

大阪における安政南海道津波の復元(2)

——津波の伝播・氾濫特性について——

土屋 義人・河田 恵昭
酒井 哲郎・島田富美男

RECREATION OF THE ANSEI NANKAIDO TSUNAMI IN OSAKA (2)

——PROPAGATION OF THE TSUNAMI AND ITS FLOODING——

By *Yoshito TSUCHIYA, Yoshiaki KAWATA,*
Tetsurou SAKAI and Fumio SHIMADA

Synopsis

The main objective of this study is to recreate a flood disaster in Osaka due to the Ansei Nankaido tsunami on December 24, 1854. In the previous paper, the inundation heights of the tsunami were estimated to be about 1.9 m through the analysis based on various data of the disaster. Through numerical simulation, the spatial distribution of the tsunami height around the Kii strait is in fairly good agreement with the data of inundation heights. At Tenpozan in Osaka, the tsunami height was 1.89 m, therefore, close agreement between calculated and observed values was obtained. Moreover, the estimated flooded area also agreed with that drawn in Osaka Otsurozu which is an old illustration of the flood. The velocity and depth of the flooding are enough large to make about one thousand people drown and a lot of ships overturned. Synthesized results showed that the tsunami disaster can well be recreated with numerical simulation of the tsunami and data analysis of the old illustration and documents of the tsunami disasters.

1. 緒 言

すでに著者らは、本論文の第1報¹⁾において、史料に基づく解析から、安政南海道津波（以下、安政津波と呼ぶ）の復元を試みた。そこでは、安政津波による災害状況を古文書、古絵図により把握し、天保山の地盤沈下量を検討して、津波の高さを約1.9 mと推定し、またそれに基づいて大阪の市街地の氾濫復元図を作成し、『大坂大津浪図』と比較検討して両者がよく一致することを示した。これらの解析では、あくまでも天保山における津波の高さに等しい地盤まで浸水すると仮定して行ったものであって、もとより津波の動的な特性を考慮したものではない。

そこで、ここでは、津波の伝播・氾濫の数値計算を行い、その結果から安政津波の高さが天保山で1.9 mになるのかどうか、ついで大阪市街地への氾濫の結果、浸水域が『大坂大津浪図』のそれと一致するかどうかを明らかにして、安政津波による災害の復元を行うものである。

すなわち、第2章では津波の伝播の基礎式の妥当性を明らかにするために、1946年の南海道津波の追算を行い、堺や下津の検潮記録と比較検討する。ついで、第3章では、安政津波の伝播計算を行って、その

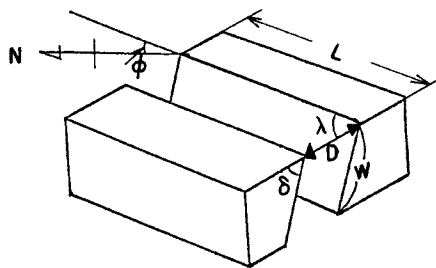
結果と紀伊水道, 土佐湾, 大阪湾沿岸各地の津波の痕跡高との比較あるいは大阪の天保山付近の津波の高さの妥当性を見出す。さらに, 第4章では, 大阪市街地における津波の氾濫計算を行い, 『大坂大津浪図』との比較から被害や氾濫特性との整合性を見出す。

2. 津波モデルとその検証

2.1 津波モデル

津波は, 主に地震による海底変動に伴い海水が昇降し, 波長の長い波として伝播するものである。津波発生の原因となる地震は, 地殻内で1つの面を境にして岩盤の相対的なずれが短時間のうちに起こるものであると考えられている。このずれが断層であり, 断層はときに数10 km, 数100 kmという長大なものであり, 地形・地質学的に測定されるずれの量も数kmから数10 kmにおよぶものもある。

この断層運動を, Fig. 1 に示すように6つの断層パラメータすなわち断層の走向 ϕ , dip angle (断層の傾斜角) δ , すべりの方向と断層の走向方向とのなす角 λ , 断層の長さ L , 断層の幅 W , すべりの大きさ D で規定する。



断層モデルの各種の断層パラメータが決定すると, 断層運動による地殻変動はくい違いの弾性論により, Mansinha-Smylie²⁾の方法などで求まる。

断層モデルによる地盤変動の幅は水深に比較してはるかに大きく, 初期条件として海底の鉛直方向の地盤変動量と等量だけ海面が変化すると仮定して, 津波の発生・伝播のシミュレーションを行うことができる。

Fig. 1. Definition of fault parameters.

紀伊半島沖で発生し, 大阪湾に侵入した津波モデルとしては, 安藤^{3), 4)}および相田⁵⁾による, 地震の断層モデルの検討を目的とした, 摩擦項, 移流項 (非線形項) を無視した数値シミュレーションがある。また関西国際空港株式会社⁶⁾が, 空港設置による津波の影響を検討するため, 摩擦項のみを考慮して数値シミュレーションを行っている。

2.2 津波伝播の数値計算法

大阪湾での津波伝播の数値計算では, 大阪湾の水深がそれほど大きくないので移流項 (非線形項), 摩擦項の影響が問題となる。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, 水位の初期条件として断層モデルより求めた海底変動量を与えた場合の数値計算法を示す。

(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う。ここでは, 移流項は高潮の数値計算と同様の形を用いており, 津波では $\partial/\partial x (M^2/D)$, $\partial/\partial x (M \cdot N/D)$ のような形が用いられるが⁷⁾, 大差はない。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{D} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{D} \frac{\partial M}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{D} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{D} \frac{\partial N}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -\frac{\partial(\eta - \xi)}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, M , N 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 は重力の加速度, γ_b^2 は海底摩擦係数, $D = h + \eta - \xi$ であり, h は静水深および 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 Fig. 2 に示すように太平洋, 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。

計算時間間隔は, 差分の安定性を考慮して 10 sec とした。

境界条件としては, 陸地との境界では, 津波は完全反射するとし, 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, 谷本ら⁹⁾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, $M+N=gD\eta^2$ 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, 内挿により接続部分の線流量 M , N および水位上昇量 η を与えた。

(3) 初期条件

初期条件として海面が静止している状態から, 地震による海底変動量と同じ量だけ水面が変動し, 津波が発生すると仮定して数値計算を行った。すなわち, 断層モデルが決定されると Mansinha-Smylie²⁾の方法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った。

ここでは津波モデルの検証を目的としており, 実測値のある 1946 年の南海道地震津波を対象とする。

使用した断層モデルは Fig. 3 に示した 1975 年に安藤が提案した断層モデル³⁾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°, 断層のくい違い量 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⁵⁾, 1982 年の安藤による修正断層モデル⁴⁾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。

2.3 移流項および摩擦項の効果

(1) 海底摩擦係数の影響

高潮の数値計算では, 海底摩擦係数を 2.6×10^{-3} とし計算を行っている例⁹⁾があるが, 津波の場合については海底摩擦係数 f の取り扱いについては明確に決まっておらず, 妥当な値を求める必要がある。

開水路流れおよび管路流れのデータを参考にすると, 摩擦係数は 8×10^{-3} より小さくなる。すなわち, 開水路流れの場合, 摩擦係数 f は $2gn^2/R^{1/3}$ と表され, 水理公式集の表 2.2¹⁰⁾ より, 自然水路のうち整正断面水路では n の標準値が 0.03 となり, 径深 $R=h=50$ m として, $f=2 \times 9.8 \times 0.03^2 / 50^{1/3} = 4.8 \times 10^{-3}$ となる。また管路流れでは, レイノルズ数 $R_e=vD/\nu$ が動粘性係数 $\nu=0.01$ cm²/s, $v=1$ m/s, $D=h=50$ m として, $R_e=1 \times 10^2 \times 50 \times 10^2 / 0.01 = 5 \times 10^7$ となるので, 水理公式集の図 3.2 より $f < 0.008$ となる。

高潮の摩擦係数をも参考にして, 津波の計算における摩擦係数の影響を明確にするため, 摩擦係数 f の値を 0, 2×10^{-3} , 4×10^{-3} , 6×10^{-3} , 8×10^{-3} と変化させて数値計算を行った。なお, この計算では移流項も含めて計算しており, また領域 I では水深がかなり深いためか, 摩擦項および移流項を考慮する, しないにかかわらず計算結果に変化がみられなかったため, 以下の計算では領域 I における摩擦項

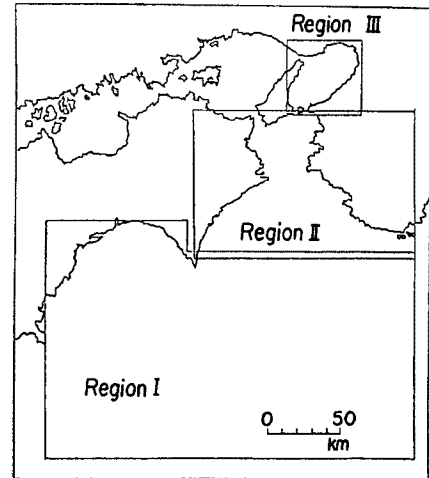


Fig. 2. Computation region and grid spacing.

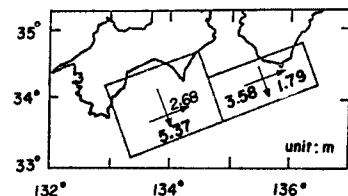


Fig. 3. Fault model of the 1946 Nankaido earthquake proposed by Ando³⁾.

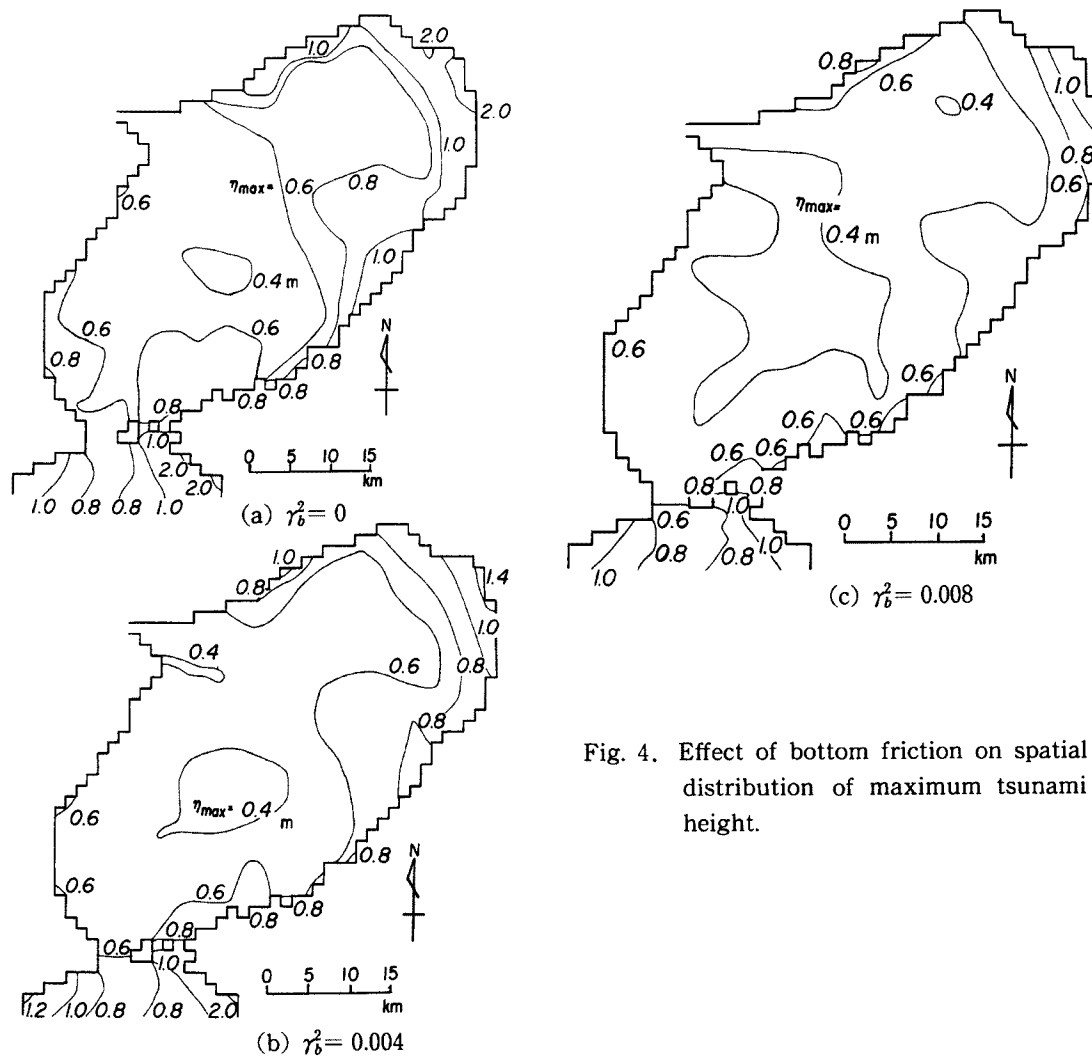


Fig. 4. Effect of bottom friction on spatial distribution of maximum tsunami height.

