

徳島市を対象とした津波による流入水の 堤外排水シミュレーション

谷口 純一¹・馬場 俊孝²・三好 学³・安芸 浩資⁴

¹学生会員 徳島大学大学院 (〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1)

E-mail:c501541001@tokushima-u.ac.jp

²正会員 徳島大学教授 建設工学科 (〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1)

E-mail:baba.toshi@tokushima-u.ac.jp

³正会員 ニタコンサルタント(〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西38-2)

E-mail:miyoshim@nita.co.jp

⁴正会員 ニタコンサルタント(〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西38-2)

E-mail:akih@nita.co.jp

本論文では徳島市沖洲地区を対象として、南海地震による津波の堤内地への流入、その後の排水過程をシミュレーションした。堤外の計算は浅水理論によって行い、堤内の計算は地表面、排水路、下水路の三つのレイヤーに分けて、それぞれのレイヤー間で水のやり取りを行いつつ、水の流れを計算する。最終的に、排水ポンプによって堤外へ排出される。安政南海地震を対象として、排水ポンプすべてが健全とした計算では、津波で流入した海水の大部分の排水に約16時間を要した。排水ポンプのうち排水機能が高い上位3つを停止させると、流入した水の大部分の排水完了まで約72時間かった。また、内閣府想定の場合3を対象とした場合、地殻変動による沈降が大きいため、一部境界より朔望平均満潮位のほうが高くなり、津波襲来後もそこから海水が流入し続けた。

Key Words : drainage, tsunami, disaster prevention, Nankai Earthquake

1. はじめに

長期湛水は、津波によって流入した海水が長期に渡り陸地に留まる現象である。2011年の東北地方太平洋沖地震では、沿岸部で大規模な湛水が発生し問題となったり。この時はポンプ車を各地に配置し排水を行ったが、湛水の規模が非常に大きかったため1か月経っても完全に解消はされなかった。湛水した地域では救助、捜索活動や物資輸送が難しくなり、また復旧作業の大きな障害となった。このように長期湛水は地震発生後の様々な対応を大きく妨げる要因となるもので、何らかの対策が必要である。

近い将来起こるとされている南海トラフを震源とする地震によって津波の被害が懸念されているが、過去の記録によると、南海地震の中では比較的規模の小さい昭和南海地震でも高知市では長期湛水が発生している²⁾。昭和南海地震の際は徳島市では浸水被害が記録されているが、現在では当時より河川堤防の整備が進んでおり、同程度の地震で同様の被害が起こる可能性は低くなった。しかし、昭和南海地震より大きな規模の地震が起こった際、堤防を越えて海水が流入する可能性がある。堤防を越えて海水が入ってきてしまうと、今度は堤防があるがゆえに堤外へ流出しなくなるため、長期湛水が起こる可

能性があり、検討が必要である。またこの長期湛水は、徳島に限らず津波の被害の可能性があり低地に位置する大阪や名古屋といった、多くの都市で共通する重要な課題である。

しかし、長期湛水について津波の流入から排水までの一連の現象をシミュレーションにより予測した例はない。そこで本研究では徳島市沖洲地区を対象に、長期湛水がどのように解消されるかを明らかにすることを目的として、津波の流入・排水のシミュレーションを実施した。

2. 計算方法

(1) 計算の全体像

計算は、堤外と堤内を分けて行う。まず、通常の津波の計算により対象地域の堤外周辺での水位時系列を記録する。これを境界条件として堤内の計算を行う。津波の高さが堤防高を超えた場合、堤内に水を流入させる。堤内地では、地表面、排水路、下水路の三つの流れを考える。地表面では津波と同様の計算方法を採用するが、排水路やマンホールを設定したメッシュで地表面、排水路、下水路のそれぞれの間で水のやり取りを行う。最終的には排水路に存在する排水ポンプで領域外へ排水する。図-1は一連のシミュレーションの流れを示したものである。

