紀伊水道および大阪湾では、津波変形の数値計算において摩擦項および移流項の影響は無視できないことが明らかになった⁶⁾。したがって、ここではこれら2つの項を考慮した基礎方程式を用いて、断層モデルより求めた海底変動量を与えて数値計算を行なう。

(1) 基礎方程式

計算に用いた基礎方程式は海底変動量 ξ の項を含んだ浅海波方程式であり、移流項および摩擦項を考慮した次式を差分方程式に変換して数値計算を行なった。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{Q_x}{D} \cdot \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{Q_y}{D} \cdot \frac{\partial Q_x}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \gamma b^2 \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{D^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{Q_x}{D} \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial x} + \frac{Q_y}{D} \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \gamma b^2 \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{D^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -\frac{\partial(\eta - \xi)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 Q_x 、 Q_y はそれぞれ x 、 y 方向の線流量、 x 、 y は水平の直交する2方向の座標、 g は重力加速度、 γb^2 は海底摩擦係数、 $D=h+\eta-\xi$ であり、 h は静水深、 η は静水面からの水位上昇量を示す。

(2) 計算領域および境界条件

計算領域は図—1に示すように大平洋、紀伊水道、大阪湾の3領域に分割し、格子幅を領域Ⅰでは5 km、領域Ⅱでは2.5 km、領域Ⅲでは1.25 kmと順次小さくし、海岸形状の格子による近似の精度をよくした。しかし、現在大阪湾奥では埋立化が進み、湾の平面形状がかなり複雑になっており、格子幅1.25 kmでは海岸形状をうまく表わすことができない。そこで、とくに現在の大阪湾奥での埋立地間の水域の津波特性を検討する計算では、大阪湾奥東部のみを格子幅625 mとさらに小さい格子で分割して数値計算を行なった。

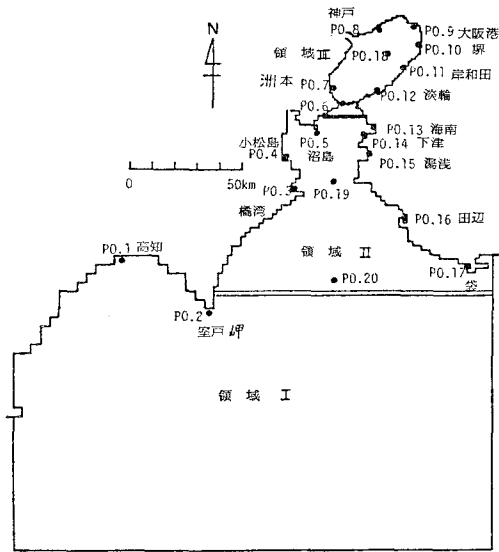
計算時間間隔は、差分の安定性を考慮して、格子幅を1.25 kmまで小さくする場合には25秒、さらに格子幅を625 mと小さくする場合には10秒とした。

境界条件としては、陸地と海の境界では津波は完全反

* 正 会 員 工 修 阿南工業高等専門学校講師

** 学生会員 京都大学 工学部土木工学教室

*** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学部土木工学教室



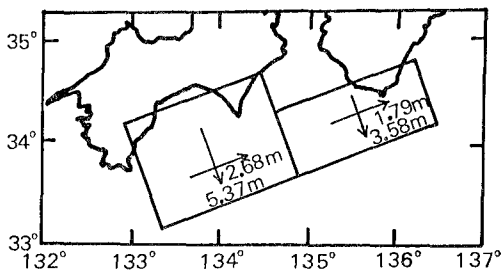
図一 計算領域

射するとし、境界面に垂直な線流量を0と仮定した。明石海峡と鳴門海峡では、反射率を0として、谷本ら⁷⁾の任意反射率境界の条件を用いた。また、計算領域の沖側の外海との接続部の境界では $Q_x^2 + Q_y^2 = gD\eta^2$ の関係を用いて線流量を決定した。2領域間の接続方法は、広領域に狭領域の1格子分を重ね合わせて、内挿により接続部分の線流量 Q_x , Q_y および水位上昇量 η を与えた。