および移流項は無視して計算を行った。

Fig. 4 に計算結果の 1 例として、大阪湾内の津波高（静水面からの最大水位上昇量）分布を示している。図より、摩擦係数が小さくなるにしたがって津波高が大きくなるのがわかる。とくに、大阪湾奥付

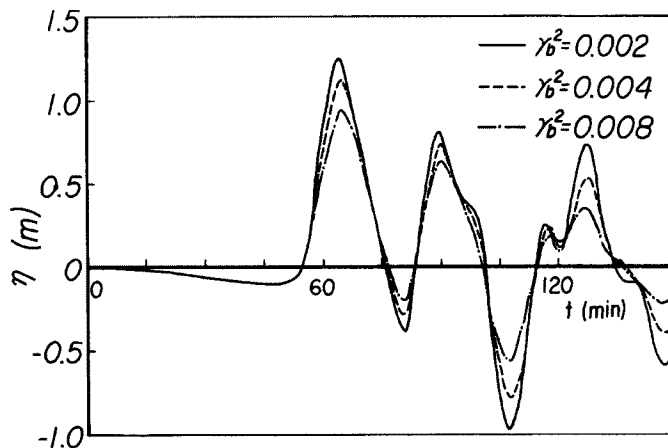


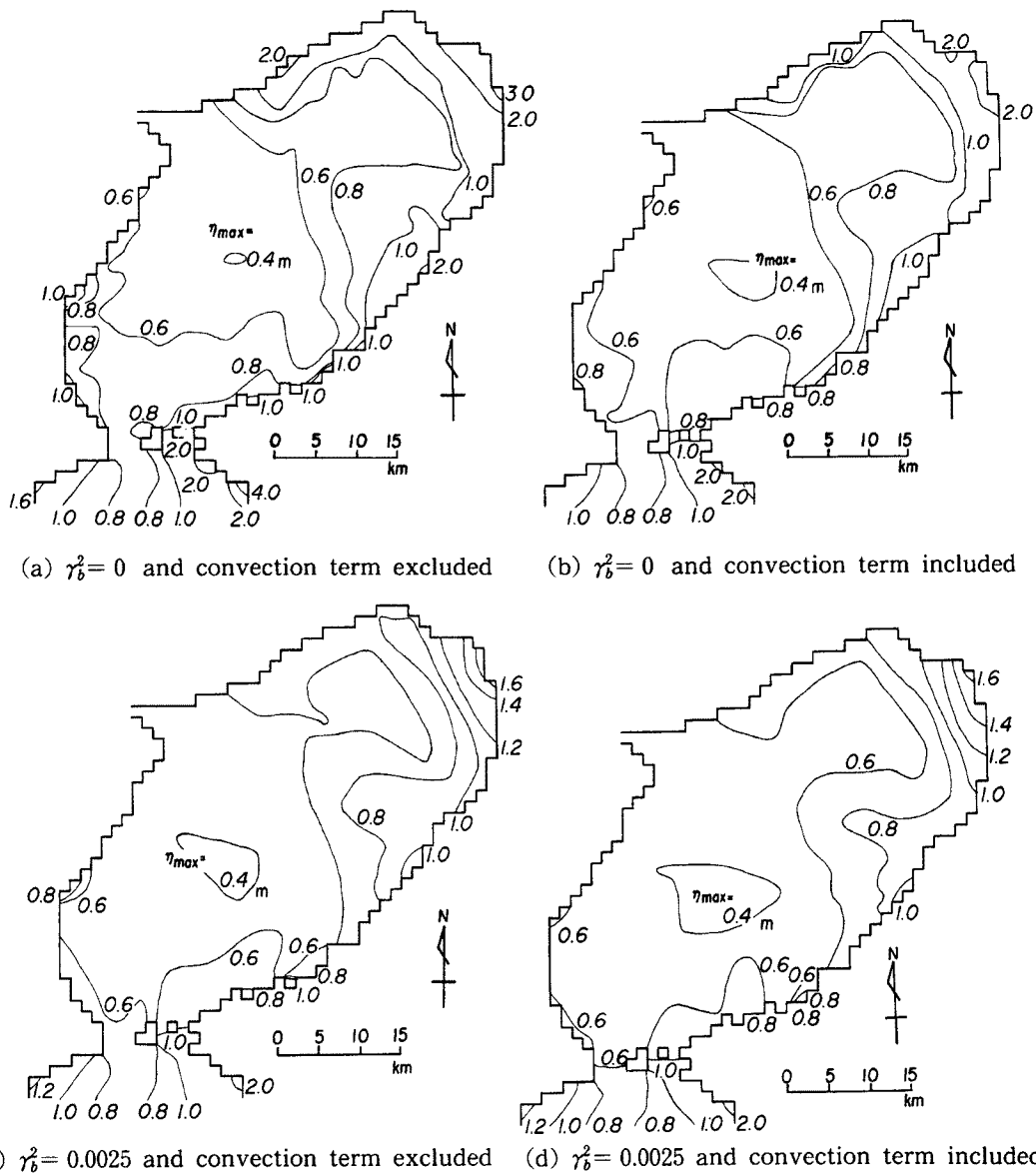
Fig. 5. Effect of bottom friction of wave profiles.

近では摩擦係数が小さくなると津波高がかなり大きくなり、摩擦係数を考慮しなければ2 m以上にもなる。また、Fig. 5は大阪湾奥近くの堺付近の水位の時間的变化を表したものであり、同様に摩擦係数により水位がかなり変化する。したがって、海岸線近くの水深が浅くなったところでは、摩擦項を考慮して計算を行わなければならないことが分かる。

(2) 移流項の効果

Fig. 6は、津波の数値シミュレーションにおける移流項の効果を検討するため、摩擦係数を無視した場合と摩擦係数を0.0025とした場合のそれぞれについて、移流項を考慮した場合と無視した場合の数値計算結果を示している。

図の(a), (b)より、摩擦項を考慮しなければ移流項の有無によって津波高がかなり変化し、移流項を考慮しなければ、湾奥付近では津波高が3 m以上になり、友ヶ島付近では津波高が大きくなる。図の



(a) $\gamma_b^2 = 0$ and convection term excluded (b) $\gamma_b^2 = 0$ and convection term included

(c) $\gamma_b^2 = 0.0025$ and convection term excluded (d) $\gamma_b^2 = 0.0025$ and convection term included

Fig. 6. Effect of convection term on spatial distribution of maximum tsunami height.

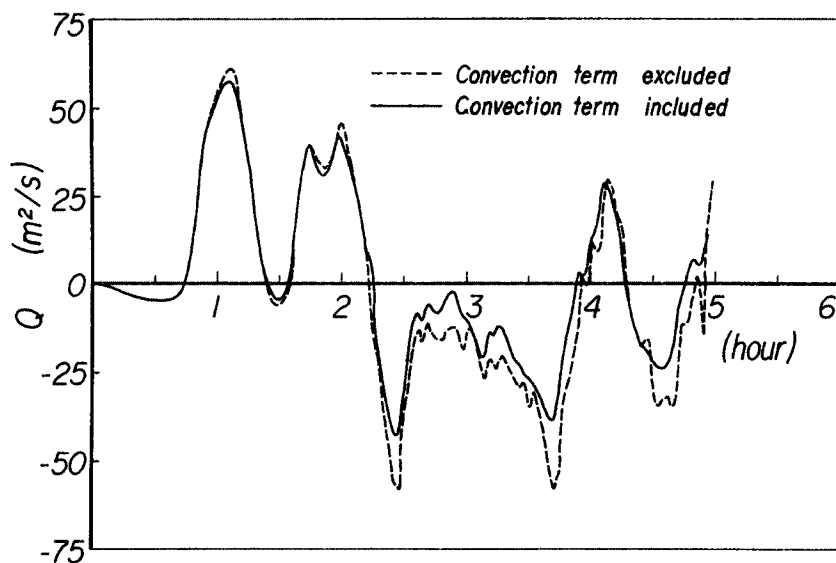


Fig. 7. Effect of convection term on wave profiles.

(c), (d) の摩擦項を考慮した場合には、移流項の有無による津波高の変化は、摩擦項を考慮した場合より少なくなっており、湾奥付近では津波高が 1.6 m とほぼ等しい。しかし、友ヶ島水道付近では、移流項を無視すれば津波高が少し大きくなっている。すなわち、移流項の効果が一番強いところは、摩擦項の有無にかかわらず、断面が狭くなっている友ヶ島水道付近であると思われる。

Fig. 7 は、摩擦項を無視した場合の友ヶ島水道の線流量の時間変化の 1 例であり、移流項を無視すると、若干線流量の出入りの差が大きくなる。

以上、移流項の効果について検討を加えたが、友ヶ島水道および湾奥付近では移流項の効果が大きく、移流項は無視できないと思われる。

2.4 格子網の大きさと友ヶ島水道の取り扱い

格子網の大きさの違いによる津波高の影響を検討するため、大阪湾奥付近で格子網の幅を 625 m と小さくして数値計算を行った。その結果、格子幅を小さくしてもほとんど津波高に変化がないことが明らかになった。これは、大阪湾奥で格子幅を小さくしても水深の変化がほとんどなく、水深変化に伴う津波高変化がないためであると思われる。また、格子幅を小さくしたことによる、湾の形状の変化も少ないためと推定される。

友ヶ島水道の取り扱いについては、友ヶ島水道の形状を十分ではないが格子幅 1.25 km で近似を行い、Fig. 8 のように、友ヶ島水道を格子幅 1.25 km では最適と思われる 6 格子および 5, 4, 3 格子で表した場合の数値計算を行った。

図より、当然ながら、友ヶ島水道が狭くなると津波高は若干小さくなっている。また、ここでは示していないが、堺での水位の時間的な変化も友ヶ島水道の幅が狭くなると少し津波高が小さくなるが、波形についてはほとんど変化がない。

最後に、友ヶ島水道を表現する格子数の相違による友ヶ島水道通過流量の変化を、Fig. 9 に示す。3 格子から 5 格子まではかなり重なって区別が困難であったため、代表として 3 格子のものを示した。6 格子で表現した場合に、流量の振幅が若干大きくなっていることがわかる。

2.5 南海道地震津波資料との比較

前節までの検討から、基礎式に移流項、摩擦項を含み、摩擦係数 γ_b^2 として 0.0025 を用い、格子幅は

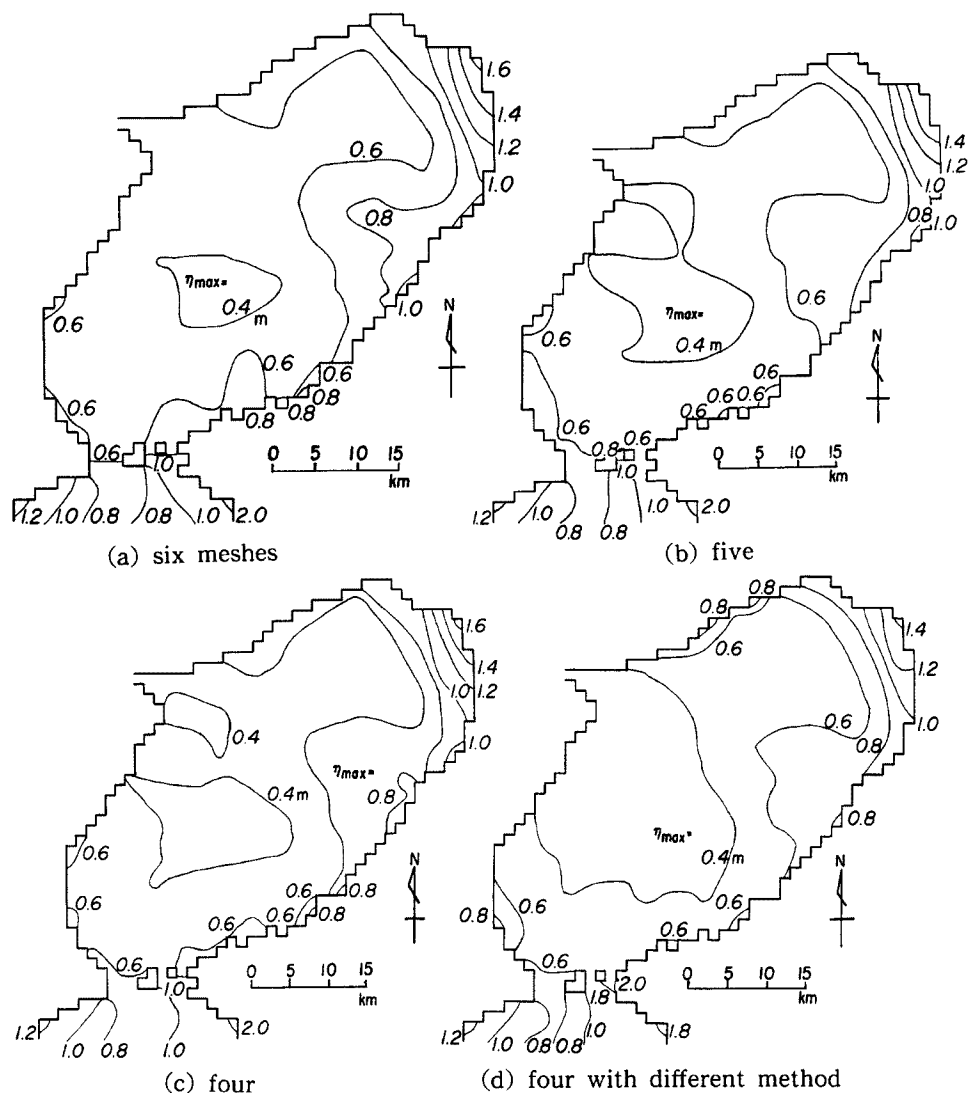


Fig. 8. Effect of difference of grid presentation (the number of meshes) of the Tomogashima channel.

1,250 mとし、友ヶ島水道を Fig. 8 (b) のように表現して、1946年の南海道地震津波を再現した。

Fig. 10 は、関西国際空港^(株)(以後関空と略)の報告書⁹⁾の Fig. 8 に示された、同津波の四国、淡路島、大阪湾および紀伊半島の沿岸沿いの津波の痕跡高の分布と、関空の計算値の比較の図に、さらにこの調査での計算値および相田⁹⁾の計算値を示したものである。なお相田の計算値は、その論文の Fig. 10 の H_0 をそのままプロットしている。相田の計算では、格子網の幅は場所によっては 312.5 m まで小さくしたとしか記述がない。一方、関空の計算では、1,250 m までで、本研究と同じである。図を見てわかるように、相田の計算値は沖合 200 m での値ではあるが、全体に痕跡値よりかなり小さい。この調査の結果は、紀伊半島先端部を除いて、関空の結果とともにほぼ痕跡値を説明している。

関空報告書によれば、この痕跡値は文献¹¹⁾から引用されたものであるが、場所によっては局所的な地形の影響を受けて、ここでの数値計算の値と比較するには適当でないものもあると予想される。とくに大阪の痕跡値は 0.5 m 程度であるのに対して、この調査の計算値は 1.5 m 程度になっており、かなり大きい。その理由の1つとして、大阪の痕跡値は、大阪港の防波堤の効果による減衰の効果が入っていることが考

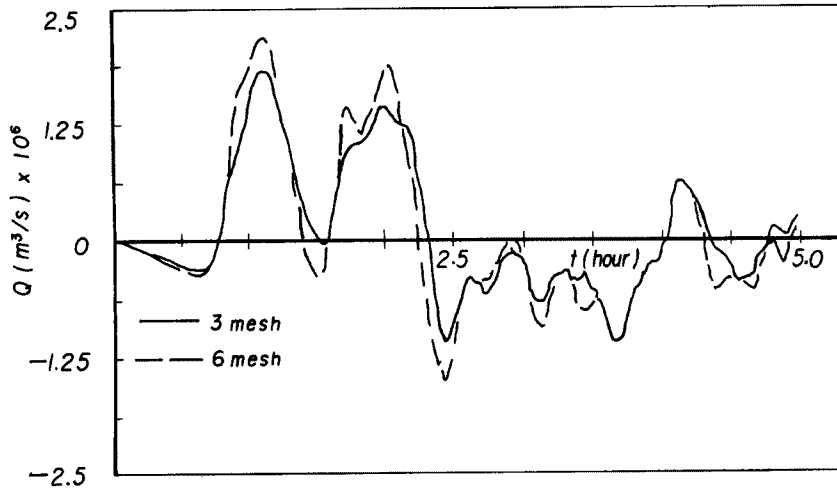


Fig. 9. Effect of difference of grid presentation of the Tomogashima channel on discharge through the channel.