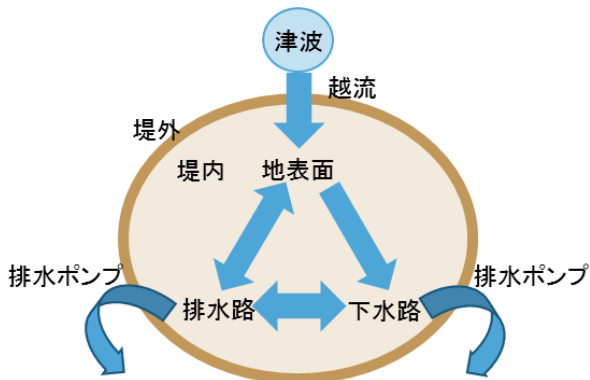


図-1 計算の概要図

(2) 堤外の計算

堤外の津波の計算は浅水理論で行う。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 η は静水面からの水位変化、 q_x, q_y はそれぞれ x, y 方向の単位幅あたりの流量、 D は全水深、 g は重力加速度、 n はマンニング粗度係数である。

(3) 堤内の計算

堤内の計算には、AFREL(Application of Flood Risk Evaluation)を使用した。このソフトウェアは雨水の排水の計算に利用されているものである。三好ら³⁾は、このソフトウェアを用いて徳島市上八万地区で台風による豪雨と、それに伴う河川氾濫が生じた際の再現計算を行っており、観測された10点の浸水位とシミュレーション結果の差はこれらの点についてはすべて0.10m以内に収まっていることを確認している。

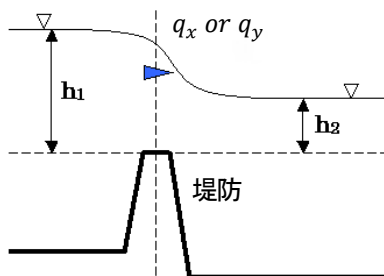


図-2 津波の堤内地流入時の流れ

本稿では河川氾濫のシミュレーションと同様に、津波波形を入力することによって津波による氾濫を表現する。津波が堤防の高さを越えた時、図-2のように、越流公式⁴⁵⁾によって堤内地に流入させる。(y方向も同様である)

$$\begin{cases} h_2 < \frac{2}{3}h_1 \text{ のとき, } q = \pm 0.35h_1\sqrt{gh_1} \\ h_2 \geq \frac{2}{3}h_1 \text{ のとき, } q = \pm 0.91h_2\sqrt{g(h_1 - h_2)} \end{cases} \quad (3)$$

なお、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速である。

流入後の堤内地での地表面、排水路、下水道の各レイヤーの計算は以下のとおりである。

a) 地表面

堤内地の流れは、前述の浅水理論で行うが、連続式が以下の形になる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_{CHAN} + q_{SEWER} \quad (4)$$

ここで、 q_{CHAN} は排水路との流量のやり取り、 q_{SEWER} は下水道との流量のやり取りを示している。

b) 排水路

排水路は座標軸方向にのみ走っているものとみなし、メッシュの中心を通るものとする。排水路を設定したメッシュでは、越流公式によって地表面レイヤーと流量のやり取りをする(図-3)。計算は(3)式を利用する。なお、排水路内の流れは数値安定性向上のため(2)式の移流項を無視した形で行う。

c) 下水道

下水道も排水路と同様に座標軸方向にのみ走っているものとみなし、メッシュ中心を通るものとする。地表面と下水道の水のやり取りは、マンホールを設定したメッシュで行う。次の越流公式を利用する。

