

巨大津波発生時の淀川における化学物質拡散予測に関する2DH-3Dハイブリッド解析

田窪 亮介¹・米山 望²・伊藤 理彩³・東海 明宏³

2DH-3D hybrid numerical analysis of the chemical substance transport in Yodo River during a huge tsunami attack

Ryosuke TAKUBO¹, Nozomu YONEYAMA²,
Lisa ITO³ and Akihiro TOKAI³

Abstract

In the event of an earthquake in the Nankai Trough, chemical substance may leak from the facilities and flow out into the Yodo River. One of the problems is the water intake trouble due to chemical substance distribution and contamination of the water in purification plants as the Tsunami runs up the river over the barrage. In this study, the chemical substance transport was analyzed by 3D density current analysis method and the influence on water intake was examined in Yodo River during a Tsunami attack. As a result, the quantity of chemical substance reaching the plant was predicted. Moreover, it was evaluated that water intake may be affected. In conclusion, Analysis by this method was proven to be necessary to predict accurately chemical substance behavior due to river run-up Tsunami.

キーワード：津波，化学物質，三次元密度流，浄水場

Key words: tsunami, chemical substance, 3D density current, water purification plant

1. はじめに

平成23年3月に発生した東日本大震災では、地震や津波によって多くの人命が奪われただけでなく、社会基盤施設にも甚大な被害が発生した。そ

の際、化学物質を取り扱う事業所から河川へ化学物質の流出も確認された¹⁾。

河川に化学物質が流出すると、周辺住民の健康被害や環境汚染など様々な影響が懸念される。そ

¹ 京都大学工学研究科都市社会工学専攻
Department of Urban Management, Graduate school of Engineering, Kyoto University

² 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

³ 大阪大学工学研究科環境エネルギー工学専攻
Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering Graduate School of Engineering, Osaka University

本報告に対する討議は2022年2月末日まで受け付ける。

の影響の1つとして浄水場取水口に化学物質が混入することによる取水障害が挙げられる。平成24年5月には利根川水系で、多量のHMTを含んだ処理排水が取水口上流側で河川へ流出したことによって水質事故が発生した²⁾。この事故により、複数の浄水場において数日間にわたり取水・給水停止の処置がとられ、千葉県内では5市(36万戸)で断水や減水が生じた。欧州では、1986年11月にライン川上流に立地していた農薬工場の火災消防活動における、農薬の大量流出への対応を契機としてWater Frameworkなる水資源の管理枠組みの構築につながっている³⁾。2014年1月米国ウェストヴァージニア州チャールストンの化学物質貯蔵施設で公称容量175 m³タンクが漏えい事故を起こし、水道水禁止令が発動され4日～9日間施設閉鎖がおきた。このように非定常的漏えいは潜在的なリスクとして関心が高まっている⁴⁾。

近い将来、南海トラフ地震の発生が懸念されており、地震発生時には中部地方から九州地方を中心とする広範囲において、地震動や津波等による甚大な被害が想定され、経済的な被害規模は阪神淡路大震災や東日本大震災等の既往災害を超えると予想されている⁵⁾。被害想定⁵⁾によると西日本の太平洋沿岸広範囲には10 mを超える巨大津波の来襲が予想される。淀川河口付近の化学物質を取り扱う事業所においては、配管・タンク等の破損・容器の流出・製造施設の転倒等により化学物質の漏出被害¹⁾が懸念されており、その化学物質が淀川へ流出する可能性もある。河川水を生活用水や農工業用水に利用している日本にとって河川の水質保全は重要な課題であり、巨大津波発生時の河道内における化学物質の拡散挙動予測を正確に行うことは、取水への影響を最小限に抑えるために重要である。

巨大津波発生時における河川に流出した化学物質の挙動に関する既往の実験的研究は見当たらない。一方、解析的研究の例として、東日本大震災を対象として化学物質輸送解析を行った東ら⁶⁾、化学物質流出が水道取水源の水質に与える影響評価を行った中久保ら⁷⁾、淀川上流部での直下型地震を想定して化学物質動態解析を行った濱本ら⁸⁾

の研究が挙げられる。

東ら⁶⁾は2011年3月11日に発生した東日本大震災の津波被害が大きかった仙台湾沿岸を対象に津波氾濫解析・化学物質輸送解析を行い、津波堆積物が被災施設から漏出した化学物質で汚染されている地域とそうでない地域をゾーニングする方法について検討した。化学物質輸送解析では、対象化学物質を仮想的な数値トレーサとして設定し、平面二次元で流動解析を行うことで、化学物質の拡散範囲を推定した。被災施設の情報に限られた中での解析においてもゾーニングに活用できる情報は得られたが、より正確な汚染範囲特定のためには、化学物質漏出のタイミングや漏出量などの現実的で物理的意味が明確なトレーサおよび発生源条件を設定することや、施設の化学物質貯蔵量などのデータ整備が重要であると述べている。

中久保ら⁷⁾は、大阪府によるリスク評価¹⁾により、化学物質の災害時流出が給水停止を引き起こす可能性が示されているとした上で、取水口の上流側に多数の事業所が存在する淀川水系において、流出した化学物質が取水に与える影響を対象とした解析を行った。流出ケースを踏まえた影響度解析では、貯蔵施設からの流出を防ぐ対策として緊急遮断弁の設置の必要性を指摘した。また地震による化学物質の突発性流出の際には、急性毒性基準での給水停止判定が行えるという考えから、その効果を定量的に示した。

濱本ら⁸⁾は、自然災害起因の産業事故(Natech)⁹⁾のリスク管理に関わる研究の重要性と津波リスク評価モデルの構築の必要性を示した。その上で、地震により淀川河口付近の事業所から流出した化学物質が河川を流下した後、津波に伴って河川を遡上し、浄水場取水口に達する可能性を挙げた。予備的解析として、事業所のタンクからの化学物質の漏洩量と流出にかかる時間を推算した上で、淀川を対象に定常流下でのホルムアルデヒドの動態解析を行い、高濃度のホルムアルデヒドが河口まで拡散することが示された。しかし、津波遡上による化学物質の拡散についての解析は行われていない。

上記の研究で論じられているように、地震発生

時に取水口より下流側に位置する事業所から化学物質が流出した場合、津波の遡上に伴って取水口に到達する可能性があり、それによって取水・給水に影響が生じることが考えられる。しかしこのような事象に対し、根拠を持って想定できるほどの知見は乏しいといった状況であった。