海底摩擦係数に関しては、ここでは $\gamma b^2 = 0.0025$ を用いた。

(3) 初期条件

加期条件として海面が静止している状態を仮定し、そこから地震による海底変動が生じるとした。海底変動量と同じ量だけ水面が変動することにより津波が発生すると仮定して数値計算を行なった。すなわち、断層モデルが決定されると Mansinha・Smylie の方法⁸⁾ で最終的な海底面の鉛直変位が求まり、その変位がある一定時間で線形的に増加して変動が完了すると仮定して計算を行なった。

図二 断層モデル⁸⁾

使用した断層モデルは 図一2 に示した 1975 年に安藤が提案した断層モデル⁸⁾ である。この断層モデルは2つの断層からなり、東側の断層は、長さ 150 km, 幅 70 km, dip angle 25°, 断層のくい違い量 4 m, 西側の断層は長さ 150 km, 幅 100 km, dip angle 20°, 断層のくい違い 6 m の逆断層である。なお、1975 年の安藤の提案した断層モデルの他に、相田による断層モデル⁴⁾, 1982 年の安藤による修正断層モデル⁵⁾ などがあるが、大阪湾および紀伊水道に限定すれば、どの断層モデルを使用しても津波特性の変化はほとんどみられなかった。

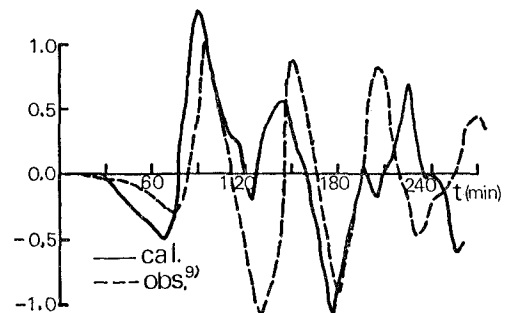
3. 南海道地震津波の再現

図一1 に示した領域 II と領域 III の比較的水深が浅い紀伊水道および大阪湾では、摩擦項と移流項を考慮し、水深の深い領域 I ではそれらの影響はほとんどないので無視して、前述した方法で数値計算を行なった。また、海底変動の継続時間については、継続時間を種々変化させて数値計算を行なった結果、継続時間が5分以内であれば継続時間の変化による影響はほとんどないことが明らかになった。したがって、一般に地震の破壊速度が約 3 km/s と非常に速いことも考慮し、継続時間は1分として数値計算を行なった。計算は地震発生後5時間までとし、図一1 に示す PO.1 から PO.20 の各地点における水位、流速の時間的変化および計算時間内の各格子における最大流速、最大水位を出力した。なお、計算に使用した水深のデータは海上保安庁水路部発行の海図より読み取った。

なお、この節の計算結果は最小メッシュ間隔が 1.25 km の場合のものである。

(1) 堺での水位変化

図一3 は、1946 年の南海道地震津波の潮位記録のある堺での実測値と計算値を示したものである。実線は数値計算結果、破線は検潮記録⁹⁾ から天文潮位成分を取り除いた津波による水位変化を表わしている。図より、計算値と実測値の間には若干の違いがあるが、断層モデルにより海底変動を与えた数値計算モデルより、津波をかな



