

(20) 水道水源としての取水に及ぼす津波遡上の影響

Effect of Tsunami Run-up on Intake Water Quality in a River

佐藤広章*, 村上仁士, 上月康則, 倉田健悟

Hiroaki SATO*, Hitoshi MURAKAMI*, Yasunori KOZUKI*, Kengo KURATA*

ABSTRACT ; The effect of tsunami run-up on the intake water in a river was estimated. Particularly, the salinity rise of river by tsunami run-up was investigated. The tsunami propagation at the onshore and offshore was calculated. The distribution of salinity density after tsunami disaster in the river was presumed by BOX model in which the tsunami elevation and the velocity taken by tsunami run-up calculation at the river were used. If the salinity density is more 200 ppm, the river water will not be able to take and supply in Japanese standard. The time of intake stop will be greatly influenced by the river flow. When the river flow was slow, the tsunami runs up to the upper reaches on the river, and conveys much salinity flow into the river.

KEY WORDS ; Tsunami, Tsunami run-up, Salinity rise of river, Intake water quality

1. 緒論

2001年9月、政府の地震調査委員会は、次の南海地震は今後30年以内に40%、50年以内に80%の確率で発生し、その規模は過去最大規模のM8.4になると発表した。これを受けて、沿岸域の市町村では、次の南海地震・津波に対する防災計画の見直しを始めている。しかしながら、そのほとんどが、津波浸水ハザードマップを基に避難所・避難経路の設定や津波防波堤の効果を検討するにとどまっている。それ自体緊急の課題であるが、環境という視点に立てば、陸上に氾濫した津波による湿地や田畑への大量の海底土砂の堆積、塩水化による生態系の破壊など新しい問題が懸念される。また、身近な住民生活においては、上下水道の機能停止なども見過ごせない。潮止めの堰を持たない河川を津波が遡上する場合には、河川の塩水化を防ぐことはできない。河川敷周辺には耐塩性の低い動植物が生息している場合がある。また、河川の下流部から水道水を取水している市町村においては、こうした河川が塩水化すれば、河川流による塩水の吐き出しが取水口に及ぶまでの間、取水を停止せざるをえないため、その間断水する恐れがある。

本研究では、上述した環境問題解決の糸口として、津波防災意識の高いことで知られるT県K町を流れる二級河川K川を対象とし、津波災害時の河道内における塩素イオン濃度分布とその時間変化を予測し、津波災害が自然環境や住民生活に及ぼす影響を定量的に評価することを目的としている。

2. 津波伝播計算

2. 1 支配方程式と境界条件

水深に対して波長が大きい波は長波と呼ばれ、鉛直方向の流速を無視し、鉛直方向に積分された長波理論

*徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻 (Ecosystem Eng., Tokushima University)

式が適用できる。南海地震の震源となる南海トラフ沿いの水深は数 km であるのに対し、発生する津波の波長は数百 km にもなることから、これを長波として扱うことができる。ここでは、河川を遡上する津波の伝播計算まで実施することから、式(1)～(3)に示す波の非線形性を考慮した非線形長波理論（浅水波理論）式を支配方程式として用いる（後藤ら、1982）。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_c \frac{MQ}{D^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_c \frac{NQ}{D^2} = 0 \quad (3)$$

ここに、 η ：水面の鉛直変位量、 $D = \eta + h$ 、 h ：静水深、 $M = uD$ 、 $N = vD$ 、 (u, v) ： (x, y) 方向の流速、 $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ 、 g ：重力加速度、 $f_c = gn^2 D^{-1/3}$ 、 n ：マンニングの粗度係数である。

数値計算における差分スキームは、空間差分には水位計算点と流量計算点が1/2格子分だけずれたスタガード格子を用い、時間差分には中央差分であるリーブ・フロッグ法を用いた。

計算では、海岸護岸を無限の鉛直壁と考え、完全反射とした。また、計算領域外へと抜ける場合の沖側の境界では、自由透過を考慮した。また、差分方程式において、数値計算を安定に進めるための条件として、式(4)に示すクーラントの条件に従うものとして、計算格子間隔 Δs と時間間隔 Δt を設定した。なお、 $h_{\max}$ は、計算領域中の最大水深である。

$$\frac{\Delta t \sqrt{2gh_{\max}}}{\Delta s} \leq 1.0 \quad (4)$$

2. 2 計算領域と計算条件

図-1に、ここで対象とした計算領域を示す。また、表-1には、計算条件を示す。津波の計算では、地盤変動領域を含む非常に広い範囲を対象領域とする必要がある。これに対して、水深は数 km ～陸上 (10m 程度、鉛直下向を正) と大きく変動することから、水深に対応して計算格子の異なる複数の水深データを作成し、それらを接続しながら津波の伝播計算を実施するのが一般的である。ここでは、最も水深の深い外洋を計算領域①とし、遡上領域に向かうに従って計算格子と対象範囲を狭め、最終的には計算領域⑥において、T県K川の河口から上流までの津波遡上計算を実施した。ただし、河川堤防は無限の鉛直壁とし、堤内地への津波の陸上遡上はないものとした。