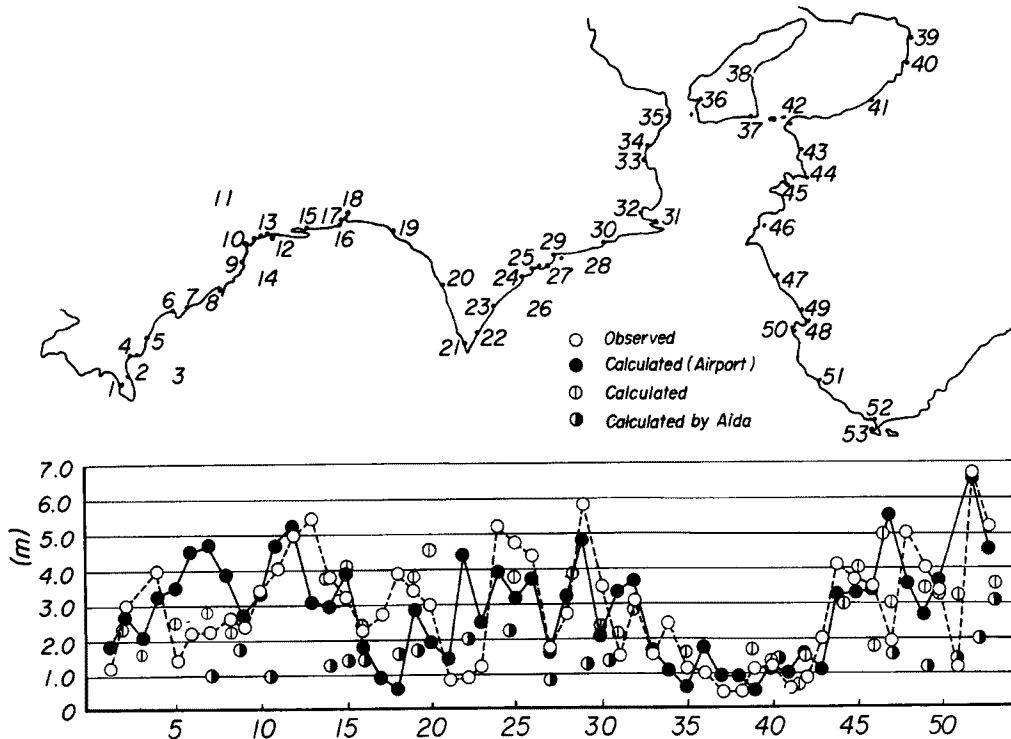


Fig. 10. Comparison of surveyed and computed values of tsunami height of the 1946 Nankaido earthquake tsunami.

えられる。

つきに、検潮記録がある下津と大阪湾内の堺の2ヶ所で、計算による津波の水位の時間変化を検潮記録と比較する。

Fig. 11 は、下津における検潮記録¹²⁾から天文潮位の分を差し引いた津波による水位変動を、本研究の計算結果と比較したものである。計算結果の引き潮の部分の値が実測値よりかなり低くなっているが、全体の傾向は一致している。Fig. 12 は、堺¹²⁾の同様の比較である。この場合は最初の引き潮の最低水位の

計算値が、実測のそれよりもかなり高い。この点を除けば、全体の傾向は一致している。

3. 安政南海道地震津波の追算

3.1 計算条件

2章で述べたように、南海道沖で発生し紀伊水道を通過して大阪湾に侵入する津波の伝播の数値計算モデルとして、2章で示した数値モデルの妥当性が明らかにされたので、ここではこの数値モデルを用いて、1854年安政南海道地震津波の追算を行う。

計算条件は、断層モデルを除いて2章の条件と同じである。なお水深は昭和21年の場合と異なることが考えられるが、1,250 mの格子間隔では、入手した明治時代の大阪湾の海図の水深を用いても有為な差が見られず、1946年の津波の計算の場合の水深と同一のものを用いた。断層モデルとしては、すでに1854年の津波の計算を行っている相田⁹⁾のモデル²⁰⁾を用いる。

Table 1は、相田⁹⁾、関西国際空港⁶⁾(株)（以後、本論文では関空と略する）およびこの研究での計算条件の比較を示している。断層モデルを与えて海底変動量を計算する式としては、いずれもManshinhaら²⁾のものを用いている。

運動方程式の中の移流項（非線形項）および摩擦項の扱いに関しては、相田は両者とも無視、関空は摩擦項のみ考慮、本研究では両者とも考慮している。関空では摩擦項の係数としてマンシングの粗度係数0.026を、本研究では摩擦係数として0.0025を用いている。

格子間隔は、Fig. 2に示したように、い

ずれも最も外海の領域では5 kmとし、陸地に近づくにつれてその半分の2.5 km、さらにその半分の1.25 kmと小さくしている。最小格子間隔として、相田の場合では312.5 m、関空では625 mとしている。これは2.4で述べたように、現在の埋立地が出来る以前の場合には、格子間隔を625 mとしても計算結果に有為な差がないからである。なお、この研究では土佐湾の一部に関しても1.25 kmの格子を用いている。海岸

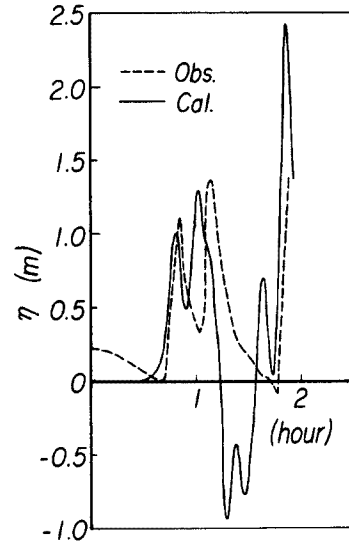


Fig. 11. Comparison of surveyed and computed water level of the 1946 Nankaido earthquake tsunami in Shimotsu.

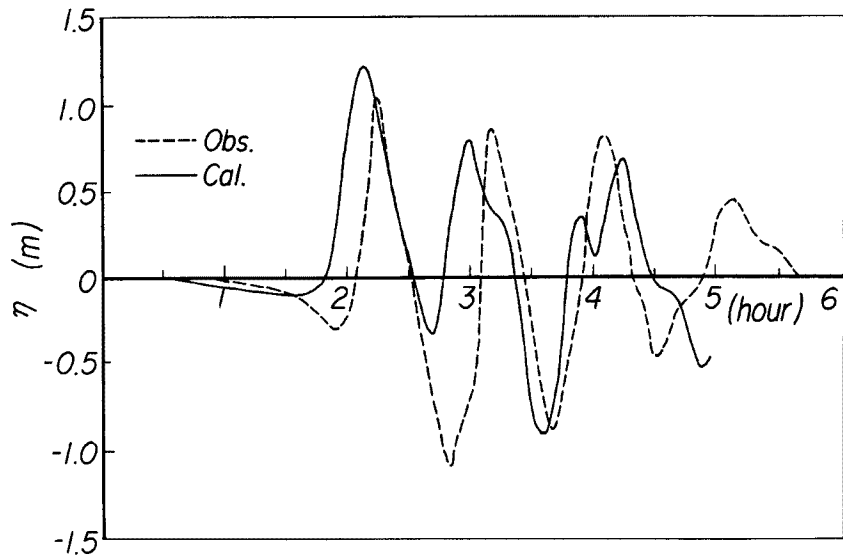


Fig. 12. Comparison of surveyed and computed water level of the 1946 Nankaido earthquake tsunami in Sakai.

Table 1. Basic equations and conditions in a numerical simulation

	Fault model	Basic equations	Grid spacing	Boundary conditions
Aida	Model 20 proposed by Aida ⁵⁾	convection term and friction term excluded	5km 2.5km 1.25km (partly 312.5m)	$K_R=1^*$
Technical report of Kansai International Airport	ditto	convection term excluded, but friction term included ($n=0.026$)	5km 2.5km 1.25km 625m	$K_R=1$ $h_{\min}=10\text{m}$
Tsuchiya et al.	ditto	convection term and friction term included ($\gamma_b^2=0.0025$)	5km 2.5km 1.25km	$K_R=1$ ($K_R=0$ at the Akashi and Naruto channels) $h_{\min}=5\text{m}$

* K_R : coefficient of reflection

での境界条件は、相田の場合には記述がないが、完全反射としているものと考えられ、他の2つの計算でも同様である。関空の場合は最小水深を10mとしている。本論文の計算では、明石海峡と鳴門海峡では反射率0とし、最小水深を5mとした。

海岸地形は、相田の場合には記述がないが、関空の場合は、関西国際空港の人工島の存在の津波高に及ぼす影響を検討するのが目的であったので、現在の埋立地を考慮した地形を採用している。この調査では1854年の津波を追算するのが目的であり、現地形を滑らかにした地形を用いた。なお友ヶ島水道に関しては、Fig. 8 (b) の形を用いた。

3.2 従来の計算結果との比較

大阪湾内での計算結果を比較する前に、四国沿岸および和歌山県沿岸を含めた大きい領域で、最大水位の分布を比較したものが、Fig. 13 である。この図では、関空の結果が大阪湾内しか示されていないので、相田⁵⁾と本研究の結果を比較している。両者の計算地点は多いが、その中から代表的な地点のみを抽出して示している。なお、図中には3.3で検討する史料との比較において用いる羽島の調査結果¹³⁾も示している。

相田の最大水位の計算結果は、その論文中には直接示されていなかったが、以下の方法で求めた。すなわち、相田の論文⁵⁾のFig. 12 には、安政地震津波の断層モデルの1つとしてのモデル20による水深200mでの計算値と、1946年の南海地震津波の断層モデル19による水深200mでの計算値の比が示されている。一方同論文のFig. 10 には、モデル19による水深200mでの計算値が示されている。この2つの値を図から読みとり、モデル20による水深200mでの計算値を求めた。図が小さく精度はよくない。

なお、相田が最終的に安政南海道地震津波の断層モデルとして採用したのは、モデル20のパラメータの値に彼の言う係数 K の値を乗じたものであるが、 K 値は0.98～1.07の範囲の値であり、Fig. 13の比較においては無視しうる。

図からわかるように、高知県沿岸では全体として本研究の計算値のほうが大きく、とくに宇佐で著者らの計算値が大きくなっている。3.3でも述べるように、宇佐の津波遡上高の調査結果では約8mとなっ

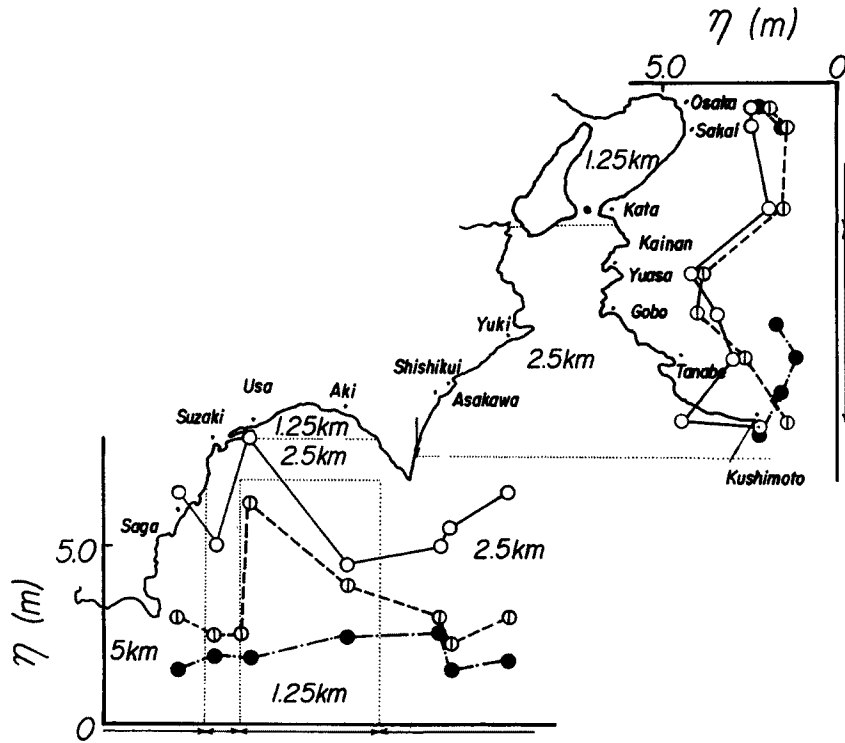


Fig. 13. Comparison of surveyed and computed tsunami height of the 1854 Ansei Nankaido tsunami and grid spacing.

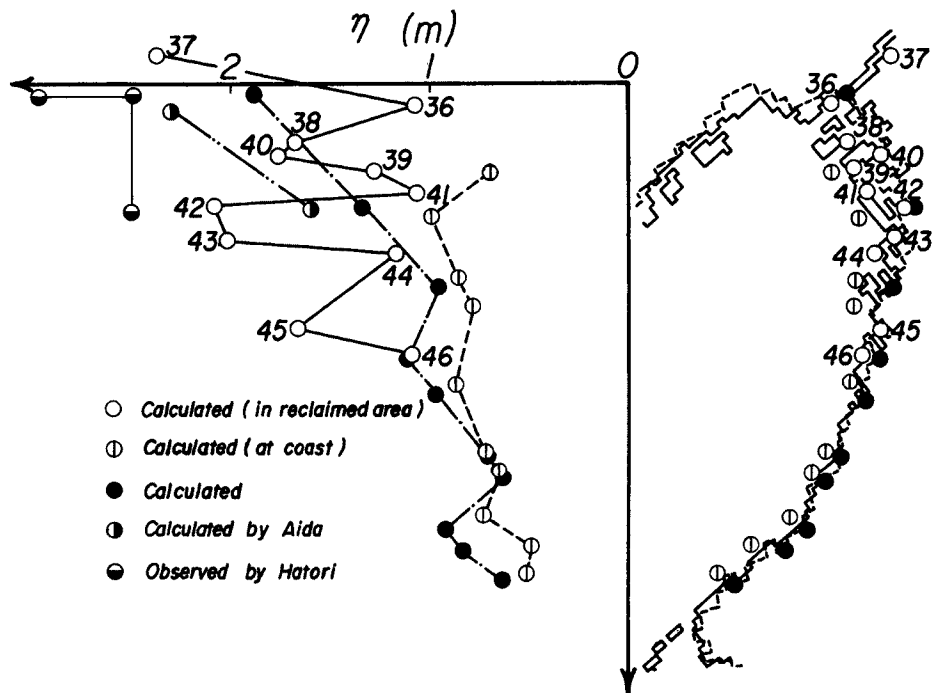


Fig. 14. Comparison of surveyed and computed tsunami height of the 1854 Ansei Nankaido tsunami in Osaka bay.