そこで本研究では、巨大津波発生時に淀川を遡上する化学物質の挙動解析を行い、空間分布と時間変化を定量的に予測し、取水への影響を検討する。また、複数条件で化学物質の挙動解析を行い、様々な要因によって挙動が変化することを明確にすることで、本研究で用いる解析手法の有用性を示すことを目的とする。解析手法は、永島ら¹⁰⁾の広域津波連動型河道内塩水挙動解析モデルを採用する。永島らは本解析モデルを用いて南海トラフ巨大地震津波来襲時の淀川大堰周辺を対象に、河道内の塩水の空間分布・時間変化を定量的に予測し、浄水場での取水停止時間を評価した。空間的に流体の密度分布がある非圧縮性流体を解析対象としているため、塩水を本研究で対象とする化学物質に置き換えて解析を行うことで化学物質の挙動予測が可能であると考えられる。

以下では、まず本研究で用いる解析手法の概要について述べたのち、基本となる条件における化学物質挙動解析を行い(以下、基本ケースと呼ぶ)、取水への影響を検討する。さらに、複数の異なる条件下で解析を実施し、基本ケースと化学物質の挙動を比較する。最後に、取水への影響が大きいと考えられる取水口での化学物質濃度の時間変化に着目して各ケースを比較する。

2. 解析手法の概要

2.1 河川内の化学物質拡散挙動の予測解析法

本研究では、巨大地震発生時に河川を遡上する津波に伴う塩水挙動を予測評価するために永島らが開発した解析モデル(広域津波連動型河道内塩水挙動解析モデル¹⁰⁾)において塩分を他の化学物質に置き換えて用いる。本モデルは、津波来襲時の河道内塩水挙動解析に実績のある米山らの三次元数値解析手法¹¹⁾と非線形長波理論に基づく平面二次元解析手法を組み合わせ、この手法を

用いることで、計算負荷を大幅に増大させることなく、流体密度の空間分布を考慮した長時間にわたる化学物質の三次元挙動解析が可能となる。ここでは、同モデルの基礎式のみを示し、広域津波伝播解析手法、河道内塩水挙動解析や広域津波伝播解析の連動方法の詳細は永島らの論文¹⁰⁾を参照されたい。

本モデルの基礎方程式は以下のとおりである。なお、jに総和の規約を適用する。

●連続方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{2.1}$$

●運動方程式 (i = 1, 2, 3)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} (v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \tag{2.2}$$

ここに、 ρ 流体の密度、 u_i : 流速の各方向成分、 G_i : 単位質量あたりの外力の各方向成分、 p 圧力、 v : 動粘性係数、 v_t : 渦動粘性係数、 $\bar{\cdot}$: レイノルズ平均量、 \sim : ファーブル平均量である。

なお、レイノルズ平均量とファーブル平均量には以下の関係がある。

$$\bar{u}_i = \tilde{u}_i - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{v_t}{S_{c_i}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \tag{2.3}$$

ここに、 S_{c_i} : 乱流シュミット数である。

●乱流評価式 (標準 k-ε モデル)

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2.5}$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{2.6}$$

$$P_k = \frac{1}{2} \bar{\rho} v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \tag{2.7}$$

ここに、 $k(\equiv \overline{\rho u_j'' u_j''} / 2\bar{\rho})$ ：乱流エネルギー、 $\epsilon(\equiv \overline{v \rho u_{ij}'' u_{ij}''} / \bar{\rho})$ ：乱流エネルギー散逸率、 $''$ ：ファールブル平均量からの変動量、 P_k ：乱流エネルギーの生成項であり、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.3$ 、 $C_{\epsilon 1}=1.45$ 、 $C_{\epsilon 2}=1.92$ 、 $C_\mu=0.09$ とした。

●化学物質の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\bar{C} \cdot \bar{u}_j + \left(\alpha + \frac{v_t}{S_c} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right\} \quad (2.8)$$

ここに、 C ：化学物質濃度 [mg/L]、 α ：分子拡散率である。 v_t ：レイノルズ平均量からの変動量である。本研究では細田¹²⁾の研究を参考に $S_c=1.0/1.2$ とした。

●化学物質濃度と流体密度の関係式

$$\bar{\rho} = \rho_0 + C \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) \times 10^3 \quad (2.9)$$

ここに、 ρ_0 [kg/m³]：水の密度、 ρ_c [kg/m³]：化学物質の密度である。

なお ρ_0 については、 T ：温度 [°C] として、以下の推定式¹³⁾を用いる。

$$\begin{aligned} \rho_0 = & (999.83952 + 16.945176T \\ & - 7.987041 \times 10^{-3} T^2 \\ & - 46.170461 \times 10^{-6} T^3 \\ & + 105.56302 \times 10^{-9} T^4 \\ & - 280.54253 \times 10^{-12} T^5) \\ & / (1 + 16.879850 \times 10^{-3} T) \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.2 事業所からの化学物質漏出量の評価法¹⁴⁾

ここでは、石油コンビナート災害分野で標準的手法として用いられている評価法¹⁴⁾に従って漏出量の時間変化を評価した。地震動によって円柱型の貯蔵タンクの側板下部が損壊することによる全量漏出を想定する。タンクは円柱型を想定する。タンク内部を加圧していない場合の単位時間あたりの流出量 q [m³/s] は簡略化すると

$$q = 2.2a\sqrt{h} \quad (2.11)$$

と表される。ここで a [m²]：破口面積、 h [m]：液

面高さである。

タンク底面の半径を r [m] とすると上式は (2.12) のように変形できる。

$$\pi r^2 \frac{dh}{dt} = -2.2a\sqrt{h} \quad (2.12)$$

時刻 t での液面の高さを h_t [m]、タンクの高さを H [m] とすると h_t は (2.13) と表せる。

$$h_t = \left(\sqrt{H} - \frac{1.1at}{\pi r^2} \right)^2 \quad (2.13)$$

したがって、時刻での単位時間あたりの流出量 q [m³/s] は

$$q = 2.2a \left(\sqrt{H} - \frac{1.1at}{\pi r^2} \right) \quad (2.14)$$

と表せる。よって、時刻 t から $t+dt$ の間に、円柱型タンクから漏出する化学物質体積 dV [m³] は

$$dV = 2.2a \left(\sqrt{H} - \frac{1.1at}{\pi r^2} \right) dt \quad (2.15)$$

と表せる。

2.3 漏出した化学物質の河川流出量評価法

本研究では、工場から漏出した化学物質は、漏出終了まで常に河川沿岸付近のある地点の水面に流出するとする。ここでは、流出地点における水面を含む計算セルを化学物質流出セルとする。

時刻 t においてタンクから漏出した体積 dV の化学物質の全量が河川に流出すると仮定する。化学物質流出セルの時刻 t における体積： V_t [m³]、化学物質濃度： C_t [mg/L]、化学物質を含んだ河川水の見かけの密度： ρ_t [kg/m³]、化学物質流出後の体積： \tilde{V}_t [m³]、化学物質濃度： \tilde{C}_t [mg/L]、密度： $\tilde{\rho}_t$ [kg/m³] とすると \tilde{V}_t 、 \tilde{C}_t 、 $\tilde{\rho}_t$ はそれぞれ

$$\tilde{V}_t = V_t + dV \quad (2.16)$$

$$\tilde{C}_t = \frac{C_t \times 10^3 V_t + \rho_c dV}{\tilde{V}_t} \times 10^{-3} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_t &= \frac{\rho_t V_t + \rho_c dV}{\tilde{V}_t} \\ &= \rho_0 + \tilde{C}_t \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) \times 10^3 \end{aligned} \quad (2.18)$$