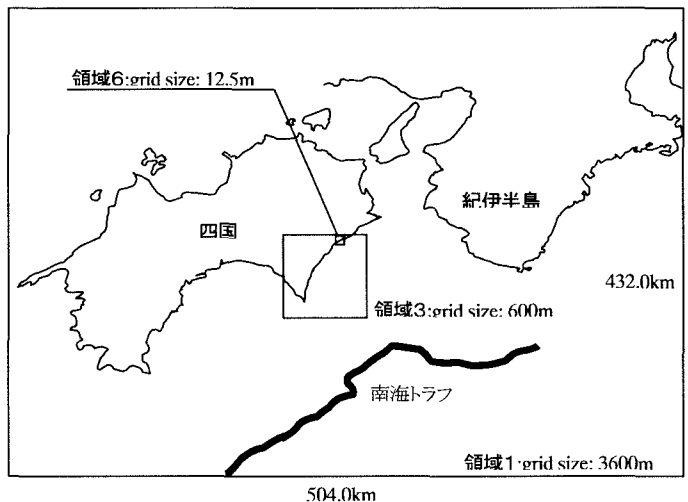


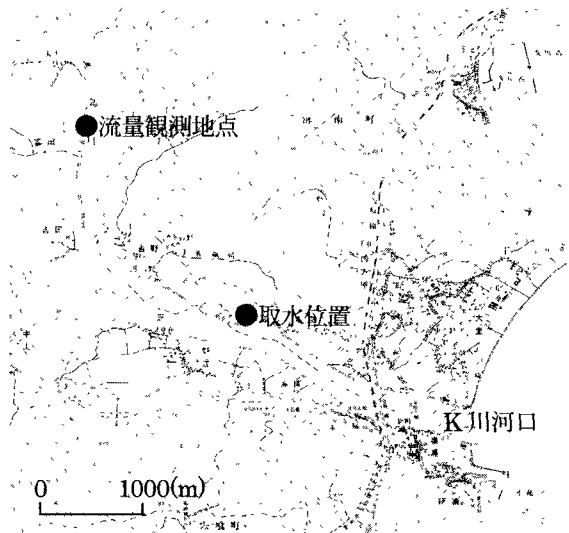
図-1 計算領域

表－１ 計算条件

領域	領域1	領域2→3→4→5	領域6	
計算格子間隔	3600m	1800m→600m→200m→50m	12.5m（遡上計算）	
沖側境界条件	自由透過	隣接する領域との接続		
底面摩擦係数	0.025(マニング数)			
計算潮位	T.P.+0.0m			
波源モデル	1854年安政南海地震－相田モデル(Model20')－			
計算時間間隔	0.6sec（再現時間4時間）			

2. 3 K川の現状

図－2に、K川周辺の現況図を示す。K川は河口が太平洋に面した二級河川であり、河口の幅は約250mと比較的広い。河川の特徴として、河口から約3.5km上流部で河道は大きく湾曲し、河床勾配も急峻になることがあげられる。また、河口から約2.5km付近では、地下伏流水をくみ上げ、これを浄水処理した後に山頂の配水施設を介して、周辺住民の生活上水を供給している。したがって、たとえ河川が塩水化しても、上水には地下水を使用することから、大きな影響はないと予想される。しかしながら、津波が遡上する恐れのある河川は無数にあり、それらの全てが地下水を利用してはいるわけではないため、そこで、K川においても、直接河川から上水を取水していた場合を想定することとする。



図－2 K川現況

2. 4 K川における津波の河川遡上計算

一般に、津波の河川遡上計算では、河川の河床高は考慮されるものの、河川を流れる流量は無視される。しかしながら、河川流による塩素イオン濃度の希釈を考慮する必要があるため、本研究では、津波の遡上計算に河川流量を考慮することとした。