ており、この調査の計算結果の方が調査結果をよりよく説明している。

和歌山県沿岸でも、一般に相田の計算値のほうが小さい。3.3でも述べるように、遡上高の調査結果も本研究によるものに近い。なお大阪湾内の計算値と史料による推算値との比較はFig. 14で行なう。また、関空⁶⁾の計算結果は大阪湾内だけのものが示されており、やはりFig. 14で比較する。

Fig. 14は、大阪湾内での3つの計算結果を示している。図中には、3.3で用いる羽鳥¹³⁾の調査結果を示している。ただし相田の結果は、大阪と堺しかない。値は、相田の論文⁵⁾の図-14のモデル20'の最大水位を読みとったものである。この場合も、モデル20と最終的に採用した20'との相違は無視している。また、関空の結果には2種類のものがある。すなわち海岸線のやや前面での計算値と、現在の複雑な埋立地内の水路での計算値がある。ここでは1854年当時を想定しており、比較の対象としては、海岸線のやや前面の計算値を採用すべきである。

さて、これらの結果から、つぎのことが指摘できよう。全体的な傾向として、友ヶ島水道から岸和田付近までは、関空とこの調査の計算結果はほぼ一致しており、湾奥に向うにつれて徐々に増加している。一方堺付近から湾奥にかけては、相田のものももっとも大きく、関空のもの(①印)ももっとも小さい。関空のものを除けば、湾奥に向う増加傾向があり、友ヶ島水道から湾奥にかけては、全体として増加傾向にある。

3.3 安政南海道津波史料との比較

安政南海道津波は安政元年11月5日(1854年12月24日)に発生し、紀伊半島や高知・徳島沿岸各地に大被害をもたらした。各地における津波の高さは、すでに羽鳥によって詳しく調査されており、かつ宝永津波の場合との比較も示されている。ここでは、日本地震史料を詳細に検討して上述した沿岸各地の津波の高さを推定するとともに、羽鳥や渡辺の調査結果も示すことにする。

ここでは、史料の精度をつぎの3段階のランクに分類して示す。

- A: 海岸付近で、地盤高と浸水高が既知
- B: 海岸より1 km以内の内陸で、地盤高と浸水高が既知
- C: 浸水状況あるいは南海道津波(1946年)の浸水深との比較から推定

(1) 大阪府沿岸の津波の高さ

ア) 大阪: すでに、土屋および河田¹⁾は津波史料を用いて、被害状況や地盤沈下などの解析から、津波の高さが約1.9 mであると推定している。ランク A。

イ) 堺: 堺之様子承り候處、市中潰家等夥數、怪我人も有之、剩五日中の下刻地震の節、津浪に面、湊滞船之數艘、入江へ重り合押入、四ヶ所落橋、八百石積之船、陸江打揚、汐引候面も其儘有之山、同所新地邊、一圓汐附に相成候山。〔大屋祐義日記〕

および、暮なんとして俄に津浪たちて、川すちへはけしく込入り、引きもまたはけしく、川通に繫し船ともは碇綱きれ、棹さすちからたらす、矢庭に走り入り、そこよこへつぎあて、橋八も崩落ち、船はわれ或はつよく損して、見るおそろしさいはんかたなく、地震津浪に家潰れ、ぬりかたむきたるはさはなれと、里人は神社の廣庭に集まりてさけ居たるか、これかために一人も怪我はしたる人のなきこそ、いよゝめてたかりける。〔安政地震記念碑々文〕

大阪の津波被害と状況が酷似しているので、津波の高さは約2 mと考えられる。ランク C。

(2) 和歌山県沿岸の津波の高さ

ア) 加太: 地震強大津浪襲來の風説立ち村民全部山へ避難し人畜等には被害なかりしも濱邊の漁船を浚ひ川口へ漁船を押込み破壊したり。爲に加太橋、渦貝橋は危険にて通航を停止せられたり。〔和歌山県下における宝永・安政年度の津波状況調査〕(以下、津波状況調査とする。)

津波の高さ1~1.5 m。ランク C。

イ) 紀三井寺: 異様な音響と共に激震起り津浪襲來し紀三井寺大門の初段迄潮水浸入し住民名草山に避

難。〔津波状況調査〕

海岸付近の不老橋の標高は1.9 mであり、和歌川をはさんで紀三井寺まで約1.5 km離れており、津波の高さは2.5～3 mと推定される。ランク C。

ウ) 海南：海南市は紀北第一の惨害を被れり。流失又は倒潰家屋多しく津浪は午後六時頃より四、五回も潮の満干あり、中にも三回目の高潮は頗る猛烈な勢いを有し南濱にて床上一尺浸水。〔津波状況調査〕
このほかに、日方で床上3尺5寸浸水したとある。海岸付近の地盤高は2.5 mであり、地面から床まで約50 cm（1尺6寸）であるから津波の高さは南濱で3.3 m、日方で4 mとなり、第3波が最大である。ランク A。

エ) 大崎：海岸付近の三十軒で床上5尺浸水。〔津波状況調査〕

したがって、地盤高を約2 mとすれば、津波の高さは4 mとなる。ランク B。

オ) 湯浅：市街では道町北入口は床より上二尺通り浸水、傳馬所（今我松店の所）付近は床限り、山家町石橋より上は裏手より浸水、走り上りは全部浸水、北町は中町角あたりまで浸水、北恵美須社土堀は浪の爲めに流る。新屋敷は全部浸水、南は恵美須社、北と同様、其の他流失家屋ありて被害甚だし。濱町は北より一丁程浸水、南は浸水家屋多し。中町南は横町邊まで浸水被害多く、福藏寺あたりまで汐來たれりと。北は少々浸水あり、藏町は中町より以西浸水す。鍛冶町南は坂の下東側にて一二戸残り、他は流失、道町南は坂の下五六戸残り他は流失し、久保町南は中川原より押寄す汐にて浸水せりといふ。此の洪浪は五日七時半時（午後5時）より暮六ツ時（午後6時）まで三回に及び、三回目の浪は最も大にして、夜五ツ時（午後8時）まで十三回に及べりと。因に南は名島油屋の下又は勝樂寺下手に百石船、長池の下手に五十石船の漂着あり、北濱一里松の下手にも百石船、顯國社付近にも漂着ありしと云ふ。〔紀州の地震と安政大地震洪浪之記〕

道町は地盤高が2.2 mであることから、津波の高さは3.3 mとなる。ランク A。

カ) 広：常地方は徳兵衛屋敷に迄上り、宇右衛門家はゆかより一尺潮上り。此の通りに御座候。〔嘉永七年乙卯築浪忘れ艸〕

広の中心部は標高2 mであるから、津波の高さは2.7 mであり、ランクはB。

キ) 御坊：予は最初源行寺に走る。出木堂板椽見之初度浪及木堂御拜兩落。再度浪不入門内。三度之浪及木堂御拜階三段。庫裏者庭面而云々。〔名屋浦鑑〕

津浪は日高川を遡多數の小船は野口村岩内（海岸より2500 m）に押し上げられ破壊せり。御坊町は全部浸水、松原村にては旧井の切戸を突破して津浪侵入（海岸より100 m）、御坊園にては源行寺木堂拜兩落（海岸より800 m）迄津浪の潮先達せり。又南鹽屋にては森岡法華堂迄、鹽屋にては南の王子神社（海岸より約700 m）石段の九段目迄津浪達す。〔津波状況調査〕

御坊市の南部の水準店は2.8 mであり、北部では3 mであって、石段は1段が4寸（12 cm）であるから、津波の高さは、北部で3.4 m、南部で3.8 mであり、いずれもランク B。

ク) 印南：五日申中刻頃より大地震有りて、人々驚き思案之内、西の方天に響き大に鳴や否、引汐無之、津浪揚來て満引數度有、暮方に湊半分干て大成浪揚來る。但浪之高さ札の辻にて三尺餘、恵美須之社階之二段餘、印定寺門之柱一尺二寸餘、浪先き椎之木前迄、濱側家少々流失、大破多、川之兩側家不殘流失。〔森氏記録〕

海岸付近の標高が4.4 mであるので、津波の高さは、札の辻で5.2 m、印定寺で4.8 mとなり、いずれもランク A である。

ケ) 南部：流失家屋一、鹿島の爲津浪は遮られ浪勢軽く、南道にては稻荷祠の一段迄、植田にては椿阪口の往來道を越え、又山内にては中内迄津浪殺到せり。〔寶永の津浪の後家屋は山手に移る〕〔津波状況調査〕

稻荷社付近の標高は5.5 mであり、津波の高さは5.6 mと推定され、ランク A。

コ) 田辺：安政南海地震津波当時の被害の記述については、たとえば、〔安政震火災記〕や〔嘉永7年甲

寅地震海翻之記)などに長文の記述があるが、〔津波状況調査〕に、つぎのように要領よくまとめられている。

流失家屋三一、焼失六三八、倒潰家屋四六、死亡者九、海潮の變調を見る。田邊沖の數回の大音響あり、同時に海嘯起こり、本町横町水深五尺に上り、海嘯前後三回に亙り、第一回最も大にして第3回之に亞ぐ。津浪は曾津川筋の秋津、釘貫井邊迄(海岸より約2500m)町内は上片小坂迄、袋町小坂迄、下長町、伊丹屋新七宅前迄、背戸川、田圃は秋津口街道限り又廻船4、5隻押上げられ、大橋を破壊せり。

本町の標高は約3mであり、したがって、津波の高さは約4.5mとなる。ランクBである。

一方、田辺の南の新庄では、さらに被害はつぎのように大きかった。

流失家屋四五十、明暮か五つ時大地震ひ夫に潮多高く新田街道に達す。第一回二十尺、第三回三十尺の高さにして田邊濱内にて被害最も甚しく、殆ど全滅の悲運に遇ひ新田川に七八十石船ありたりしが、津浪の爲平田、長井谷、岩木奥(海岸より1200m)へ押込められたり。〔津波状況調査〕

扱て又津浪大潮一番潮同様凡常潮より二丈許り高く、此時も少々家流、猶二番潮同様の様子、三番潮に至り餘高く、二番潮より三番潮は一丈餘も高く、夫故村中新田より名切宮之脇又は古や谷青木五反田邊平田迄で、不残流れ候一代邊、北原、長井谷筋も平地に罷在、家は皆々流、橋谷は一軒も不残。〔津浪真記〕

記述を信用すれば、津波の高さは6mとなり、ランクBである。

サ) 白浜: 嘉永七寅十一月四日大地震アリ。同五日海中雷の如ク鳴ル。俗ニ海鐵砲ト云フ。夕方七時津浪アリ。此夜七回、五度満干ス。浪高サ2丈餘、村中困難一方ナラズ。家屋田畑流失セリ。〔岩城惣八・津浪由来〕

本記述から、津波は6mと推定される。ランクC。

シ) 串本: 袋湊は常水より三丈の溢れ入りしたるよし。

一、串本は一圓に潮溢れども、家には何事もなし。地震にては土蔵築地石垣大破なり。二分口所は別して大破。

一、上野はまづ何事もなし。地震津浪此方潮は常水より三四尺低しといふよし、土人の話し。〔地震洪浪之記〕

これは串本付近の津波の状況であり、串本の海岸付近の標高が4m程度であることから、津波の高さは約4.5mとなり、ランクC。

ス) 勝浦: 即時に突浪川より入り來たり、熊の地材木・午の鼻迄上る。其夜五つ時又々中ゆり、皆小屋にて念佛を唱へ、夜を明し其後より時々大ゆり絶間なし。津浪、浦神にては床より五尺上り、死人七人、向浦神無事、高芝無事、谷地水の浦人家流れ、勝浦大浪人家を浸し。〔新宮町雜記〕

津浪は昔より聞及候に、大地震ゆり候跡にて、汐道半途も引候はゞ、飯一鍋焚候ほどの間もありと聞傳候得共、此度の津浪は聞及とは違ひ、地震ゆり止み兎角する内何の氣色見へず高浪にて、吹屋より同時に打上り、湊の中へやりぬけ、高浪二時許り地下中に打上り、高さ執札場にて汐口四尺五寸、家居高ひくによつて四尺より五六尺汐口上り候。大勝浦両濱側すじ十軒餘も床より上り候。翌五日(中略)夕七ツ頃過ぎと思しき時、又候大地震強くゆり出し、家居も保ちかたく、寺社大家石垣ともゆり倒し、家々の屋根石杯中ウに踊て落ちかかること甚だしうして、津浪も是に應じ候へ共、昨日よりは浪の上り軽く見へ、地震は二倍の大ゆりにて候。〔新田家過去帳〕

後者の記述から、安政南海地震津波よりも前回の安政東海津波のほうが大きかったことがわかり、津波の高さは約2mと推定され、ランクC。

(3) 徳島県沿岸の津波の高さ

ア) 穴喰: 穴喰浦處々高潮のはかり

古目御番所床にて 一丈六尺五寸 同所北手上り口 無 潮

同所大師堂前にて	一丈八尺	正田薬師森より一町ばかり下手まで	
那佐大師堂前にて	一丈八尺	古港の邊にて	一丈五寸
祇園拜殿	内庭まで	港口の邊にて	二丈三尺餘
八幡石壇	二つ目まで	鈴ヶ峰の下	丁石の邊まで
愛宕山南手上り口	石壇二つ目まで		

〔阿波海嘯誌略〕

これから、津波の高さは7 m程度となり、ランク A。

イ) 鞆浦：鞆浦同三百五十軒流失なし。尤鞆浦漁船具財八歩通流損、且同浦港口手倉山の下初崎の土地凡五尺程度落せり。〔異事時変説〕

流失家屋がなく、被害が漁船具に限られて入ることから、津波の高さは約2 mで、ランク C。

ウ) 浅川：すでに、村上¹⁴⁾が詳しく史料を整理しており、これに基づいて推定すれば、津波の高さは6.6 mでランク A。

エ) 牟岐：牟岐浦同五二十軒流失。〔異事時変説〕

七ツ時に波浪となり、人々は命から山上に逃げ登りたり。濱先の家々數百軒、土藏に至る迄黒煙立ち、土石を飛ばし、将棋倒の如く、残るは漸々土藏四五軒のみ凡汐の高さ三丈餘、又山々の麓へ指込みし汐先は五六丈とも見えたり。元來津浪は大海の高潮とも見えず、出羽大島の岬又は濱先より起り、地中よりは水を吹き出し、流失人廿餘人に至る。〔牟岐町誌〕