と表せる。ここで ρ_0 [kg/m³]：水の密度、 ρ_c [kg/m³]：化学物質の密度である。

化学物質流出の際に、 \bar{V}_i が化学物質流出セルのセル体積を超える場合は、鉛直方向に1つ上のセルに超過分の体積を加える。なお、1つ上のセルの化学物質濃度、見かけの密度は化学物質流出セルと同じとする。

3. 巨大津波発生時の淀川における化学物質拡散挙動分析

本章では、淀川大堰周辺を対象に、本研究で設定した基本ケースについて南海トラフ地震による巨大津波発生時の化学物質挙動解析を実施し、化学物質の空間分布・時間変化を定量的に予測した。さらに、対象化学物質の取水口位置における濃度を水質基準¹⁵⁾と比較することで取水への影響についても検討した。

3.1 解析領域と境界条件および評価位置

内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」¹⁶⁾(以下、「検討会」)において検討されたモデルのうち、平面直角座標第VI系(JGD2000)に基づく地形データ、粗度データおよび堤防データを基に解析データを設定した。

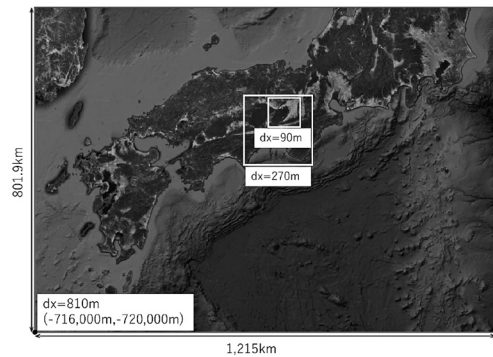
広域津波伝播解析を実施する平面二次元解析領域を図3.1に示す。平面二次元解析領域は、西日本を含む最大領域から淀川を含む領域まで、5層のネスティングを行っている。その間の格子サイズは、810 m → 270 m → 90 m → 30 m → 10 m と変化した。西日本を含む最大領域の境界条件は、北端を固定端、それ以外を自由端とした。

河道内の化学物質挙動解析を実施する三次元領域を図3.2に示す。三次元領域は、格子サイズ10 mの平面二次元解析領域の中に、淀川大堰を含むように水平格子サイズ5 m、鉛直格子サイズ1 mの領域を設定した。

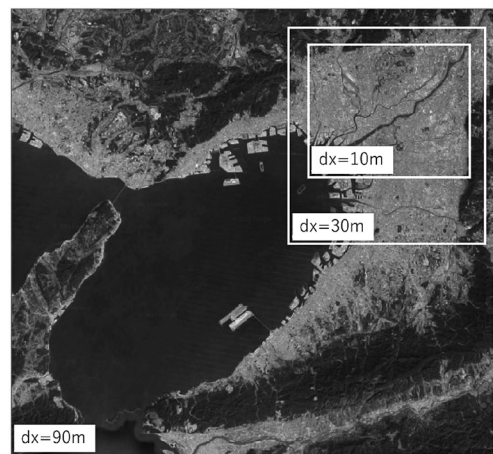
本研究では、図3.2に示す柴島取水口(工水)、柴島取水口(上水)で取水する恐れのある化学物質濃度を評価する。具体的には、両取水口を含む計算格子の濃度を用いた。

3.2 津波断層モデル、水位条件

津波断層モデルは淀川河口付近に到達する津波



(a) 計算格子サイズ 810 m, 270 m, 90 m の範囲



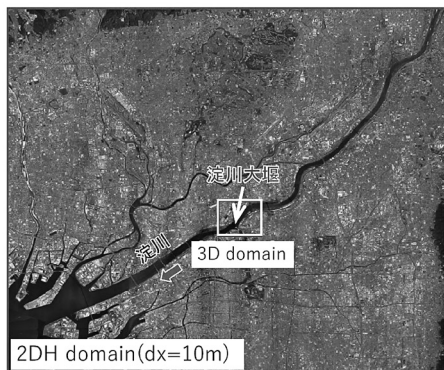
(b) 計算格子サイズ 90 m, 30 m, 10 m の範囲

図3.1 平面二次元解析領域¹⁰⁾(背景図は Google Map から引用)

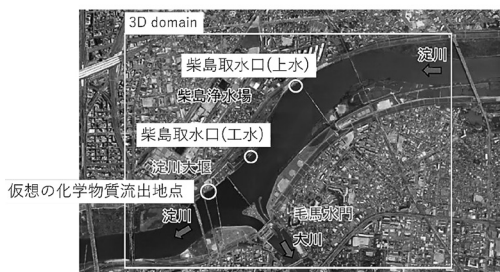
高が最も高いケースを用いた。津波波源における断層破壊方法について、検討会の解析では断層破壊の伝播を考慮しているのに対し、本研究では同時に破壊し地盤が変動するものとしているが、検討会と同様な水位変化が得られることは、永島らにより検証済み¹⁰⁾である。

本研究では、地盤変位量を検討会と同等のケースおよび検討会の変位量を2倍したケースで解析を行った。

津波発生直前の潮位は T.P.+0.9 [m] とし、地震発生時の地盤変動に伴う水位変化および淀川大堰のゲート位置の変化を考慮した。



(a) 広域図⁹⁾



(b) 拡大図

図3.2 三次元解析領域(文献¹⁰⁾に加筆；背景図は Google Map から引用)

3.3 淀川大堰の周辺の流れ条件

淀川大堰は河川流量に応じてゲート開度を調整している。今回解析に用いた河川流量62, 196[m³/s] の場合の流れの配分を表3.1および図3.3に、淀川大堰各ゲートの開度を図3.4に示す。なお、地震発生によりゲート操作が困難になることを想定して、各ゲートの開度は地震発生後も変化させず通常期の値のままとした。

3.4 河川水および化学物質に関する条件

河川水は淀川大堰上下流側ともに塩分0の淡水と設定し、水温は化学物質の水中での分解や水面から大気への揮発が起こりにくい低水温の時期を想定して15℃とした。

化学物質の分子拡散率 α (式 (2.8)) は、永島ら¹⁰⁾と同様に 2.0×10^{-9} と設定した。また本研究では、化学物質の分解や反応、大気中への揮散、水中の懸濁物質への吸着などは考慮しないものとし