図三 水位変化 (1946 年南海道地震津波, 堺) の再現

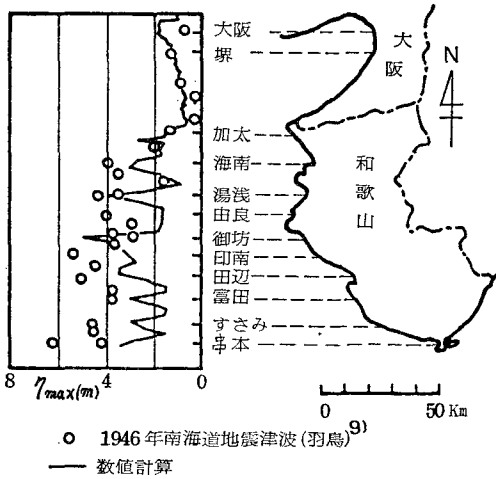


図-4 大阪湾および紀伊水道の東岸沿いの最大水位分布の再現

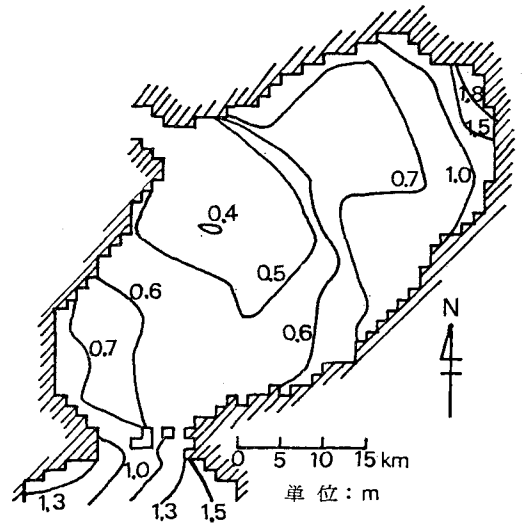


図-5 大阪湾内の最大水位の分布

りの精度で再現できると思われる。

(2) 大阪湾および紀伊水道の東岸沿いの最大水位

図-4 は、大阪湾および紀伊水道の東岸沿いの静水面からの最大水位 $\eta_{\max}$ を示したものであり、実線が数値計算結果、○印が羽島⁹⁾による1946年の南海道地震津波の調査結果を示す。図より、大阪湾付近は比較的计算結果と調査結果が一致しているが、紀伊水道および外海に近い串本付近では計算結果が調査結果よりかなり小さくなっている。これは紀伊水道では格子幅が2.5 kmと大きくなっており、海岸線をうまく格子で近似できていないためであると思われる。

(3) 大阪湾内の最大水位の分布

図-5 は、津波発生から5時間内における大阪湾内の各点における最大水位 $\eta_{\max}$ の分布を等高線で表わしたものである。図より、友ヶ島水道で $\eta_{\max}$ が1 m程度、湾奥で1.8 mとなり、湾の中央部に近づくにつれ $\eta_{\max}$ が小さくなり、湾の中央部で最小0.4 mとなることがわかる。また、大阪湾の東岸沿いと西岸沿いの $\eta_{\max}$ を比較すると、西岸より東岸沿いの $\eta_{\max}$ の方が大きくなっていることがわかる。