被害が南海道津波（津波の推定高4.5 m）の場合より大きいことも考慮すれば、津波の高さは6 m程度であり、ランク C。

オ) 木岐：未中の方と覺えて空大に鳴る、其數三十六度、間もなく津浪打來る。其大なること高さ三丈程なり、家土藏よりはるかに高し。右津浪の上り溜りを爰に配し置く。八幡の上の石段下より三つ目迄に行留る。延命寺の石壇にては大凡八歩通り浸る。奥留りは柿の谷前の堤防に留る。〔木岐元日堂記録〕安政元年寅年十一月四日微震、潮狂三尺餘にして、五日津浪侵入せり。其詳細を示さんに、半里程沖合より津浪侵入し、其高さ水平より高きこと二丈餘、夜に入り數度浸入す。我浦二百二十戸あり、其激浪の爲崩され残る者僅に二十戸なり。延命寺、真福寺は皆無事にして、村方へ高浪押入る事凡そ十二町、即ち今の大師庵に至る。死する者老若男女十人。（中略）又百石以下の商船及漁船共七十艘餘田面へ流れ込み悉破損す。浦人は明神山荒神山及延命寺山八幡山等へ其難を避く。〔浜名家記録〕

海岸近くの真福寺付近の標高は3.7 mであって、両史料の記述から、津波の高さはおよそ6 mと推定され、ランク Aである。

カ) 由岐：嘉永七寅年季十一月四日朝辰刻地震潮立浪怒、翌五日朝巳刻地大震、人皆避難於山頂、時海嘯襲來、而到於長圓寺下、堤防破壊、流失家屋百數十戸、村内僅十餘戸存耳焉、死傷夥極悲惨、領主蜂須賀候命吏改修。〔東由岐修堤ノ碑〕

被害状況から、津波の高さは5 m程度と推定され、ランク Cである。

キ) 志和岐：去る嘉永寅七年霜月四日朝五ツ時大地震、不時に汐高満有、此時浦中家財を寺或は高き人家へ持運び、翌五日七ツ時亦々大地震、忽ち津浪押來り、船網納屋不残沖中へ流れ失。浦人漸寺又は山杯へ遁登り、夫々無難に一命助かりし事、全氏神諸佛の御加護也。依之又々幾後年に及大地震の節汐高満有之之時は、定津那み押來るべし。其の期に及少も爲無油断、荒々此石に彫記。長く子孫へ知らせ置度而已。〔志和岐浦安政津浪ノ碑々文〕

被害状況から、津波の高さは由岐より若干小さく4.5 m程度と考えられ、ランク Cである。

ク) 橋：果たせるかな夕陽西山に入る比、俄かに井泉皆涸れ、潮水遠く引退し、忽ち轟々として海嘯襲來すること高さ一丈八尺復た引退いて後襲來す。此の如きもの數回にして船舶は繫索に断ちて木葉の如く高丘に打上げられ、家屋は礎を離れて流亡し、人皆高所に上りて非難せり。此の流失家屋鶴にて二十二軒、全村にて百三十四軒、溺死一人なり。〔橋町史〕

記述によれば、津波の高さは5.4 m程度となり、ランクCである。

ケ) 福井: 嘉永七年寅十一月大地震にて皆人家を飛出て竹林等へ非難す。西方怪しく鳴り響きて、其の凄じきこと云ふ許りなく、やがて轟々として海嘯(高七尺)襲ひ來り、海岸河川の堤防を破壊し、人家五六戸を奪ひ去り、橘港に碇泊の船舶は錠綱を断ち切り標流して、五十石積船一艘は大西關下漂着し、同じく一艘は大西犬の馬場田地へ漂着す。餘震は數日にして止む。〔福井村史〕

ここは、蒲生田岬の遮へい域になっており、津波の高さは2 mでランクC。

コ) 小松島; 徳島: 小松島は千軒之所、大地震之上大津波に而、流れ候人家多く漸々三拾軒許り残り中候事。〔福井氏永来桑原朔二、阿州徳島より宅元へ之書状〕

溺死四拾餘人、中洲賀廿餘軒過半流、溺死二人、第二番目の津浪にて濱と中洲賀不残流失して亡所と成。都而高潮往來する事七度、中にも第四・五兩度之津浪甚高く、山際の家と雖、十に八九流失して残る分は高潮打通し、屋根斗に成。予が家も夜亥の刻頃迄在といへども、第五番目の潮の爲に山際に流寄、屋根斗残されとも物置の二階存在して雑具着用少々在。常所にて潮の不入は源右衛門家斗なり、夫より日夜五・六度或は四五十度に至迄地震せぬ日は無。〔大變略記(徳島)〕

兩地点とも地震とともに火事が発生し、その被害に津波が追いつちをかけたことになった。津波の高さは3 m程度と推定され、ランクC。

(4) 高知県沿岸の津波の高さ

本県の西武、愛媛県と隣接する地域でも津波史料は残っているが、ここではあくまでも今回の津波モデルによる結果の妥当性を検討することが主目的であるから、須崎より東の地点についてまとめてみることにする。

ア) 須崎: 折柄早須崎の湊へ津浪入り、古倉より原の邊又は土崎邊の家數百軒流れ行くを遠見致し、流死三十餘人。〔利岡清佐衛門記録〕

地震は激甚なりしが、西町・新町・濱町・原・古倉等の家屋は殆ど流失せり。死者三十餘人。久禮一詳細は不明なるも海岸に接したる集團部落大半流失し、多數の死者を出したるが如く、土民の中五十人許八幡社山に登り難を免る。〔高知県下に於ける津波災害予防施設に就いて〕(以下、高知県下に於ける津波災害とする。)

被害から推定して、津波の高さは5 m、ランクC。

イ) 宇佐: 五日夕刻より津浪襲來八、九度に及び、人家漂流、残家僅に六、七十軒、溺死の男女宇佐福島を合して七十餘人なりしといふ。この際山に逃れたるものは恙なく、衣食調度に留意したるもの及び舟に乗りたるものは流死せり。〔高知県下に於ける津波災害〕

須崎の被害と同様であるから、津波の高さは5 m、ランクCである。

ウ) 浦戸: 今柱濱ト浦戸堺ナル越戸ニ大黒屋嘉七郎トイフモノ、建設シタル徑壹一尺二寸、地上高サ七尺ノ御影石ニ彫刻シタル紀念碑アリ。其文ニ曰、安政元寅十一月五日大地志ん津浪、後世人大地志ん有時津浪入ト心得ベシ、大黒屋嘉七郎建之ト書シタルアリ。全所ハ海面ヨリ高キコト凡ソ二十尺ナリ。而シテ該洪波ハ殆ント此越戸之頂上ニ達セントセシモ、超越スルニ至ラサリシ。依之見ル時ハ、其大波ノ高サモ凡ソ二十尺内外ナルヲ想像スベキカ。〔浦戸港沿岸震浪記〕

津波の高さは6 m、ランクA。

エ) 高知: 浦戸港地潮より三尺四、五寸高となり、城東新町下知一圓海となる。津浪の害は輕微なりしも震災と火災による被害は寛永の震災に劣らず。死者百六人を出せしといふ。津浪は浦戸口より押込來り、先づ下知堤を決潰して下町に浸入せり。十一月五日津浪起る。桂濱は一軒も残らず流出す。潮勢浦戸山にて防げるとの風説あり。而も餘波高く入り、人家座上より五尺上る。〔高知県下に於ける津波災害〕

下地新町潮入しは、昨日にあらず今日8ツ時過、下知北の丸堤切れ、夫より押入し也。尤數10日の後、堤御普請ありしより不入、新町も東足輕町は又後の築立にや、いと低ければ、座上より1尺餘も潮

入し也。予が家は庭前或は床の下まで入來りて、座上は恙なかりし。尤潮に差引ありて、満し時は外輪船にて往來せし也。〔谷脇茂実日記〕

津波は1.5 m程度と推定され、ランク C。

オ) 甲浦：八歩流〔大坂より之來書〕

半分許流失〔土佐高知、失出津浪之事〕

津波の高さは3 m程度と推定され、ランク C。

(5) 計算結果との比較

Fig. 15 は、今回の史料に基づいて、ランク別に津波の高さを示したものであり、同時に渡辺¹⁵⁾の結果も破線で示してある。彼の結果は、引用文献等が詳しく記述されているので断定的なことはいえないが、値そのものは羽鳥¹³⁾のものと同じである。さて、計算値は実線で示してあるが、全般的に史料による結果より小さくなっているものの、おおよその傾向は一致しているように思われる。とくに、ランク A に属する津波の高さと計算値の差は、紀伊水道沿岸各地で2~3 m、土佐湾沿岸各地でそれよりも少し大きくなるが、傾向はよく一致していることが見出される。このように、計算値のほうがほとんどの場合、史料に基づく結果より小さくなる理由については、まず、史料から得た津波の最大そ上高であって、計算値はそ上前の最大水位上昇量を表しているため、両者は当然のことながら相違しよう。つぎに、計算の格子間隔の設定に伴う水深の与え方に問題があると考えられる。本計算では紀伊水道の津波の伝播計算で、2.5 kmの格子間隔を用いているため、たとえば、ランク A に属する印南では陸上にもっとも近い格子上の水深は20 m、木岐では60 mとなっており、いずれも海岸から少し沖合の値となっている。そのため、リアス式海岸のように海岸付近で水深が急変するところでは、格子間隔を小さく取る必要があるだろう。しかしながら、実際には、詳しい水深のデータがなく、かつ仮に沿岸付近で格子間隔を小さくとっても、その接続がかなり複雑なことや計算時間が長くなるために、多くの地点でこれを実施するのは困難であるといえ

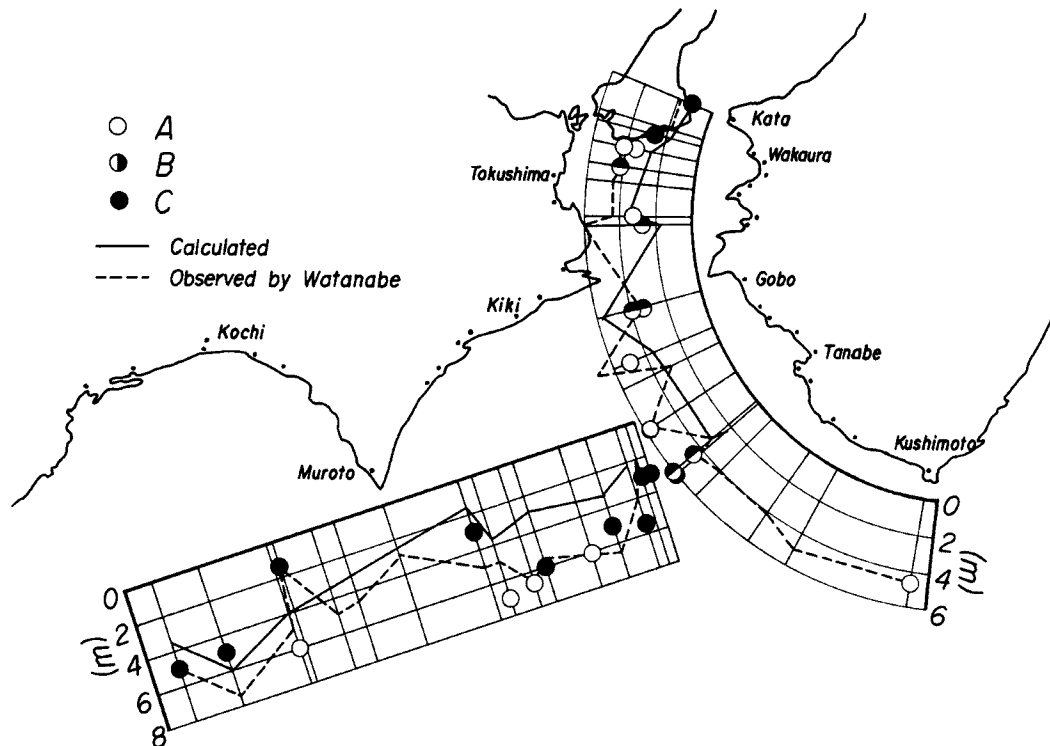


Fig. 15. Comparison of surveyed and computed tsunami height of the 1854 Ansei Nankaido tsunami around the Kii strait.

る。そこで、計算時に与えた沿岸付近の水深が浅く、史料で求められた海岸付近の水深と比較的対応できる箇所を選んで、計算の妥当性を検討すれば、前述した後者の問題はある程度解決するものと考えられる。その観点からランク A の湯浅および海南（いずれも、海岸付近の水深は 10 m）では、計算値と史料による値はよく一致していると判断される。

つぎに、大阪湾沿岸については、史料による津波の高さが大阪と堺でしか推定できないので、詳しい検討はできないが、大阪の値については、史料による推定値と計算値のいずれもかなり信頼性があるものと判断される。前者の場合、もちろんランク A に属するとともに、大阪湾に面した天保山における値であって、石垣への津波の衝突による上も考慮して求めている。また、後者の場合、格子間隔が 1.25 km であり、かつ遠浅のため水深変化が各メッシュで紀伊水道の場合よりはうまく表されているといえる。計算による津波の最大水位の上昇量は 1.89 m であり、史料に基づく推定値と一致しており、両者は極めてよい対応を示すといえよう。

以上のことから、安政南海道津波に関する本数値モデルは、かなり妥当であると判断され、とくに大阪における津波の高さは精度よく推定できることがわかる。

4. 安政津波の氾濫特性

ここでは、大阪に來襲した安政津波が、市街地にどのように氾濫したかについて、数値計算結果に基づいて考察し、『大阪大津浪図』¹⁶⁾ などの比較から、その妥当性を明らかにする。

4.1 氾濫原の地形特性

氾濫計算をするためには、安政津波当時の氾濫原の地形を精度よく再現しなければならない。著者らはすでに第 1 報において、『大阪大津浪図』に描かれた地域について明治 20 年に刊行された『実測水準曲線

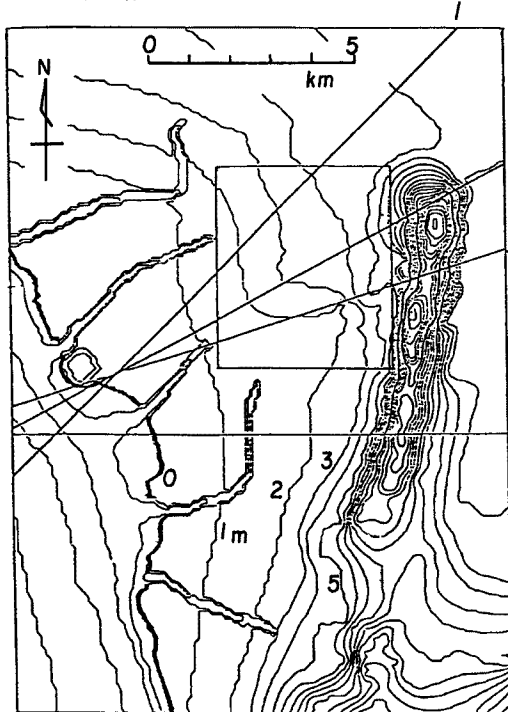


Fig. 16. Topography of the Osaka area in 1854 and survey lines.