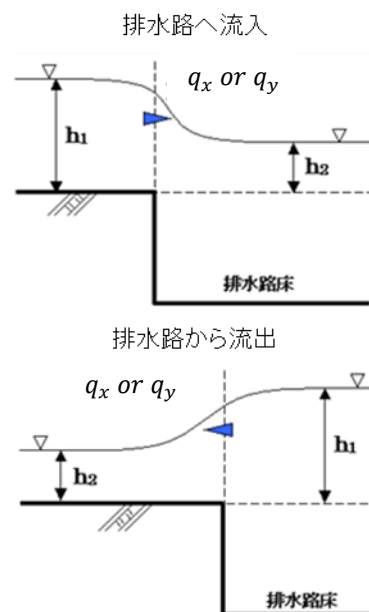


図-3 排水路と地表面の水のやり取り

$$q = \frac{2}{3} h \sqrt{\frac{2}{3} gh} \quad (5)$$

ここで、 h はマンホールのあるメッシュの水深である。下水管路内の計算は数値安定性のためスロットモデルを採用した。

d) 排水ポンプ

排水ポンプは設置したメッシュから指定先メッシュへ排水能力分だけ流量を移す形でモデル化している。

3. 対象地域のモデル化

対象地域は、徳島市沖洲地区とした(図-4)。この地域は標高が低く、周囲に河川や海があるため、全体を堤防で囲まれている。この堤防の高さは吉野川に面する北側と海側である東側は5m程度だが、南側と西側は2m程度であり、また南側には堤防が存在しない箇所がある。また、全体的にやや南側の標高が高く、北側が低くなっている。したがって南海トラフで地震、津波が発生すると、この地域では堤防が低い南側から水が入り、その後北側へ流れ、吉野川沿いの堤防周辺で水がとどまることが予想される。

図-5は対象地域である徳島市沖洲地区にこのモデルを適用したものである。図内の各数値は排水機場の排水能力を示している。地形データは南海トラフの巨大地震モデル検討会⁹⁾が示した津波計算用の地形データの作成方法に合わせて徳島県が作成したもの、下水路と排水機場は徳島市より頂いたデータ、排水路は現地で測量したデータを用いた。

計算は2章で示したものを空間についてはスタガード格子を用いて陽的に、時間については leap-frog 法で差分化した。津波の計算は JAGURS⁷⁾を使用し、対象地域の地形の水平分解能を10mとして、計算時間は地震発生か

ら12時間、計算ステップは0.2秒とした。対象とした地震は安政南海地震⁸⁾と、内閣府想定の場合3⁹⁾の2種類である。安政南海地震は、地殻変動を Okada(1985)の方法⁹⁾で計算し、初期水位はこれをライズタイム60秒で与えた。内閣府想定の場合3は10秒ごとの破壊伝播を

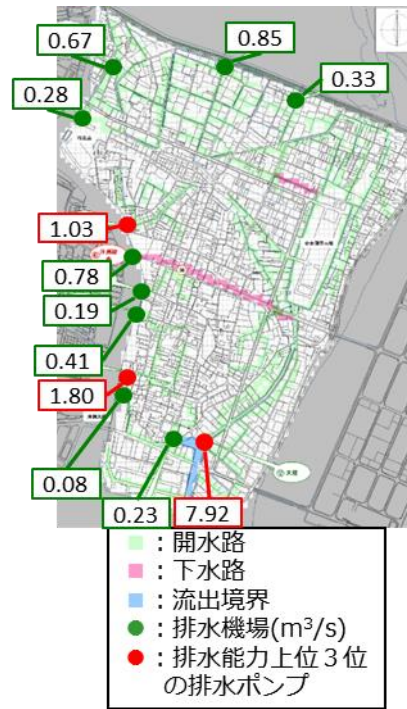


図-5 沖洲地区の排水モデル

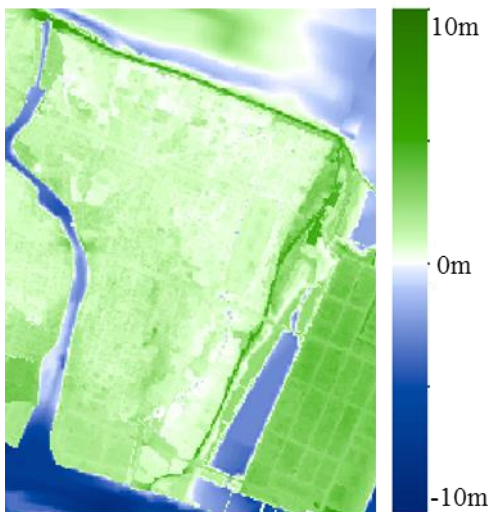


図-4 沖洲地区の地形



図-6 津波波形出力ポイント

考慮した初期水位データを用いた。図-6は堤内の計算の境界条件として用いる波形の出力ポイントを表しており、各ポイント間の津波による水位変化の時系列は線形補間により生成した。

堤内の計算は、地形の水平分解能を 25m、計算ステップを 0.01 秒として計算を行った。津波は地震発生後 12 時間後には堤防の高さをほとんど超えなくなるため、津波の入力は 12 時間分であるが、排水のシミュレーションは 72 時間分実施した。なお、潮汐の変動は考慮せず、潮汐は過去 5 年の朔望平均満潮位である 92.1cm で固定して計算した。