すなわち、K川の上流から常時一定の河川流量を与え、水面が定常になったことを確認した後に津波を発生させた。用いる河川流量には、平水と洪水を考慮し、河川流量の変化が津波の遡上に及ぼす影響について比較検討した。ただし、K川では定期的な流量観測が行われておらず、平水・洪水流量を特定できなかったため、河口から約6.0km上流の神野橋において、平成11年8月～平成12年7月の1年間に月2～3回の頻度で不定期に実施された流量観測結果を参考として、検討ケースを決定した。表－2には、その観測結果をまとめる。観測期間中の平均流量は $8.07\text{m}^3/\text{s}$ であり、これをK川の平水と仮定し、ケース1とした。洪水については、観測期間中の最大流量は $41.66\text{m}^3/\text{s}$ であるが、これでは平均流量との差があまり小さくなく、津波遡上計算結果に顕著な変化が見られないこと、観測期間外では、これ以上の流量が流れてる可能性も十分考えられることから、観測期間中の最大流量をそのまま用いるのではなく、その約2倍の流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ （ケース2）と約10倍の流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ （ケース3）を想定した。

表－2 流量観測結果

観測期間	平成11年8月25日～平成12年7月28日
観測データ数	31（月2～3回程度実施、不定期）
平均流量	$8.07\text{m}^3/\text{s}$
最小流量	$0.70\text{m}^3/\text{s}$
最大流量	$41.66\text{m}^3/\text{s}$

図-3に、K川の河口における計算津波波形の一例を示す ($Q=8.07\text{m}^3/\text{s}$)。津波は、まず引き波から始まり、10分後には押し波に転じた後、さらにその10分後には第一波のピークを迎える。結局、この第一波が最大波となり、そのときの最大水位はT.P.+5.0mとなる。K川周辺の地域における津波痕跡調査結果(村上ら, 2002)を見れば、場所的なばらつきは見られるものの、1854年の安政南海地震津波では、陸上に遡上した津波高は3.0m~8.0mであったという調査結果が得られており、また、K川河口は、岬による遮蔽効果が若干期待される地形であることを加味すれば、河口における最大津波水位T.P.+5.0mはほぼ妥当な結果であると考えられる。なお、K川は太平洋という無限の海域に河口を有することから、河口から流れ出る河川流量が変化しても、河口水位はほぼ海面レベル(T.P.+0.0m)に等しくなる。したがって、河口における津波波形もまた、河川流量による変化は小さく、 $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ および $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ のケースにおいても、河口における津波波形は、図-4とほとんど同じとなる。

図-4に、河道内における津波の最大水位の空間分布を示す。河川流量が増えれば、定常水位も上昇し、これにつれて最大津波水位もまた上昇する。しかしながら、いずれにおいても、約3.5km付近までしか津波は遡上しない。この理由として、この付近を境に河床勾配が急になるため、津波は遡上せずに減衰してしまうものと考えられる。また、上水の取水施設のある2.5km地点は、河床高はほぼT.P.+0.0mに近く、かろうじて感潮区間からははずれる地点であるが、ひとたび津波が河川を遡上した際には、2~3m程度水位が上昇し、海水が浸水する結果となる。また、これより上流では、通常は淡水域であり、耐塩性にあまり優れていない動植物が生殖している可能性がある。今後は、これらに対する生息分布調査を行い、塩水遡上による被害が生じると考えられる種について整理する必要があると考えられる。