記入大阪市街全図』¹⁷⁾ と天保山の沈下量などを考慮して標高を推定した。今回の氾濫計算では、大和川、上町台地および新淀川（もちろん当時は開削されていなかった）に囲まれた地域に拡大して、地形を再現した。具

体的には、国土数値情報から得た 100 m メッシュ点の標高に、昭和 9 年以後の累積沈下量の内挿計算から得た値を加え、かつ第 1 報のときと同じ様に、天保山の沈下の影響を線形補間して修正した。Fig. 16 は氾濫計算に用いた最終の地形図を示す。

4.2 津波の氾濫計算法

(1) 差分式

用いた基礎式は式 (1) から (3) とほぼ同じであ

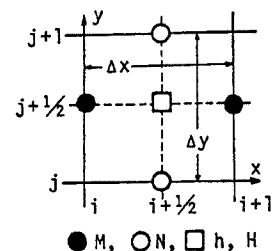


Fig. 17. Arrangement of variables in the numerical simulation.

るが、摩擦項はマニングの式で表示し、氾濫域がそれほど大きくないことから、コリオリの力を無視することにした。差分式の数値計算では、演算時間を短くするために leap frog 法を用いた。各格子点における変数の配列を Fig. 17 に示し、運動方程式は連続式を用いて変形すれば次式のように差分式に表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^n}{2\Delta t} + \frac{u_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i+a,j+1/2}^* - u_{i-1/2,j+1/2}^* M_{i-1+b,j+1/2}^*}{\Delta x} \\ & + \frac{v_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i+a,j+1/2}^* - v_{i-1/2,j+1/2}^* M_{i-1+b,j+1/2}^*}{\Delta y} = \\ & -g \frac{(h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}) (H_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - H_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})}{2\Delta x} \\ & - gn_{i,j+1/2}^2 \frac{(M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^{n+2}) \sqrt{(u_{i,j+1/2}^n)^2 + (v_{i,j+1/2}^n)^2}}{2[(h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1})/2]^{4/3}} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{i+1/2,j}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^n}{2\Delta t} + \frac{u_{i+1/2,j+1/2}^* N_{i+a,j+1/2}^* - u_{i-1/2,j+1/2}^* N_{i-1+b,j+1/2}^*}{\Delta x} \\ & + \frac{v_{i+1/2,j+1/2}^* N_{i+a,j+1/2}^* - v_{i-1/2,j+1/2}^* N_{i-1+b,j+1/2}^*}{\Delta y} = \\ & -g \frac{(h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}) (H_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - H_{i+1/2,j-1/2}^{n+1})}{2\Delta y} \\ & - gn_{i+1/2,j}^2 \frac{(N_{i+1/2,j}^n + N_{i+1/2,j}^{n+2}) \sqrt{(u_{i+1/2,j}^n)^2 + (v_{i+1/2,j}^n)^2}}{2[(h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1})/2]^{4/3}} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 Δx および Δy は x および y 方向の格子間隔であり、 Δt は時間間隔である。上式において添字 a 、 b のついた対流項を計算するために、添字 1 としたものは、符号の正、負によって次式の値をとる。

$$\left. \begin{aligned} u_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i+a,j+1/2}^* &= u_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i,j+1/2}^*; u_{i+1/2,j+1/2}^* \geq 0 \\ u_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i+a,j+1/2}^* &= u_{i+1/2,j+1/2}^* M_{i+1,j+1/2}^*; u_{i+1/2,j+1/2}^* < 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

この方法は上流差分と呼ばれるものであって、結局、 x および y 方向の流速は、つぎのようになる。

$$u_{i,j+1/2}^* = \frac{2M_{i,j+1/2}^*}{h_{i-1/2,j+1/2}^* + h_{i+1/2,j+1/2}^*}, \quad u_{i+1/2,j+1/2}^* = \frac{u_{i,j+1/2}^* + u_{i+1,j+1/2}^*}{2} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、*印は時間平均を示すもので、次式で定義される。

$$u^* = (u^{n-2} + u^n)/2, \quad M^* = (M^{n-2} + M^n)/2, \quad h^* = (h^{n-1} + h^{n+1})/2 \dots\dots\dots (8)$$

以上の差分によって、計算時間がかなり短縮できることがわかっている。

(2) 氾濫水の先端条件

一般に dry bed 上の氾濫水の先端は数学的に特異点となるため、何らかの付加条件を導入しなければ、先端部の伝播計算ができない。その取扱い方法はすでに、土屋ら¹⁸⁾によってまとめられており、その 1 つに先端部の水深がある基準値を越えれば前進するという、いわゆる threshold condition がある。この条件が実用上、十分使えることが高橋¹⁹⁾や岩佐²⁰⁾による氾濫の水理実験によって確かめられており、ここではこれを用いることにする。すなわち、先端水深 h_f が 0.1 mm を越えると、氾濫水は伝播すると仮定した。この h_f の値として、どの程度の大きさに設定するかは問題となろうが、前述した水理実験の結果と氾濫の数値計算結果の比較から、0.1 mm とすれば両者がかなりよく一致することや、実際の凹凸のある氾濫原

Table 2. Grid spacing, time scheme and other variables

Time interval Δt	2s
Grid spacing $\Delta x, \Delta y$	100m
Threshold depth	0.1mm
Manning's roughness coefficient n	0.025 0.020 0.015
Tsunami height at open boundary	1.9m

では h_f の値によって先端部の伝播特性がそれほど顕著に変化しないことから、この値に設定した。計算に際して、つぎのように具体的な取り扱いをしている。

- 1) ある格子点における先端部の水位（標高+氾濫水深）より周辺の標高の方が高ければ、流量（flux）は零とする。
- 2) 水深が h_f 以下の格子点から流出する流量が計算されても零とする。
- 3) 計算された水深が負になった場合は、零に置き換える。

井上によれば²¹⁾、これらの取り扱いによって氾濫水の連続性が成立しなくなる恐れがあるが、幾つかの数値計算の結果によれば、対象領域に流入・流出した氾濫水量の差と領域内

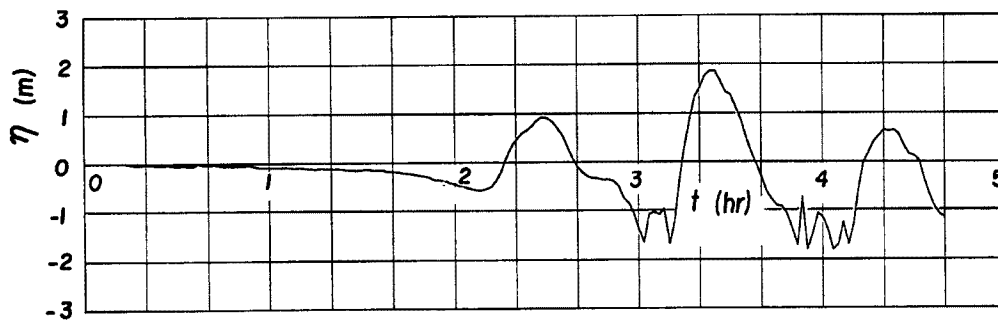


Fig. 18. Wave profile of the Ansei Nankaido tsunami at Tenpozan in Osaka.

で貯留された水量は最大 5% 程度違わないことから、おおむね連続式が満足されるとしている。

(3) 初期条件と計算条件

4.1 で示した地域で氾濫計算を行うわけであるが、『大坂大津浪図』で示した浸水域では木津川、尻無川および安治川が存在するが、木津川の河口部を除いて堤防はないので、川幅が 100 m を越える場合は、河川の水位は周辺の地盤高に等しいと仮定して計算をすすめた。計算時間間隔は Neumann の安定条件より求めた値よりさらに小さくし 2 sec とした。計算条件をまとめて Table 2 に示した。

つぎに、氾濫計算の初期条件は、つぎのよう取り扱っている。本来ならば、津波の伝播計算と氾濫計算を 1 つの計算プログラムで行うべきであるが、両者で格子点間隔が数倍以上異なるので、接続時の連続条件が大変複雑になることや氾濫計算条件を変える場合も、津波発生時から計算を行わねばならず不経済であることから、両者を別個に計算することにした。そこで、Fig. 16 に示した西側の境界上で、天保山における津波の高さが 1.89 m になった場合の Fig. 18 に示した波高の時間変化と、海側の 1 つ前の格子点上の流速の時間変化を初期条件として与えた。これは、津波の伝播計算では、固定境界上で完全反射を仮定しているため、法線方向の流速が零となるからである。このような方法を取ったために、氾濫計算結果は、厳密に接続計算を行った場合に比べて、浸水域が若干大きくなると推定されるが、氾濫特性は大局的に変化しないと考えられるので、今回はそれに基づいて考察することにした。

4.3 氾濫計算結果に関する考察

本節では、数値計算によって得られた氾濫特性について考察するとともに、『大坂大津浪図』で示された氾濫域および前報で求めたように、津波の高さまで浸水すると仮定して得た氾濫域との比較・検討を行って、それらの整合性を見出す。

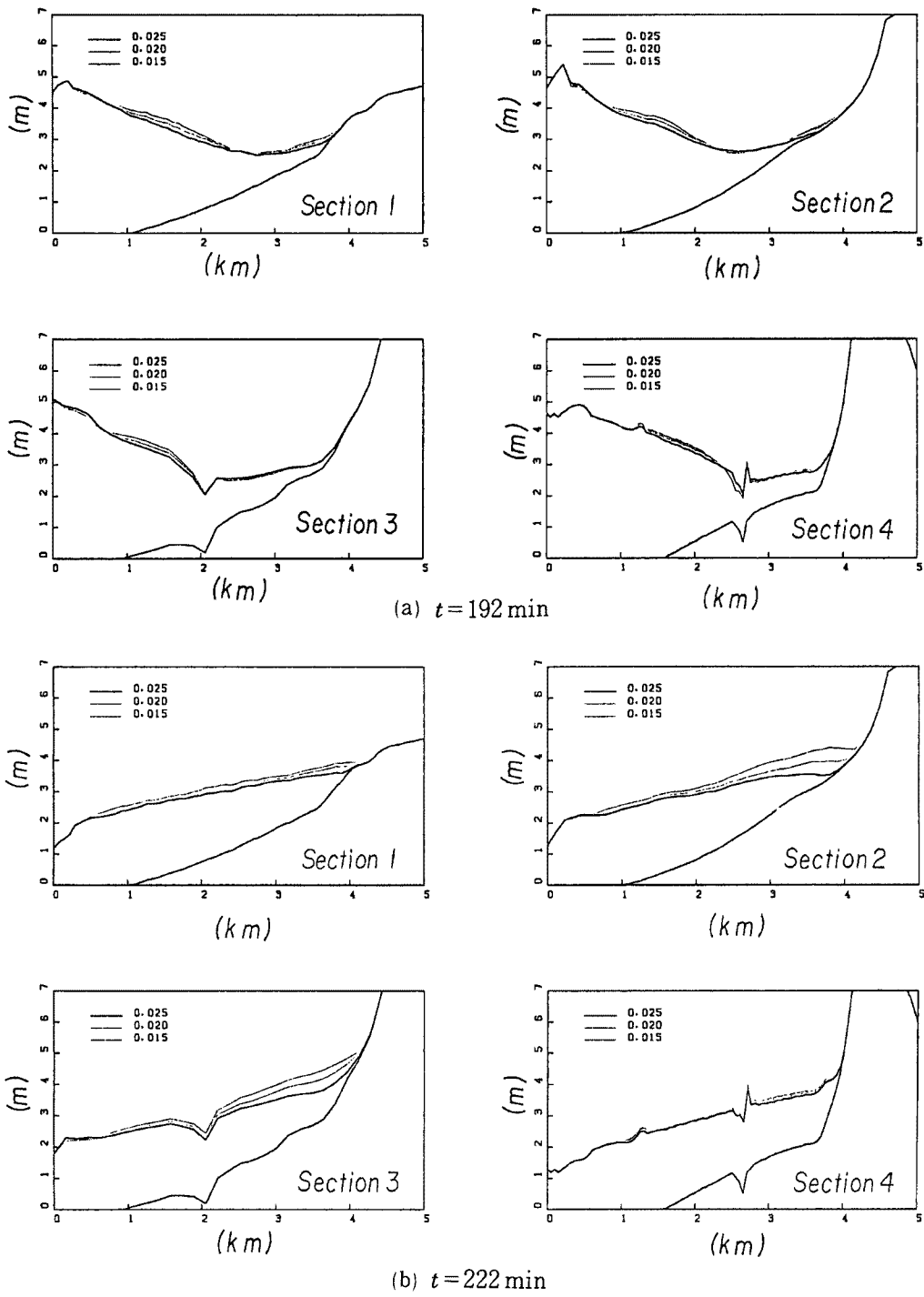


Fig. 19. Profile of flooding along the surveyed lines.

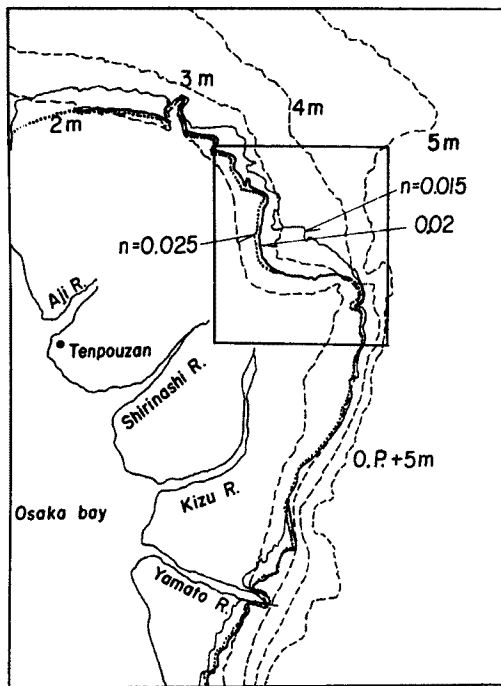


Fig. 20. Difference of flooding area due to Manning's friction factor.