4. 計算結果

安政南海地震を入力とした場合の徳島市沖洲地区の排水のシミュレーション結果を示す。図-7は排水ポンプがすべて稼働する場合と、排水ポンプの排水能力が高いもの上位3つを停止した場合の津波による流入水の排水の様子である。この地域では南海地震の場合、地震発生後約40分で津波の第一波が南東方向から到着する。その後、堤防の低い南側、西側から水が流入して、土地の低い北側へ流れていく様子が見られる。ポンプがすべて稼働すると仮定した場合は、排水能力の高いポンプは堤防の低い南側と西側にあるため、奥へ水が流れ込む前にいくらか排水でき、北側、東側の堤防沿いに溜まる水の量がポンプの一部を止めた場合より少なくなっている。図-8はそれぞれのケースの時間ごとの浸水量、浸水面積の変化を示している。すべてのポンプが稼働すると仮定した場合、

約16時間で排水がほぼ完了するが、いくらかは窪地に溜り、現モデルでは排水できない。排水能力上位3つのポンプが稼働しないと仮定すると、排水完了まで約72時間かかる。上位3つのポンプが大きな仕事をしていることがわかる。

次に、内閣府想定の場合3を入力とした場合を図-9に示す。1 時間後では対象地域の南側から大規模な津波の浸水が確認でき、その後地域全域が浸水する。これは、非常に大きな地震であるため、地殻変動による沈降量が大きく、一部境界が朔望平均満潮位より低くなることによると考えられる。そのため、津波の計算を終えた 12 時間後以降は排出した分だけ堤内に水が入ってくるという結果となり、24 時間後の状態がその後も続く。潮汐の変動を考慮していないため、実際にこのようなことが起こるとは言えないが、内閣府想定のような大きな地震が起こると、潮汐の変化に伴い大規模な湛水が起こる可能性を示唆している。

5. まとめ

徳島市沖洲地区を対象として、津波による流入水の排水のシミュレーションを行った。その結果、安政南海地震を入力とした場合、ポンプがすべて稼働するとすると、約 16 時間、排水能力の高い上位 3 つのポンプが稼働しないとすると、約 72 時間排水完了までかかることが分かった。また、内閣府想定の場合3では、地殻変動が大きく、南側の堤防が朔望平均満潮位より低くなってしまい、常に水が流入する結果となった。