(4) 大阪湾内の最大流速の分布

図-6 は、大阪湾内の最大流速の数値計算結果を示している。図より、友ヶ島水道および湾奥で最大流速が大きくなり、また海岸線近くで最大流速が大きくなることがわかる。

4. 埋立地近辺での津波の挙動

大阪湾奥の埋立地の増加による海岸線の複雑な平面形状を、格子幅625 mの格子で詳細に表現した場合について、同様の計算を行なった。その結果と、3.で述べ

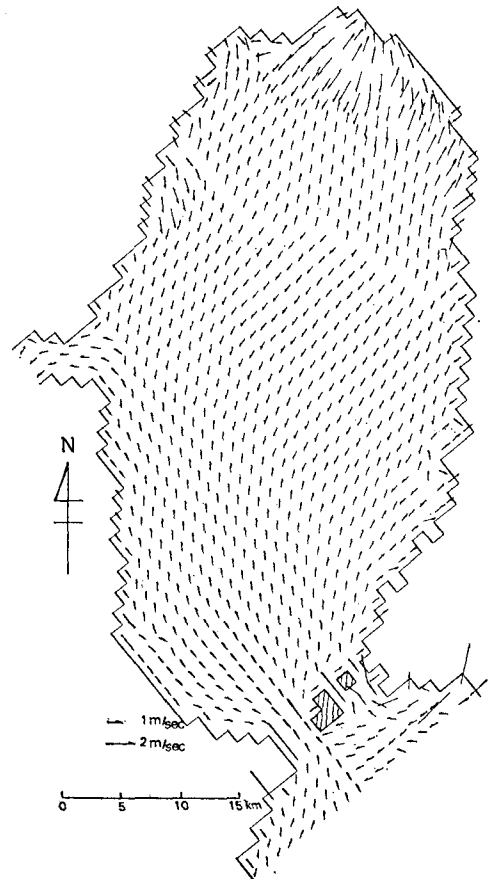


図-6 大阪湾内の最大流速の分布

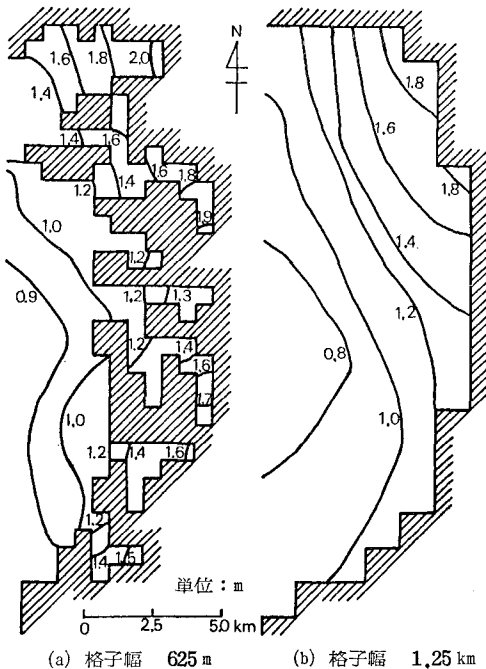


図-7 大阪湾奥東部の埋立地近辺の最大水位の分布

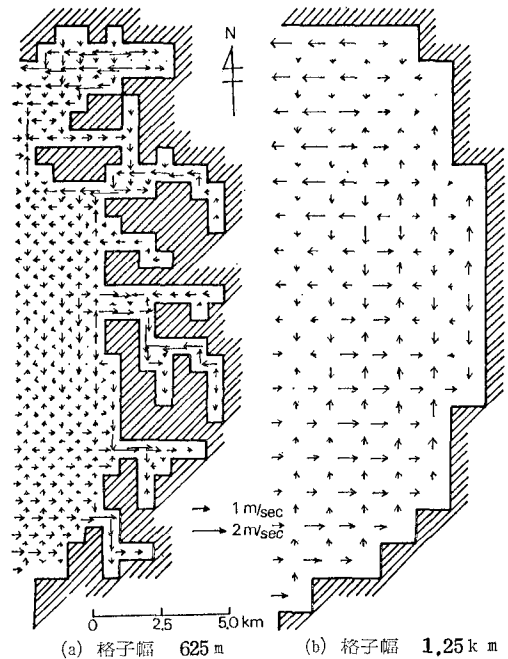


図-8 大阪湾奥東部の埋立地近辺の最大流速の分布

た、1.25 km の格子で大阪湾沿岸の平面形状を滑らかに表現した場合の比較を行ない、埋立地近辺の水域における津波の変形特性について考察を行なった。

(1) 最大水位の分布

図-7 は、大阪湾奥の海岸線を現況に合わせて格子幅 625 m で海岸線の平面形状を表現した場合と、格子幅 1.25 km で滑らかに表現した場合の津波高分布を比較している。図の (b) より、海岸線が滑らかな場合は、湾奥に近づくにつれて津波高が増加し、湾奥で最大 1.8 m の津波高になっている。一方、図の (a) を見ると、現在の海岸線を表現した場合の大阪湾奥における津波高が若干大きくなっている。海岸線が滑らかな場合には湾奥でのみ津波高が大きくなるが、図の (a) の現在の複雑な海岸線を表現した場合には埋立地間の水路状となっている水域でもかなり津波高が大きくなり、最大で 2.0 m となっていることがわかる。