それ程違わないが、0.015とするとかなり浸水域が広がることを見出せる。これらのことから、粗度係数の妥当性は、浸水域の広さとともに、局所的な水深の時間変化を調べることによって、かなり推定できるといえる。ここでは、後述するように『大坂大津浪図』との比較からも、 $n = 0.02$ とした場合がよく適合することがわかったので、この値をとる場合の浸水深と流速ベクトルの時間的変化を考察することにした。

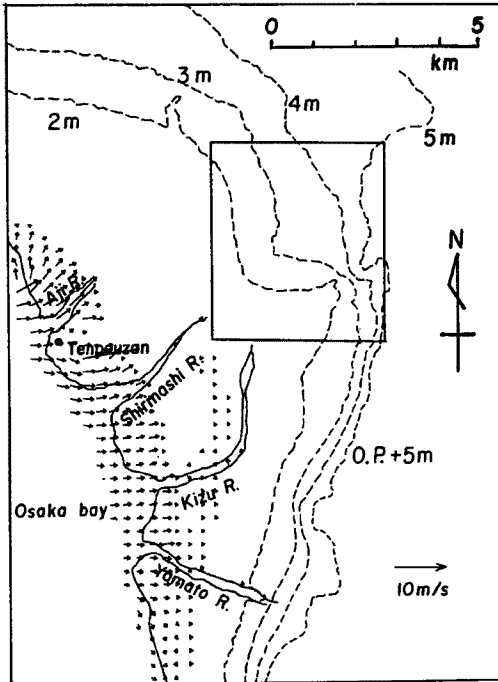
(2) 氾濫水深と流速ベクトルの経時変化

Fig. 21(a)~(h) は各10分ごとに出力した氾濫水の流速ベクトルのうち、特徴的なものを示す。Fig. 18から南海道で安政津波が発生後、約2時間で大阪に到達するが、海岸付近では(a)から約2~3m/sの流速が発生している。さらに、 $t = 142$ minでは、図中に四角で囲んだ『大坂大津浪図』の浸水域に氾濫水が達しているほか、安治川右岸で10 m/sの流速が発生している。 $t = 172 \sim 182$ minで、第1波による最大氾濫域が発生しているが、海岸付近では引き波によって、戻り流れが生じている。しかし、 $t = 182$ minでは、津波の第2波が天保山付近に来襲してきたため、海岸付近では押し波、内陸部では第1波の引き波となりつつあり、 $t = 192$ minではその傾向がさらに強まる。この時の水面形は、すでにFig. 19に示すように、内陸中央部で凹形状となっている。 $t = 212$ minでは天保山付近で押し波となっているため、安治川と尻無川にはさまれた地域では内陸部に向かって氾濫水の流入が続いている。第2波の最大浸水域は $t = 222$ min付近で生じており、それ以降はこれ以上の浸水域とはならなかった。すなわち、安政津波では、第2波による氾濫域が最大となったと推定される。これは、Fig. 22に示す氾濫水先端位置とその水深が3 mの等深線の変化から見出される。まず、第1波の最大浸水域となる $t = 172 \sim 182$ minまでは、氾濫水の先端位置を結んだ平面形状は、等高線とあまり相似となっていないことがわかる。しかし、最大浸水域では、O.P. + 2 mの等高線とほぼ一致することが見出される。さらに、第2波の押し波となる $t = 202$ min以後は、先端位置を示す線がかなり複雑となり、最大氾濫域ではO.P. + 2 mから3 mの等高線の間位置していることがわかる。

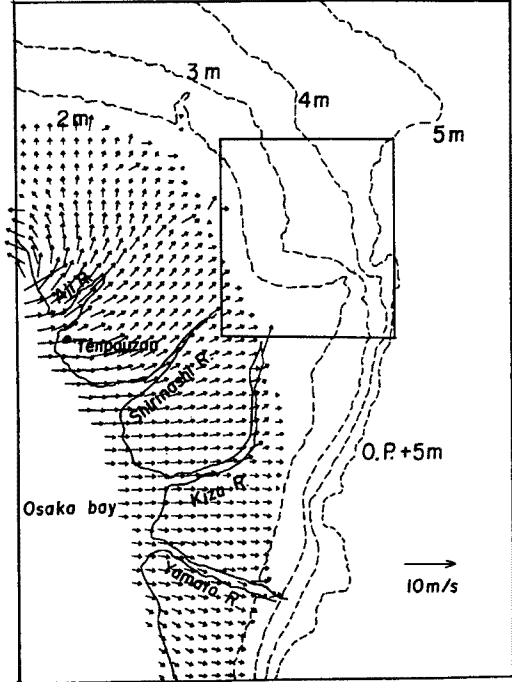
(1) 氾濫原の粗度係数の影響

氾濫域の面積や氾濫水の水深は、粗度係数の取り方に大きく影響されることはよく知られている。本論文のようにマンニングの粗度係数 n を用いる場合、市街地では0.035²¹⁾、田畑では0.02²²⁾として、すでに幾つかの計算が行われている。計算において、この係数を少し変えてやれば、実測値や実験値により合うようにすることも可能であって、この点に改良の余地があることはいうまでもない。

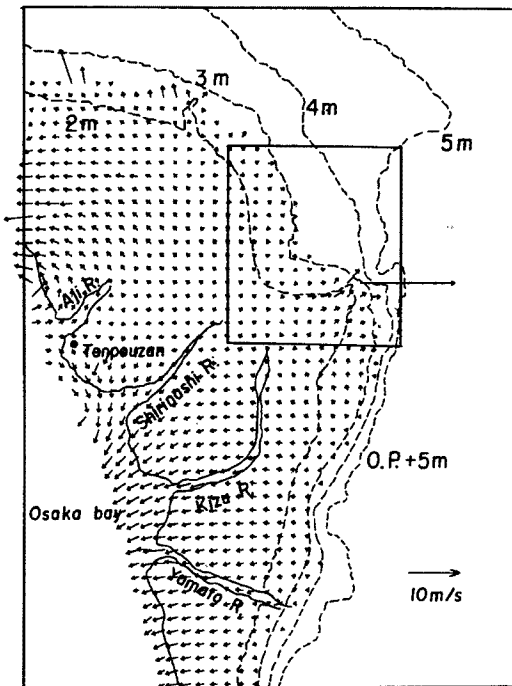
そこで、本論文では、一応従来の研究成果を適用して $n = 0.02$ とおいたが、この係数の相違の影響を調べるために、0.015と0.025についても計算を行った。Fig. 19は、津波発生からの経過時間をパラメータとして、Fig. 16に示した測線に沿った水面形を描いたものである。 $t = 192$ minは第1波のそ上が終わり引き波の途中で第2波が来襲しつつある時のものであり、 $t = 222$ minは第2波による最大そ上時頃の水面形である。これから、いずれの場合も粗度係数の小さい場合の方が水深が深くなっていることがわかる。さらに、Fig. 20は粗度係数によって最大浸水域がどの程度相違するかを示したものであり、 $n = 0.02$ と0.025では



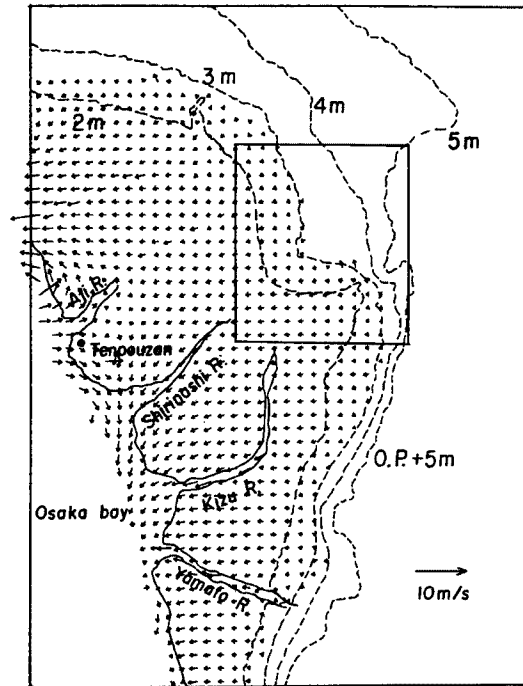
(a) $t = 122$ min



(b) $t = 142$ min



(c) $t = 172$ min



(d) $t = 182$ min

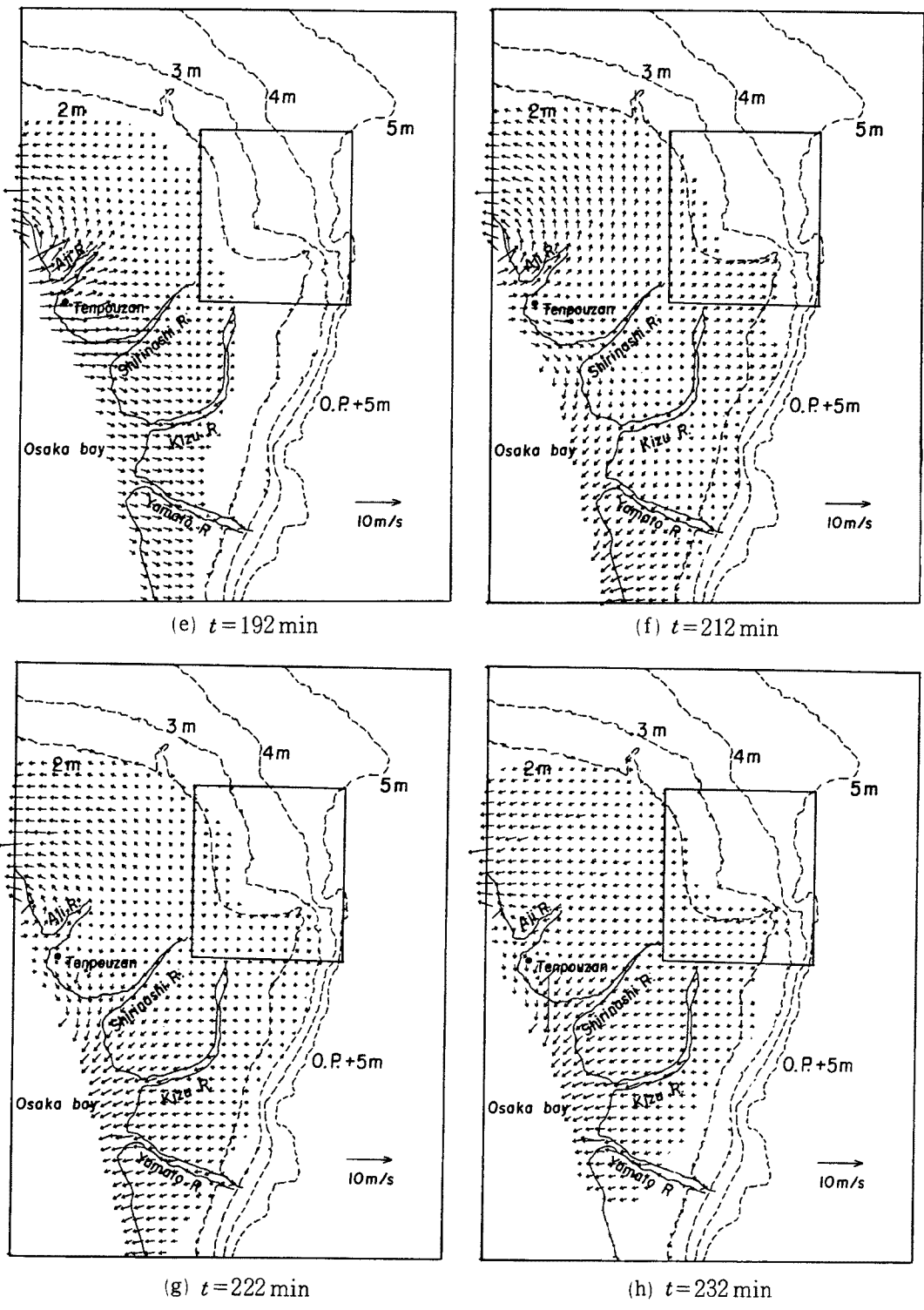
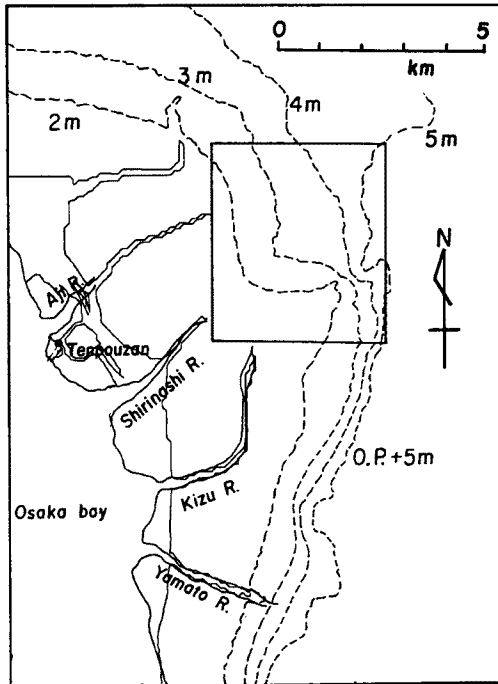
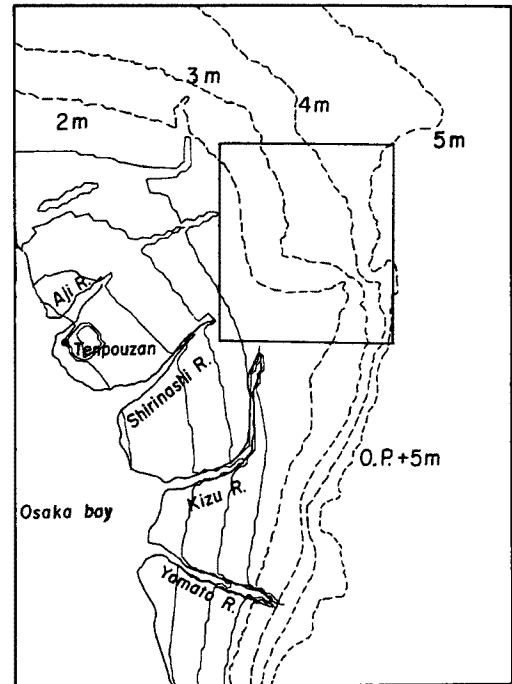


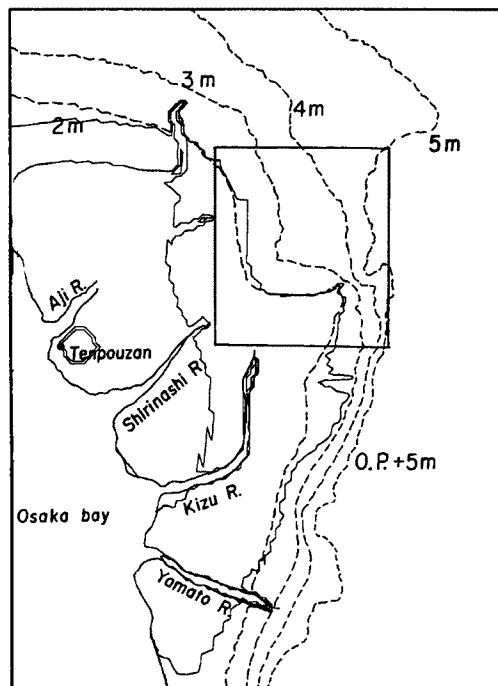
Fig. 21. Time-series of flow velocity in flooding.