表3.1 淀川流量と淀川大堰の運用の関係

	淀川流量 [m ³ /s]	
	62	196
大川流量 [m ³ /s]	62	120
淀川大堰越流量 [m ³ /s]	0	76
調節ゲート天端高* [T.P.m]	2.3 (2.13)	1.0 (0.83)
制水ゲート天端高* [T.P.m]	2.5 (2.33)	2.5 (2.33)

*括弧内は地盤変動後の天端高

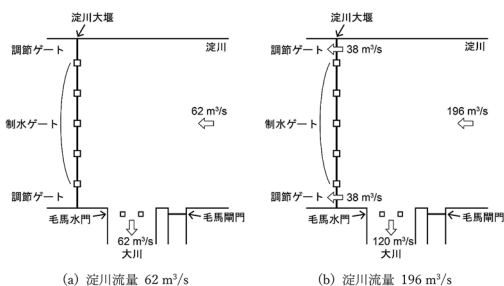
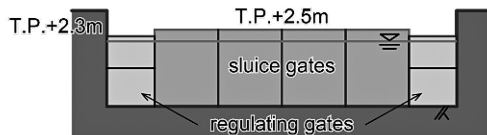
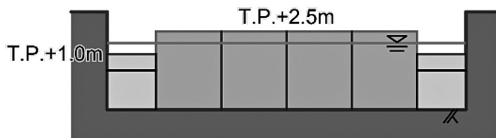


図3.3 淀川流量に対する大川流量および淀川大堰越流量の関係¹⁰⁾



(a) 淀川流量 62 m³/s のとき



(b) 淀川流量 196 m³/s のとき

図3.4 淀川流量と淀川大堰ゲート位置の関係¹⁰⁾

た。したがって、短時間(津波作用時間内)に出現し得る最大濃度の推定に相当する。

本研究で設定した仮想的化学物質流出地点を図3.2に示している。流出シナリオとして、円柱型タンクからの全量流出を想定した。高さ h を

表3.2 解析ケース

ケース名	河川流量 [m ³ /s]	化学物質 (密度 [kg/m ³])	断層すべり量の倍率 (津波強さ)
ケース 1	62	ホルマリン (1100)	1.0 (内閣府の想定と同等)
ケース 2	62	トリエチルアミン (700)	1.0 (内閣府の想定と同等)
ケース 3	62	ホルマリン (1100)	2.0
ケース 4	62	トリエチルアミン (700)	2.0
ケース 5	196	ホルマリン (1100)	1.0 (内閣府の想定と同等)
ケース 6	196	トリエチルアミン (700)	1.0 (内閣府の想定と同等)
ケース 7	196	ホルマリン (1100)	2.0
ケース 8	196	トリエチルアミン (700)	2.0

3.78[m], 半径 r を 1.89[m], 破口面積 a を 0.001[m²] と設定し, タンクは11個存在するとした。なお, このシナリオは実在する施設の貯蔵量として妥当なものとするために, 第一種指定化学物質排出量・移動量および取扱量データ¹⁷⁾を参考に設定した。したがって, 本条件は現実的な漏出量における最大の被害想定に相当する。この時, 式 (2.15) にしたがって, 約5.5時間かけて約467[m³] の化学物質が漏出する。

対象化学物質として, PRTR (Pollutant Release and Transfer Register: 化学物質排出移動量届出制度) 対象化学物質に指定されているホルムアルデヒドを選定した。ホルムアルデヒドは, ヒトの健康を守るという視点で設定された水質基準項目¹⁵⁾に該当しており, 社会的・技術的にも関心が高い化学物質である。水質基準によると, ホルムアルデヒドは 8.0×10^{-2} [mg/L] 以下と定められている。本解析では, 対象化学物質をホルムアルデヒド濃度37%のホルマリンとして挙動解析を行ったため, 取水への影響を評価する際, ホルムアルデヒド濃度は式 (3.1) として検討した。

$$\begin{aligned} \text{ホルムアルデヒド濃度 [mg/L]} &= \\ \text{ホルマリン濃度 [mg/L]} \times 0.37 &\quad (3.1) \end{aligned}$$

3.5 解析ケース

本研究で行った解析ケースを表3.2に示す。断層すべり量とモーメントマグニチュードの関係¹⁸⁾を表3.3に示す。すべてのケースについて地震発生から25,200秒(7時間)後まで現象を解析した。

表3.3 断層すべり量とモーメントマグニチュードの関係

断層すべり量の倍率	モーメント マグニチュード	大阪市域の 地盤変動量
1.0	9.1	約-17 cm
2.0	9.3	約-33 cm

3.6 基本ケース(ケース1)の解析結果および考察

基本ケースは, 表3.2に示すように, 河川流量を62[m³/s], 化学物質をホルムアルデヒド濃度37%のホルマリン(密度: 1100[kg/m³]), 断層すべり量の倍率を1.0(内閣府の想定と同等)としたものである。

図3.5に淀川大堰地点の流量の時間変化を示す。なお, 流量は淀川の流下方向を正としている。同図より, 25,200秒までに, 2度津波が淀川大堰を下流側から上流側へ越流することがわかる。第一波来襲時には, 約9,470秒~約11,000秒で越流が確認される。

図3.6に化学物質流出開始(地震発生)から3,600秒後までの化学物質流出地点の縦断面における化学物質拡散の様子(ケース1)を示す。同図より, 河川に流出した化学物質はまず岸にそって沈下し, その後水面方向に広がりながら水平方向へも拡散することが確認された。これは流出化学物質の密度が水より大きいためと考えられる。

図3.7に淀川大堰周辺の水面近傍における化学物質拡散の様子(ケース1)を示す。同図より, 津波の遡上によって化学物質が大堰上流側へ拡散する様子が確認された。その際, 河道右岸側の調

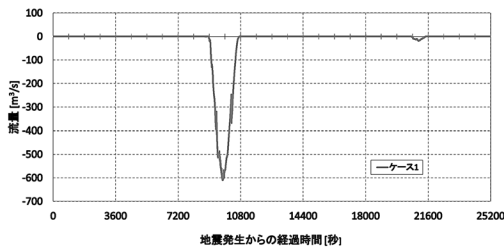
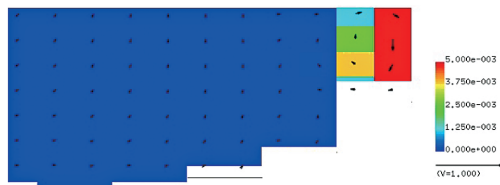
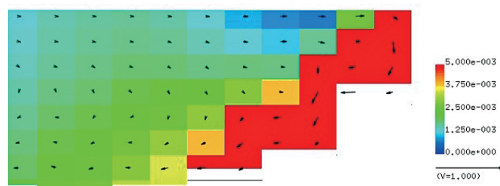