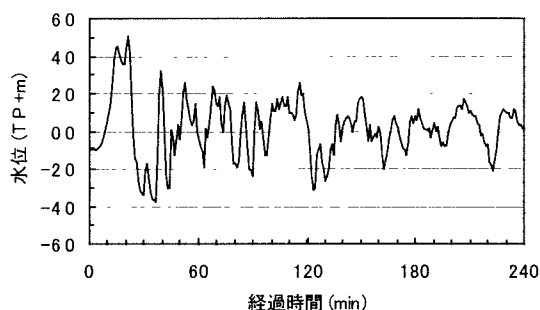


図-3 K川河口における計算津波波形

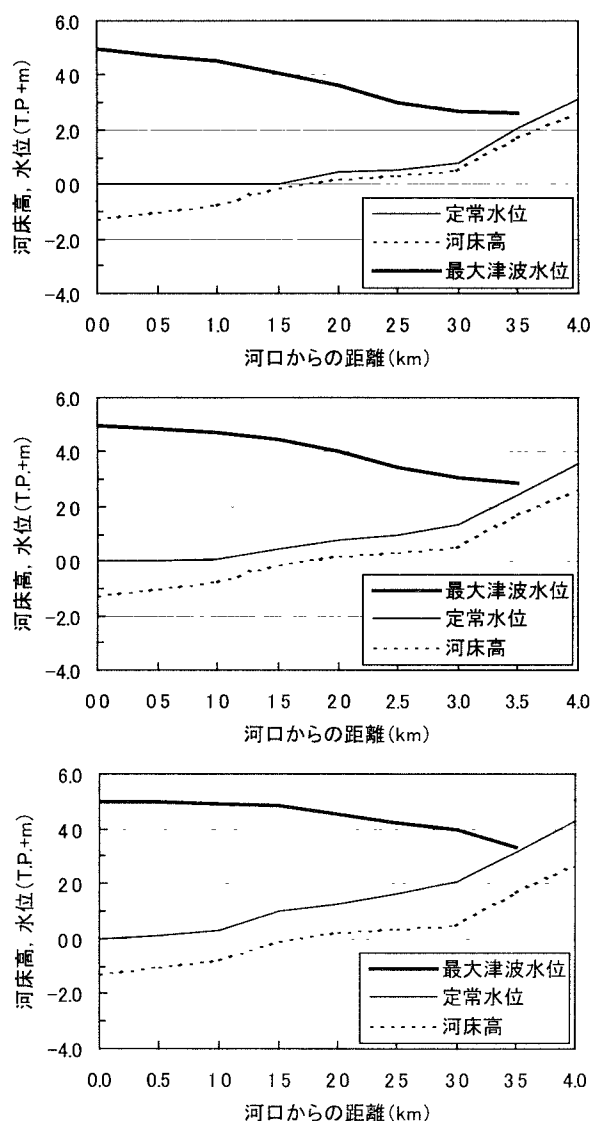


図-4 最大津波水位の空間分布

3. 塩素イオン濃度の追跡計算

3. 1 計算条件

河川を遡上する津波により、海水中の塩素イオンが河道内に流入する。計算では、K 川の河口から順に河道を 500m 間隔で分割し、それぞれの横断線の中点における計算津波水位と流速を 1 分間隔で出力した。津波の場合、特に浅海域においては、水深方向にほぼ一様の流速分布を示す事、および計算の簡略化を考慮して、ここでは、津波と共に河川を遡上する海水と河川上流から流下する淡水とは強混合すると仮定し、津波遡上計算結果に加えて、500m 間隔で分割した河川の断面形状(面積)と体積を求め、BOX モデル(合田、1985)を用いて、下流から上流へと移流・拡散する塩素イオン濃度の追跡計算を行った。このときの塩素イオン濃度の境界条件は、上流端を 0‰(淡水)、下流端を 33‰(塩水)とした。また、流量の境界条件として、上流端に河川流量 (100m³/s, 500m³/s, 流下)、下流端に河口での津波流量(遡上)を与えた。なお、1(‰)=1/1.81×1000(ppm)と換算している。

3. 2 塩素イオン濃度の空間分布と被害の継続時間

図-5 は、取水施設前面における津波水位と塩素イオン濃度の時間変化(Q=100m³/s)を示したものである。津波は地震発生からおよそ4時間程度でほぼ収束し、その間に断続的に押しと引きが繰り返される。塩素イオン濃度は、津波の第一波(最大波)来襲とほぼ同期して最大値を示し、およそ 800ppm に達するが、津波が減衰するにしたがい、その濃度は徐々に河川流によって希釈される。水道水として使用できる塩素イオン濃度は 200 ppm 以下であり、図-5 から津波来襲と同時に上昇した塩素イオン濃度がこの基準値を下回るのには、地震発生からおよそ 17 時間後であることがわかる。施設によって異なるが、空になった配水池の補填には、数時間を要することから、K 町に再び水道水が配水されるのは、早くとも地震発生からほぼ1日が経過した後であると推定される。もっとも、取水を再開するには、塩水の他に濁度、海底のヘドロに含まれるマンガン等のさまざまな有害物質の遡上等をも考慮する必要があるため、取水の停止時間はさらに延びることは十分考えられる。

津波来襲時には、近隣の自治体も被災していると考えられ、外部からの物資供給にどれくらいの時間を要するかは定かではない。したがって、断水の継続時間を推定し、不足するであろう水道水量を事前に把握することは、自主防