(2) 最大流速の分布

図-8 は、図-7 と同様に大阪湾奥東部を現況に合わせてした場合と滑らかな場合の最大流速分布を比較している。図の (b) より、海岸線が滑らかな場合には海岸線から少し離れた地点で最大流速が大きくなっており、最大流速の分布は滑らかに変化していることがわかる。しかしながら、図の (a) より、海岸線が複雑になると、埋立地間の水路状となっている水域ではかなり流速が大きくなっており、形状により局所的に最大流速が大

きくなることが明らかになった。

5. あとがき

本研究は、近年埋立化の進んでいる臨海工業地帯沿岸での津波の挙動を明確にするため、大阪湾沿岸を例にとって検討した。最初に紀伊水道、大阪湾を伝播する津波に関する数値計算としては、これまで摩擦項および非線型項を考慮したモデルがなかったので、紀伊半島沖の断層モデルを使用した津波の変形計算モデルを開発した。つぎに大阪湾沿岸の複雑な埋立地間の水路における津波の変形特性について考察し、以下のようなことを明らかにした。

1) 1946 年の南海道地震の断層モデル³⁾による海底変動を与えて、移流項、摩擦項を含めた数値計算を行なった。大阪湾沿岸および紀伊水道沿岸での津波記録と比較することにより、断層モデルを使用すると津波がうまく再現できることがわかり、大阪湾における津波特性がかなり明確になった。

2) 埋立が進み、湾の平面形状がかなり複雑になっている現在の大阪湾奥の地形形状による津波特性を明確にするため、格子幅を 625 m と小さくして数値計算を行なった結果、埋立地間の水路状となっている水域では流速が大きくなり、また局所的に津波高が大きくなる場合があり、津波防災対策上注意が必要であることがわかった。

以上、1946年の南海道地震津波について考察を行なったが、この津波よりもさらに大きな津波高を与えたとされている歴史津波として、1707年の宝永津波、1854年の安政津波等があり、今後さらに詳細に大阪湾沿岸での津波特性を明確にする必要がある。

また、埋立地によって形成される水域の固有周期と入射津波の周期によって、そこでの局所的な津波の挙動も変わることが考えられる。上述の歴史津波に関する検討とともに、その周期との関係を明らかにする必要がある。

最後にこの研究は、筆頭著者が文部省内地研究員として京都大学に滞在した期間に行なったものであり、その実現を図っていただいた京都大学工学部岩垣雄一教授および徳島大学工業短期大学部村上仁士教授に謝意を表するとともに、有益な助言を頂いた京都大学防災研究所土屋義人教授に謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(1)(代表者京都大学工学部酒井哲郎助教授)の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 和達清夫編：津波・高潮・海洋災害，共立出版，1970.
- 2) 高山知司・永井紀彦・平石哲也：東京湾の津波計算，港湾技研資料，No. 454，運輸省港湾技術研究所，1983.
- 3) Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan, *Tectonophysics*, pp. 119~140, 1975.
- 4) 相田 勇：南海道沖の津波の数値計算，地震研究所彙報，Vol. 56，東京大学，pp. 713~730, 1981.
- 5) Ando, M.: A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data, *phys. of the Earth Planetary Interior*, pp. 320~336, 1982.
- 6) 島田富美男・森 泰宏・酒井哲郎：大阪湾における津波変形の数値計算モデルの開発，第38回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 351~352, 1984.
- 7) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，運輸省，第14巻，第3号，pp. 35~58, 1975.
- 8) Mansinha, L. and D. E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, pp. 1433~1440, 1971.
- 9) 羽鳥徳太郎：大阪府・和歌山県沿岸における宝永・安政南海道津波の調査，地震研究所彙報，Vol. 55，東京大学，pp. 505~535, 1980.