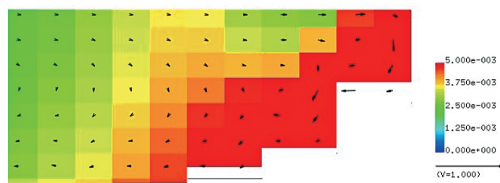
図3.5 淀川大堰地点の流量の時間変化(ケース1)



(1)60 秒



(2)1800 秒



(3)3600 秒

図3.6 化学物質流出地点の縦断面における化学物質拡散の様子(ケース1)

節ゲートからの越流による影響が大きいこともわかる。図3.7(2)(3)(4)より、津波来襲前に淀川大堰直下流付近に高濃度で分布していた化学物質が取水口(工水)付近まで到達したことも確認できる。淀川大堰直下流付近の河床が周辺より低くなっているため、津波来襲前にそこに沈み込むよ

うに拡散し、高濃度で分布したと考えられる。

図3.8に取水口(工水)と取水口(上水)における対象化学物質濃度の時間変化を示す。同図から、取水口(工水)では化学物質が検出されたが、取水口(上水)では検出されなかった。取水口(工水)でのホルマリン濃度から、式(3.1)を用いてホルムアルデヒド濃度を算出すると最大で約 4.74×10^{-4} [mg/L]となる。このことから水質基準¹⁵⁾の 8.0×10^{-2} [mg/L]を超過しないため、本ケースでは両取水口において取水停止の措置を取る必要がないとわかる。また同図より、化学物質は約9,950秒で取水口(工水)に到達し、約10,360秒で濃度が最大となる。その後河川水の流下によって減少し、約14,400秒で検出されなくなる。化学物質の取水口(工水)への到達時刻から考えると、これは1度目の淀川大堰越流によるものと考えられる。

図3.9に柴島取水口(工水)を含む平面における化学物質の拡散の様子(ケース1)を示す。同図(3)より、14,400秒においても化学物質は淀川大堰上流側に滞留しており、大川への化学物質の流入も確認される。これらは淀川大堰の運用によるもので、本ケースでは淀川下流側へは流下しないように設定されているためと考えられる。

4. 化学物質挙動に影響を与える要因の検討

本章では、津波来襲時の化学物質挙動に影響を及ぼす可能性のある要素のうち、化学物質密度・河川流量・津波強さについて感度分析を行う。具体的には、表3.2で示す解析ケースのケース2・ケース3・ケース5を実施し、それぞれについて基本ケースとの挙動比較を行った。

4.1 化学物質密度による挙動比較

4.1.1 解析ケースの概要

本節では、ケース2の化学物質の挙動を基本ケースと比較する。対象化学物質は基本ケースがホルムアルデヒド濃度37%のホルマリン(密度： 1100 [kg/m³])、ケース2がトリエチルアミン(密度： 700 [kg/m³])である。トリエチルアミンもホ

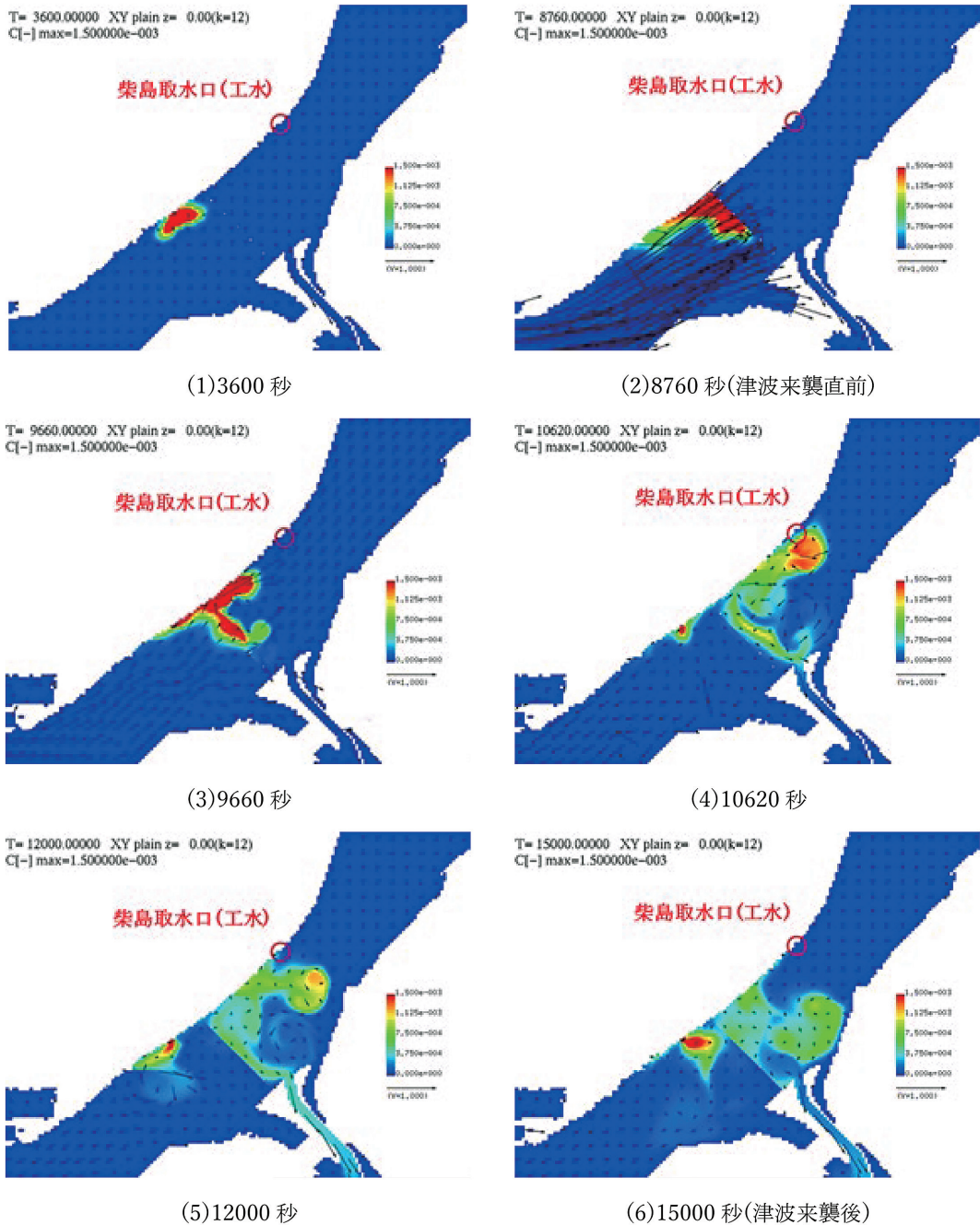


図3.7 淀川大堰周辺の化学物質拡散の様子(ケース1)