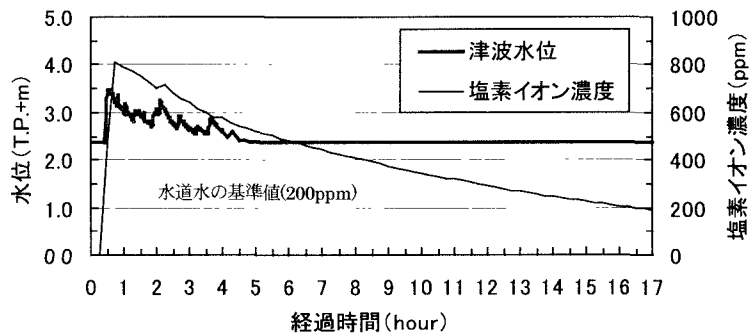


図-5 上水取水施設前面における塩素イオン濃度

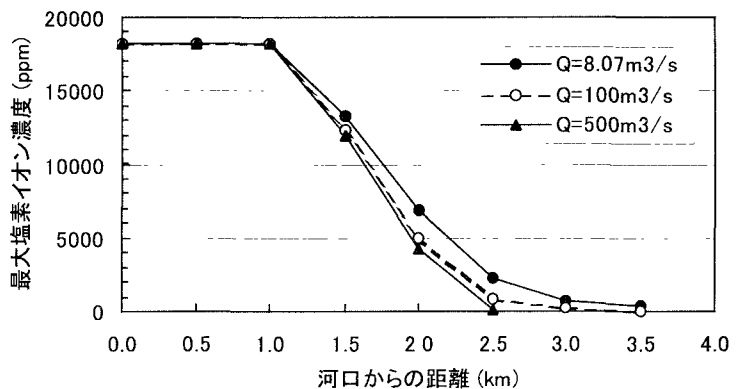


図-6 最大塩素イオン濃度の空間分布

災上大いに役立つものと考えられる。なお、「H11 年度日本の水資源」では、1人当たりの平均的な水の使用量は約 355 リットル/日とされている。

図-6 には、河道内における最大塩素イオン濃度の空間分布を示す。図-4 で示した最大津波水位の空間分布と比較すれば、河川流量が増加するにしたがって津波水位も上昇するが、その反面、塩素イオン濃度は河川流によって希釈されるため、逆に減少する。したがって、津波遡上に伴う取水停止被害が最大となるのは、河川流量が少ない時期であるといえる。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 通常は無視される河川からの流下流量を考慮し、津波の河川遡上計算を行った結果、河川流量の増加に伴って津波水位も上昇することが確認された。
- (2) 最も簡単な BOX モデルを用いて河道内を移流・拡散する塩素イオン濃度の空間分布を推定することができた。津波の河川遡上に伴い、河道内もまた塩水化するが、津波水位とは逆に、河川流量が増加すれば河道内の最大塩素イオン濃度は低下する。したがって、河川の塩水化による取水停止被害が最大となるのは、河川流量が少ない渇水期であり、こうした時期に頻発している南海地震津波に対して十分な注意が必要であると考えられる。
- (3) 特定点における塩素イオン濃度の時間的変化を推定することができた。取水口前面において、海水化した河道が、上流からの河川流量によって再び淡水化するまでに要する時間を推定することで、再配水までの所要時間と、水道水の不足量を推定することができた。

今後は、河川敷における動植物の生息特性を調査し、津波災害が自然環境に及ぼす影響について評価していきたい。

謝辞

K 川周辺の地形データの作成および浄水施設に関する資料整理を行うに当たり、多大なご協力をいただきました徳島県海南町の川野駿氏（現海部町消防組合消防長）、東谷一郎氏に深く感謝の意を表します。また、本研究は、科学研究費基盤研究(C)（代表者：村上仁士）による研究の一部であることを明記し、謝意を表する。

参考文献

- 合田健編著：水質環境科学，丸善株式会社，pp. 375-380，1985。
- 後藤智明・小川由信：Leap-flog 法を用いた津波の数値計算法，東北大学土木工学科資料，1982。
- 岩崎敏夫・真野明：オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算，第 26 回海岸工学論文集，土木学会，pp.70-74，1979。
- 相田勇：南海道沖の津波の数値実験，東京大学地震研究所彙報，Vol.56，pp.713-730，1981。
- 村上仁士・島田富美男・山本尚明・上月康則・佐藤広章：四国沿岸域における歴史津波の浸水高評価，月刊海洋，号外 No.28，pp.61-72，2002。