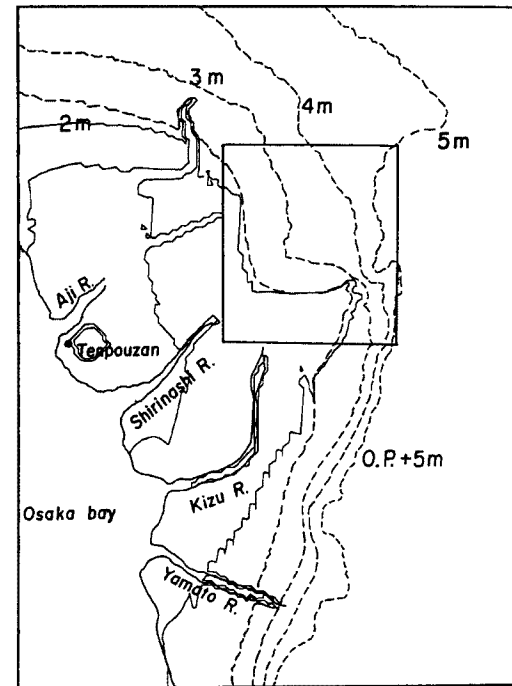
(a) $t = 122$ min



(b) $t = 142$ min



(c) $t = 172$ min



(d) $t = 182$ min

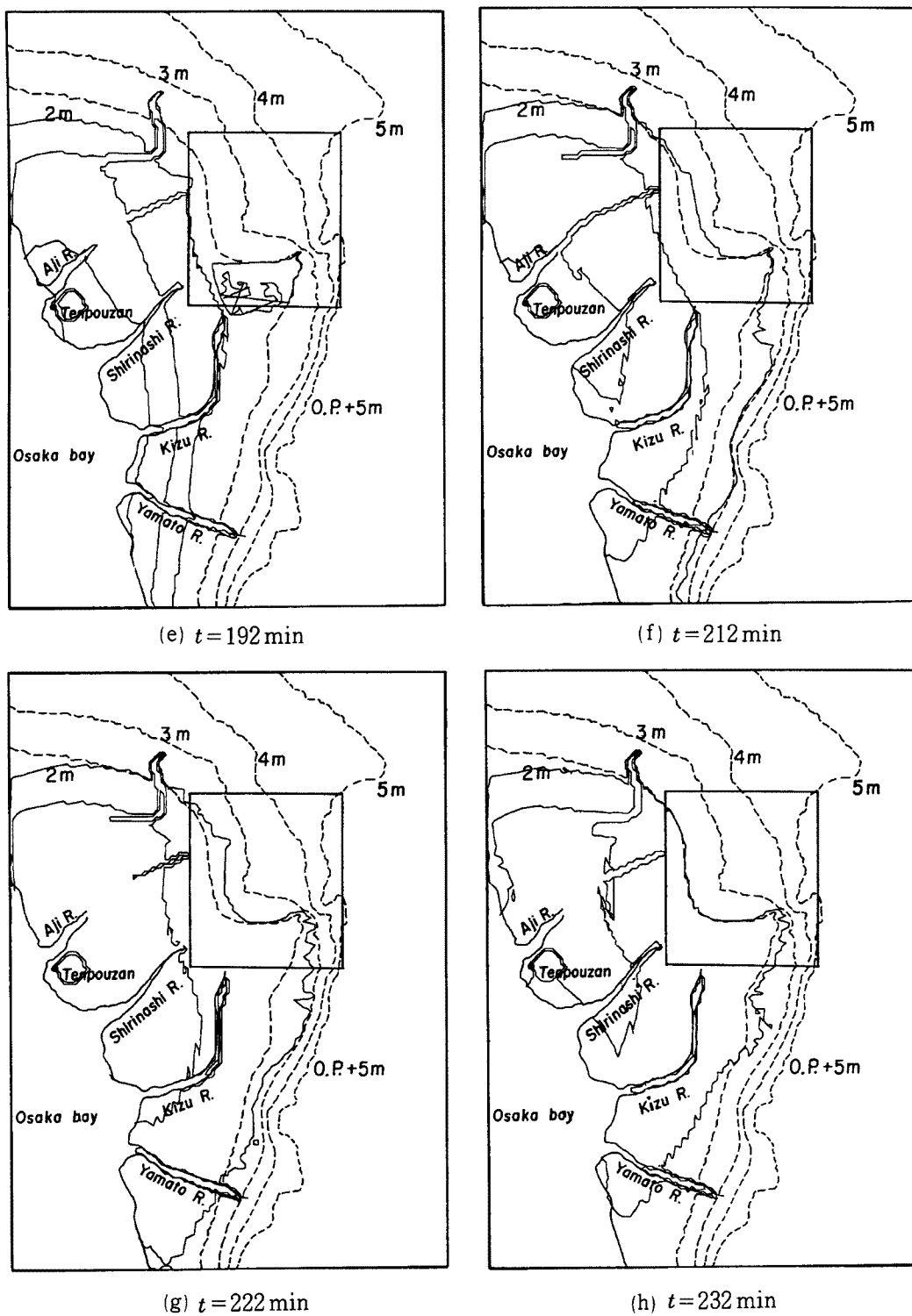


Fig. 22. Time-series of flooding area.

さて、これらの解析から、安治川や木津川河口付近では 10 m/s 近くの流速の発生が認められる。安政津波による船舶被害や落橋箇所の詳細については、第1報で述べたが、このような流速のもとでは、係留中の千石船や北前船が容易に上流に運ばれると考えられる。もちろん、津波の来襲によって水位も上昇しており、これらの条件下では、船などの衝突で落橋したり、狭い堀割への大船の進入も可能と判断される。したがって、数値計算で求めた流速と水位の結果は、これらの被害と十分整合すると結論してよいであろう。

（3）『大坂大津浪図』との比較

Fig. 23 は『大坂大津浪図』による氾濫域と第1報で示した静的な解析から求めた O.P. + 3.1 m の氾濫想定域および今回の氾濫計算による津波の第2波による最大氾濫域の3つを比較したものである。これから、今回の計算結果はほかの2つに比べて浸水域が若干小さいものの、かなりよく『大坂大津浪図』のそれと対応していることが見出される。また、津波の高さ1.9 m までの地盤高まで浸水すると仮定して求めた第1報の結果は、全体的に氾濫域が少し大きくなっているが、いずれともそれほど差が認められない。したがって、近似的には、このような取り扱いによってもかなりの程度、氾濫域が推定できると考えてよいであろう。

氾濫計算の結果が、『大坂大津浪図』の氾濫域に比べて少し小さくなった理由は幾つか考えられるが、それをまとめると、つぎのようになる。

（1）粗度係数の取り方、（2）氾濫原の地形再現の不正確さ、（3）先端条件の設定方法、（4）堤防のない場合の河川からの氾濫水の流入、（5）津波の伝播と氾濫計算の接続方法

以上の諸点を今後、改良する余地があろうが、大局的にはここで示した方法によって、かなり精度よく氾濫域を求めることができることが示された。

これらの結果を総合すれば、大阪の天保山における安政津波の高さは1.9 m であって、その氾濫域は津波の氾濫計算と静的な取り扱いのいずれによっても『大坂大津浪図』のそれとかなり一致することがわかった。したがって、安政津波災害の復元はこれらの方法によって十分行われたと考えてよいであろう。

5. 結 語

ここでは、安政津波の伝播・氾濫計算を行い、大阪における津波災害の復元を試みた。その結果を要約すると、つぎの通りである。

1) 津波伝播の数値計算における摩擦項と移流項の効果を検討した。その結果、前者は海岸付近の水深が浅くなったところでは、とくに考慮する必要があること、また後者については、友ヶ島水道および大阪湾奥付近ではその効果が大きく、無視できないことがわかった。計算の格子間隔については、大阪湾内で1.25 kmあるいは625 mとしたが、いずれについても津波の最大水位上昇量はほとんど変化しないことが見出された。また、友ヶ島水道は格子間隔1.25 kmで5格子にすれば、湾奥で津波の水位上昇量が極端に小さくならず、妥当であることがわかった。

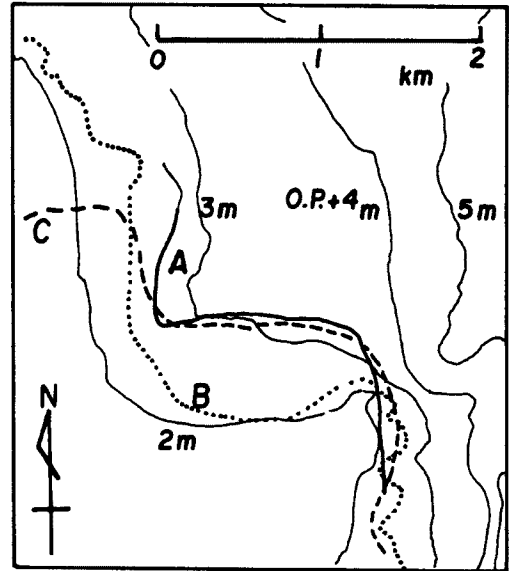


Fig. 23. Comparison of flooding area

(A: Osaka Otsurozu,
B: numerical simulation,
C: analysis of old documents
and letters).

2) 安藤の断層モデルを用いて1946年の南海津波の数値計算を行い、下津および堺における潮位記録との比較から、いずれも下げ潮時において計算値の方が実測潮位より小さくなるほかは、比較的津波の波形がよく一致することが見いだされた。このことから、今回の数値モデルの適用性が確認されたので、相田の断層モデルを用いて1854年の安政津波の伝播計算を行った。そして、その結果の妥当性を明らかにするため、沿岸各地の痕跡高や大阪における史料解析の結果との比較・検討を行った。まず、史料の精度によるランク分けを行い、ランクA(精度の高い史料)に属する津波の高さと計算から求められる最大水位上昇量とはその場所的傾向はかなり一致するものの、後者が前者に比べて全般的に小さくなることがわかった。その原因として、史料は津波のそ上高であって、計算値は水深5~10m地点の津波の最大水位上昇量であって、直接両者の対応が難しいことや、計算における格子間隔と水深の取り方に津波の特性が大きく依存することが指摘された。さらに、今回の伝播計算から、大阪の天保山付近における津波の最大水位上昇量は1.89mとなり、第1報で示した史料解析の結果と非常によく一致することがわかった。

3) 大阪市街地への安政津波の氾濫計算を伝播計算とは便宜上、別個に行うことにし、天保山付近の波高と流速ベクトル値を初期条件として与えて、前者の計算を実施した。まず、氾濫原の地形は、累積地盤沈下量分布図や国土数値情報などを利用して、1854年当時のものを求めた。ついで、氾濫原のマニングの粗度係数を3種類変えて氾濫特性を調べた結果、従来用いられている $n=0.02$ とすれば、 0.025 とした場合と氾濫域の大きさがあまり変わらず、若干の拡大となるので、この値を今回の氾濫計算で用いることにした。その結果、安政津波による最大浸水域はその第2波によって発生し、しかも『大坂大津浪図』に示された氾濫域に比べて少し小さくなるけれども、両者はよく一致することが見いだされた。また、同時に第1報で示した津波の高さに等しい地盤まで浸水するとして得た浸水域(O.P.+3.1m)ともかなり一致することがわかった。しかも、落橋や船舶被害が津波の氾濫水深の場所的分布や安治川および木津川河口付近の流速変化によって十分説明できることが示された。

4) 以上の結果を総合すれば、史料解析と津波の伝播・氾濫解析を通して、1854年の安政南海道津波による災害はよく復元されたといえることができる。

最後に、本研究の遂行にあたり御協力いただいた、大阪市総合計画局および関西西情報センターの関係各位に謝意を表明する。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・河田恵昭：大阪における安政南海道津波の復元(1) —氾濫災害について—, 京大防災研年報, 第29号B-2, 1986, pp. 763-794.
- 2) Mansinha, L. and D.E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, Bull. Seismol. Soc. Amer., 1971, pp. 1433~1440.
- 3) Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan, Tectonophysics, 1975, pp. 119~140.
- 4) Ando, M.: A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data, Phys. of the Earth Planetary Interior, 1982, pp. 320~336.
- 5) 相田 勇：南海道沖の津波の数値計算, 東大地震研究所彙報, Vol. 56, 1981, pp. 713-730.
- 6) 関西国際空港(株)・開発エンジニアリング(株)：大阪湾津波推算調査報告書, 1985.
- 7) 島田富美男・森 泰宏・酒井哲郎：臨海工業地帯沿岸での津波の挙動, 第31回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 228-232.
- 8) 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, 第14巻, 第3号, 1975, pp. 35-58.
- 9) 和達清夫編：津波・高潮・海洋災害, 共立出版, 1970, p. 377.

- 10) 土木学会：水理公式集，1980，p. 625.
- 11) 高知県：南海大震災誌，1949，p. 692.
- 12) 昭和21年南海大地震報告，津波篇，水路要報増刊号，第201号，1948，pp. 1-39.
- 13) 羽島徳太郎：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，東大地震研究所彙報，Vol. 55,1980，pp. 505-535.
- 14) 村上仁士・島田富美男ほか：徳島県浅川に遡上した1946年南海地震津波の挙動とその危険度の評価に関する研究，自然災害科学，Vol. 4, No. 2,1985，pp. 12-26.
- 15) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧，東京大学出版会，1985，p. 206.
- 16) 大坂大津浪図，大坂，江戸時代図誌3，筑摩書房，1976，p. 176.
- 17) 大阪城址研究会：複製実測水準曲線記入大阪市街全図，1953.
- 18) 土屋義人・山下隆男・今塩宏之：水平粗面上での bore front の伝播特性，第34回海岸工学講演会論文集，1987，pp. 192-196.
- 19) 高橋 保・中川 一・西崎文能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究，京大防災研年報，第29号B-2，1986，pp. 431-450.
- 20) 岩佐義朗：高潮及び洪水の氾濫による都市水害とその予測に関する研究，第24回自然災害科学シンポジウム，1987，pp. 11-22.
- 21) 井上和也：開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究，京都大学博士学位論文，1986，p. 237.
- 22) 土屋義人・山下隆男・杉本 浩：高潮氾濫数値モデルの適用性に関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，1984，pp. 218-222.