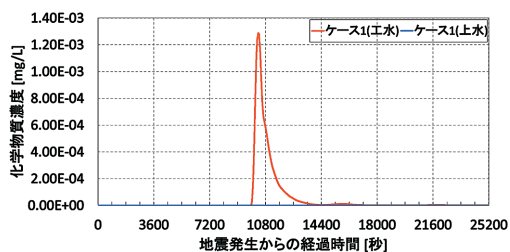
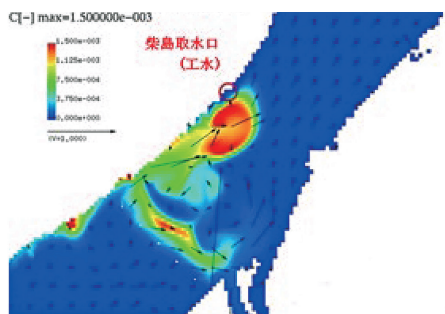
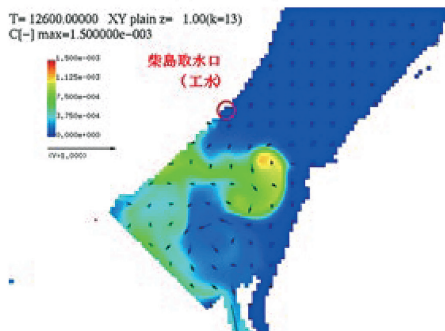


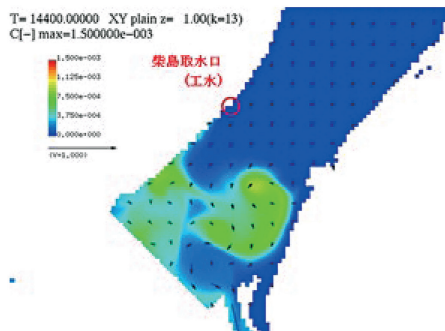
図3.8 柴島取水口における化学物質濃度の時間変化



(1) 10380 秒



(2) 12600 秒



(3) 14400 秒

図3.9 柴島取水口(工水)を含む平面における化学物質の拡散の様子(ケース1)

ルムアルデヒドと同様に PRTR 対象化学物質に指定されている。また、その他の条件は両ケースとも同じである。

4.1.2 解析結果および考察

図4.1に淀川大堰地点の流量の時間変化を示す。同図より、淀川大堰地点の流量の時間変化に差異は見られず、ケース1、2とも2度の越流が確認された。

図4.2に化学物質流出開始(地震発生)から3,600秒経過後までの化学物質流出地点の縦断面における化学物質拡散の様子(ケース2)を示す。同図から、化学物質密度により拡散挙動に違いがあることがわかる。ケース2では、まず水面付近で拡散し、その後河床方向に広がりながら水平方向にも拡散することがわかる。また、沿岸付近の水面ではケース1に比べて比較的高濃度で分布しやすいということも確認される。

図4.3に淀川大堰周辺の水面近傍における化学物質拡散の様子(ケース2)を示す。同図より、ケース2においても津波の遡上によって化学物質が淀川大堰上流側へ拡散の様子が確認された。その際、河道右岸側の調節ゲートからの越流による影響が大きいこともケース1と同様である。しかし、津波来襲前の化学物質の分布には違いが見られる。ケース1では淀川大堰直下流付近に高濃度で分布していたのに対して、ケース2では化学物質流出地点付近に比較的高濃度で分布していることがわかる。これは、ケース2では淀川大堰直下流付近の河床が低いことによる拡散の影響を受けなかったからだと言える。

図4.4に取水口(工水)と取水口(上水)にお

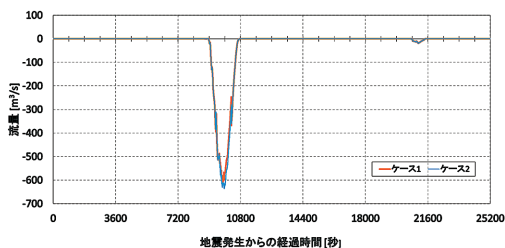


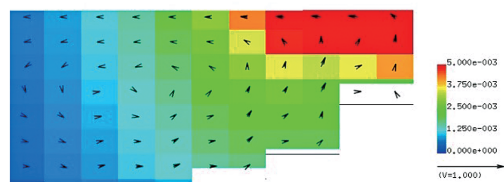
図4.1 淀川大堰地点の流量の時間変化

る対象化学物質濃度の時間変化を示す。同図より、両ケースともに取水口（工水）では化学物質が検出されたが、取水口（上水）では検出されなかったことがわかる。また、取水口（工水）への到達時刻から考えると、どちらも1度目の淀川大堰越流によるものであるとわかる。しかし、柴島取水口（工水）での化学物質濃度の時間変化には差異が見られたため、以下で検討する。

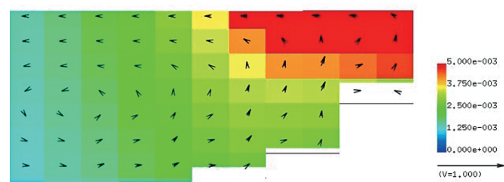
図4.4より12,600秒までにおいては、最大濃度に差はあるものの両ケースともに約9,950秒で取水口（工水）に到達し、約10,360秒で最大値をとり、その後河川水の流下によって減少していくという同様の特徴を示していると言える。最大濃度に約6倍もの違いが見られたのは、津波来襲前の化学物質の分布状況によるものと考えられる。したがって、津波来襲前の淀川大堰直下流付近にお



(1)60 秒



(2)1800 秒



(3)3600 秒

図4.2 化学物質流出地点の縦断面における化学物質拡散の様子（ケース2）

ける化学物質濃度が柴島取水口（工水）での最大濃度に影響すると言える。

図4.5に柴島取水口（工水）を含む平面における化学物質の拡散の様子（ケース2）を示す。図4.4より12600秒以降については、濃度の時間変化に大きな違いが見られた。ケース1では濃度が減少していき、約14400秒で0となる。一方ケース2では濃度が一度増加し、約14400秒において最大値を記録した後、減少していく。これは図4.5に示すように、取水口（工水）から淀川大堰までの河道右岸部の沿岸域での流速が極めて小さくなっていることが原因と考えられる。流速の小さい沿岸域に分布する化学物質は、密度が河川水密度より大きい場合は河床の低い方へ拡散しやすく、小さい場合は沿岸域に比較的滞留し続けやすい。そのため、ケース2では取水口（工水）より下流側の沿岸域に滞留していた化学物質が取水口（工水）まで拡散してきたことによって濃度が増加したと考えられる。

図3.9と図4.5より、両ケースとも淀川大堰上流側へ拡散した化学物質は大川へ流入することが確認されたが、ケース2の方が流入濃度は低いことがわかる。

4.2 河川流量による挙動比較

4.2.1 解析ケースの概要

本節では、ケース5の化学物質の挙動を基本ケースと比較する。淀川流量は、基本ケースでは、洪水時に想定される流量である62[m³/s]、ケース5では平水時の代表的な流量である196[m³/s]とした。その他の条件は同じである。