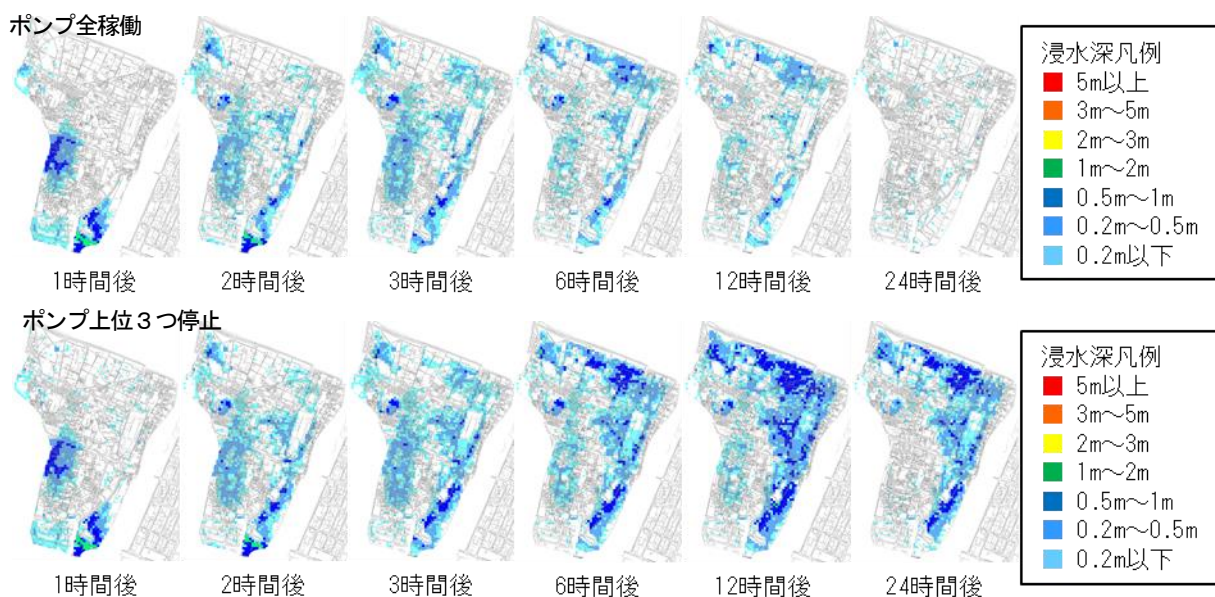


図-7 安政南海地震による津波の流入、排水の様子

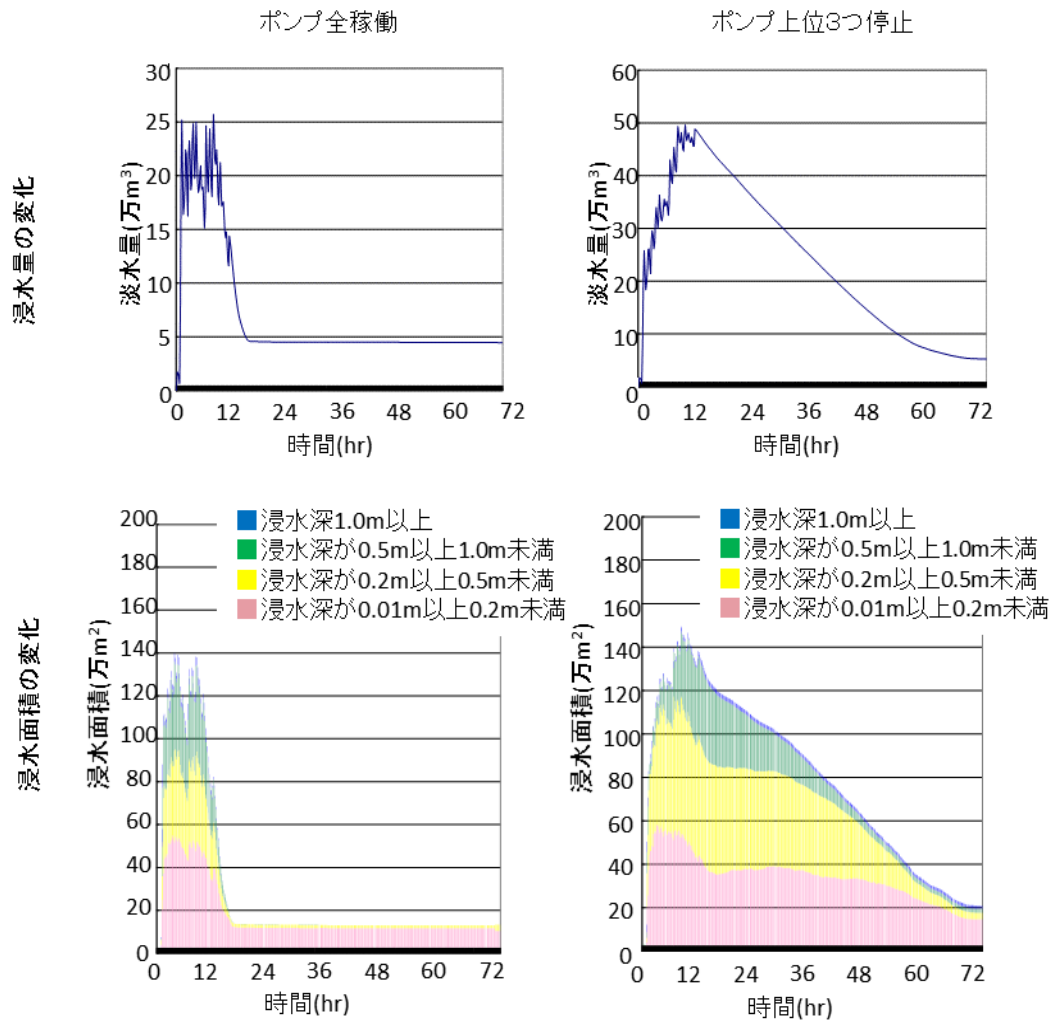


図-8 安政南海地震による津波の流入水の変化
 上段は浸水量，下段は浸水面積の変化を示している

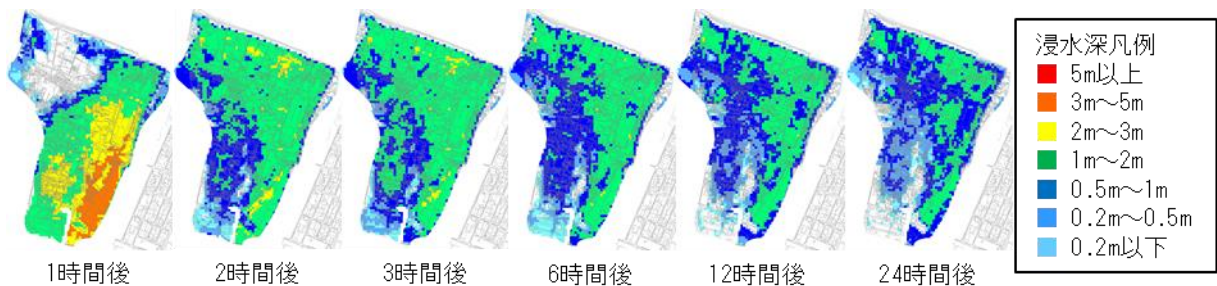


図-9 内閣府想定ケース3の南海地震による津波の流入，排水の様子(ポンプ全稼働)

今後の課題の一つとして、潮位の変動を考慮することが挙げられる。これによって今回の内閣府想定の場合3を入力とした場合のような際に、潮位の変動に応じた堤内の水の流れをシミュレーションできるようになる。他に、瓦礫によって排水路や下水路が詰まってしまった場合の検討や、津波が下水路をさかのぼってマンホールから水があふれる現象も考える必要がある。しかしながら、長期湛水の排水のシミュレーションの第一歩として一定の成果を得ることができた。

さらに、これらの排水ポンプは本来は雨水の排水を対

象に作られているため、海水に対しても同様に働くのか、また耐震性や停電時の補助電源の確保などの課題もあると考えられる。今後はそれらも踏まえて、調査研究を進めていく。

謝辞：徳島県には計算に使用しました地形データを提供していただきました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東北地方整備局：津波による湛水は92%解消しま

した ～緊急排水対策は最終段階へ～，
http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/kisya/saigai/images/34655_1.pdf，参照 2016-5-26.

- 2) 三神厚，辻野典子：1946 年昭和南海地震による高知市の河川堤防被害とその要因，歴史地震，vol. 27，pp. 27-39，2012.
- 3) 三好学，田村隆雄，安芸浩資，藤田真人：徳島市上八万地区における降雨量と内水氾濫による浸水被害との関係，土木学会四国支部平成 25 年自然災害フォーラム論文集，PP69-77，2013.
- 4) 本間仁：低溢流堰堤の流量計数，土木学会誌，Vol26，No.6，pp635-645，1940.
- 5) 本間仁：低溢流堰堤の流量計数，土木学会誌，Vol26，No.9，pp849-862，1940.
- 6) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，

<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>，参照 2016-5-26

- 7) T. Baba, N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and T. Kato: Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, Pure and Applied Geophysics, Vol. 172, pp3455-3472, 2015.
- 8) 相田勇: 南海道沖の津波の数値実験. 地震研究所彙報 56 号, pp. 713-730, 1981.
- 9) Y. Okada: Surface deformation due to shear and tensile faults In a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154, 1985.

(2016.3.16 受付)

A SIMULATION OF DRAINAGE OF INFLUENT WATER CAUSED BY TSUNAMI AT TOKUSHIMA.

Junichi TANIGUCHI, Toshitaka BABA, Manabu MIYOSHI and Hiroshi AKI.

This paper simulates drainage of influent water caused by tsunami of the Nankai earthquakes. The target area is Okinosu, Tokushima. To simulate inland water flow, we attempted 3 layers model, which is composed of ground, channel, and sewer. These 3 layers exchange water each other. Finally, water is drain to foreland by drainage pumps. In a simulation using the Ansei Nankai earthquake source model as input, if all drainage pumps works, the drainage finish about 16 hours after the earthquake. But, some water is not drained because of sunken place. If pumps that are top 3 of the drainage capacity don't work, the drainage finish about 72 hours after the earthquake. In this case, water which is not drained is increased. In a simulation using case 3 of Cabinet Office earthquake source models as input, because of big displacement in this area, certain boundary area becomes lower than sea level. So, water comes inland always.