4.2.2 解析結果および考察

図4.6に淀川大堰地点の流量の時間変化を示す。同図よりケース1では越流は2回であったのに対し、ケース5では4回確認される。また、第一波による越流量は、ケース5の方が多という結果が得られた。これらは、河川流量による淀川大堰の運用方法によるものであり、ケース5での調節ゲート天端高が低く設定されているためである。

図4.7に淀川大堰周辺の水面近傍における化学

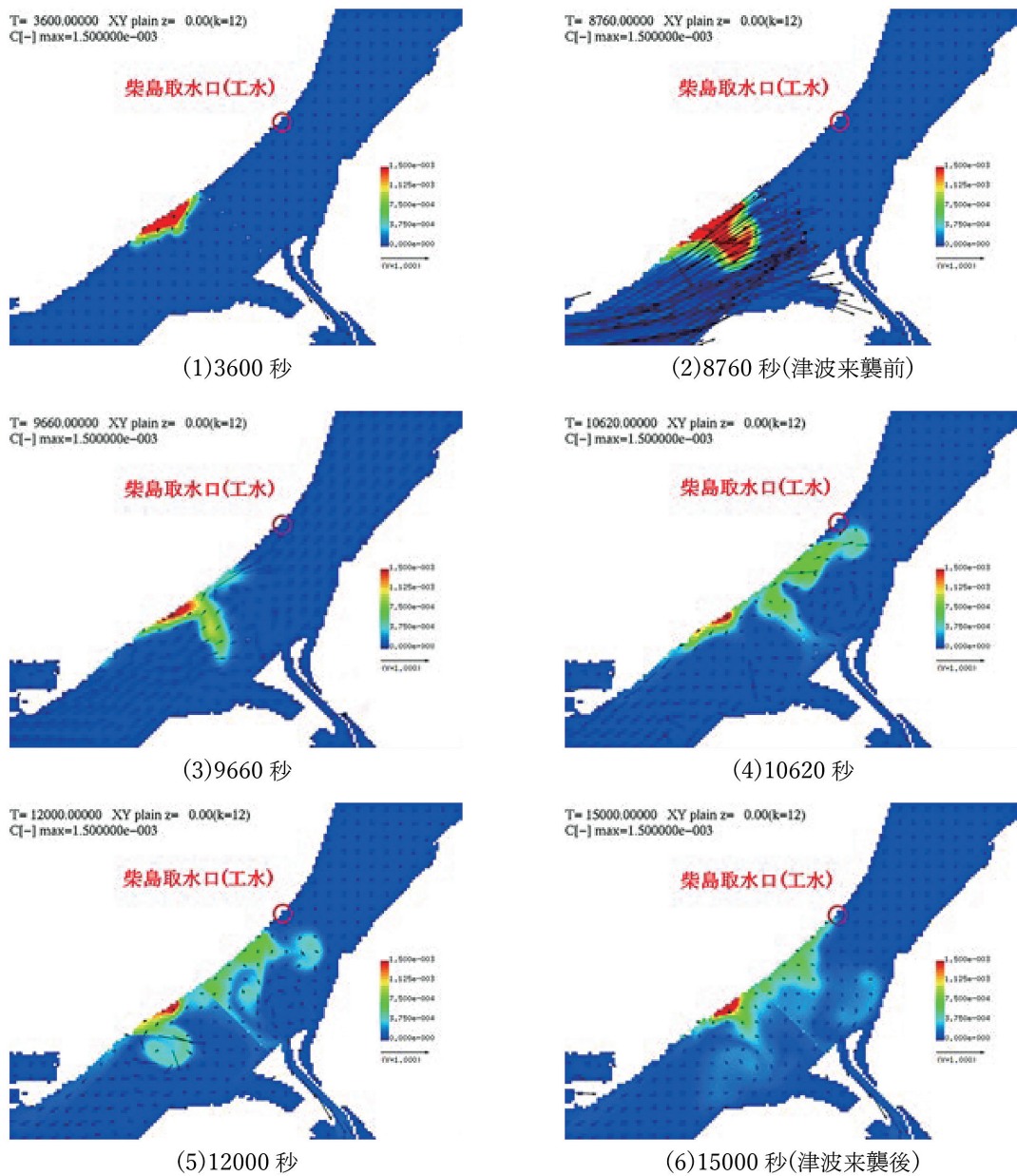


図4.3 淀川大堰周辺の化学物質拡散の様子(ケース2)

物質拡散の様子(ケース5)を示す。同図より、ケース5においても化学物質が淀川大堰上流側へ拡散する様子が確認され、河道右岸側の調節ゲートからの越流による影響が大きいこともわかる。しかし、化学物質の拡散範囲には違いが見られる。ケー

ス5では、津波来襲前は流出地点より下流側へ拡散しており、淀川大堰直下流付近に高濃度で分布している様子は見られない。また、津波来襲時は取水口(工水)より上流側まで拡散している。

図4.8に取水口(工水)と取水口(上水)におけ

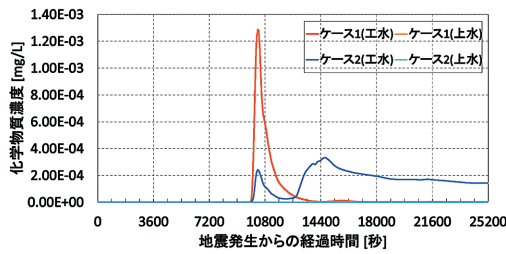


図4.4 柴島取水口における化学物質濃度の時間変化

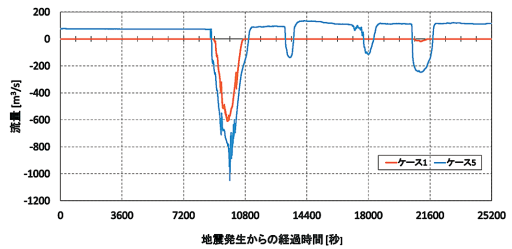
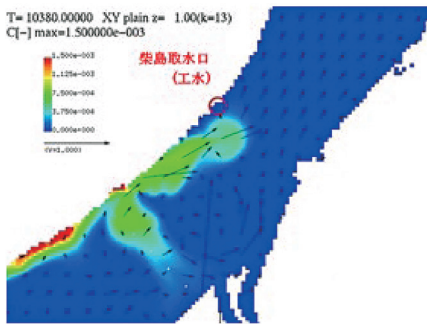
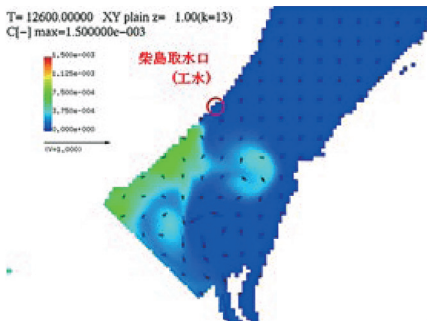


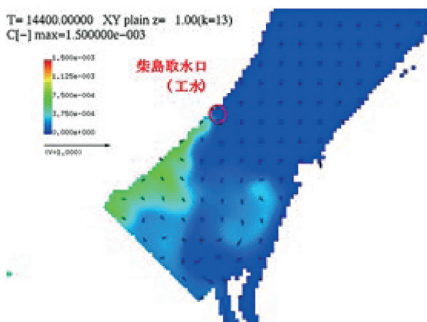
図4.6 淀川大堰地点の流量の時間変化



(1) 10380 秒



(2) 12600 秒



(3) 14400 秒

図4.5 柴島取水口(工水)を含む平面における化学物質の拡散の様子(ケース2)

る対象化学物質濃度の時間変化を示す。同図より、ケース5でも取水口(工水)では化学物質が検出されたが、取水口(上水)では検出されなかったことがわかる。取水口(工水)でのホルムアルデヒド濃度の最大値は式(3.1)より約 2.83×10^{-4} [mg/L]であるため、取水停止の措置は必要ない。

以下では、河川流量による取水口(工水)での化学物質濃度の時間変化の違いについて検討する。

図4.9に柴島取水口(工水)を含む平面における化学物質の拡散の様子(ケース5)を示す。図4.6と図4.8より両ケースともに、濃度は1度目の越流による遡上によって最大となり、その後減少していくことがわかる。ただし、ケース5では3度目までの越流によってもわずかに増加することが確認された。取水口(工水)での化学物質の最大濃度がケース5の方が小さくなっているのは、津波来襲前の分布の違いによるものだと考えられる。また、ケース5において約10800秒で再び濃度が増加するのは、図4.7や図4.9(1)(2)に示すようにケース5では取水口(工水)より上流側まで遡上するため、その化学物質が流下してきたことによるものだと考えられる。

約14400秒で両ケースとも取水口(工水)での化学物質は検出されなくなるが、その後の淀川大堰上流側の化学物質分布状況は大きく異なっている。図3.9(3)と図4.9(3)より、ケース1の方がケース5より比較的広範囲に高濃度で分布していることがわかる。また図3.7(6)と図4.7(6)を比較してもケース1の方が、化学物質が長時間残存している。ケース5では大川だけでなく淀川下流

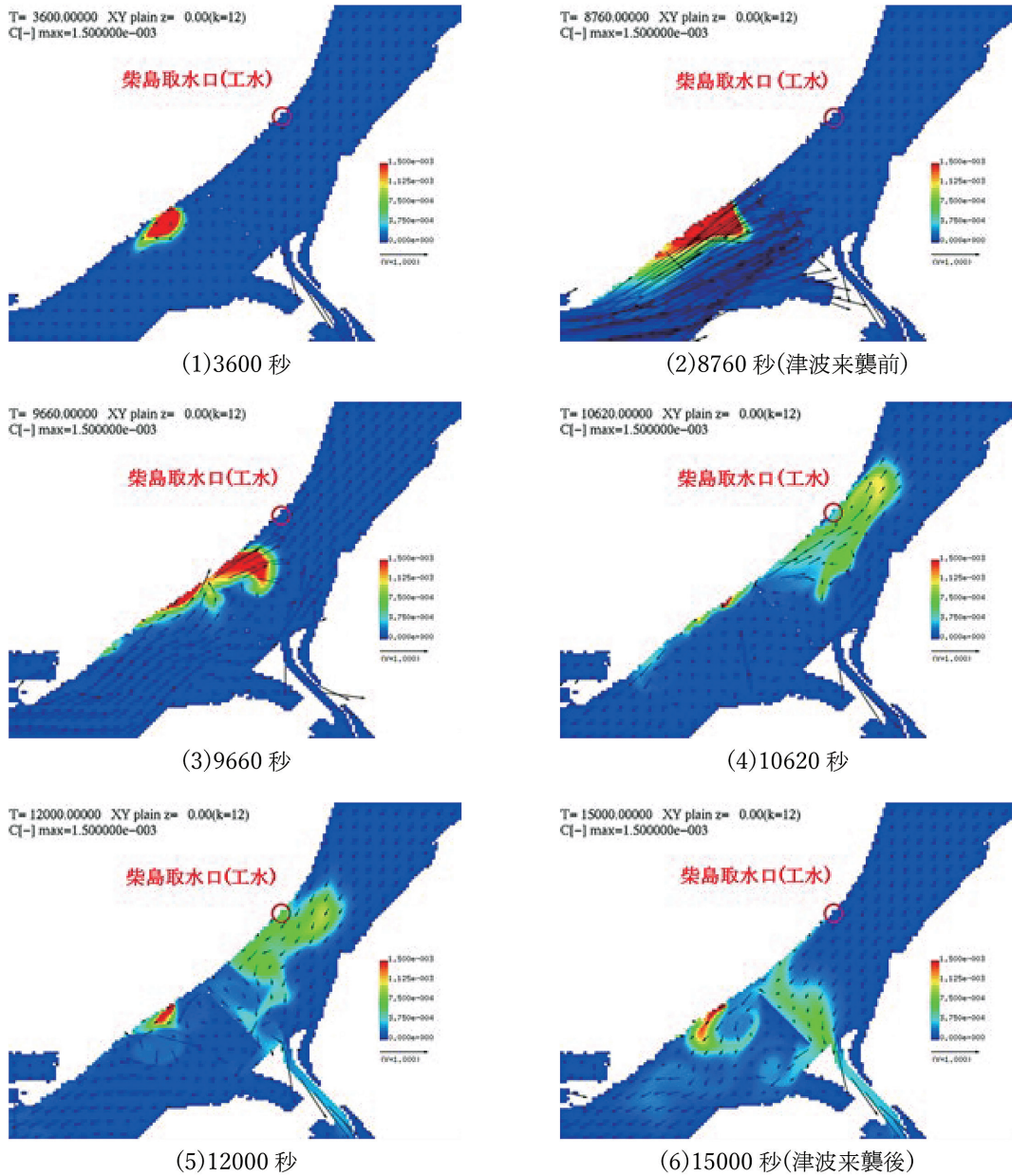


図4.7 淀川大堰周辺の化学物質拡散の様子(ケース5)

側へも化学物質が流下していくためであると考えられる。このことから、大川へ流入する化学物質濃度はケース1の方が高いと予想できる。

4.3 津波強さによる挙動比較

4.3.1 解析ケースの概要

本節では、ケース3の化学物質の挙動を基本ケースと比較する。断層すべり量の倍率をケース1において1.0(内閣府の想定と同等)とケース3

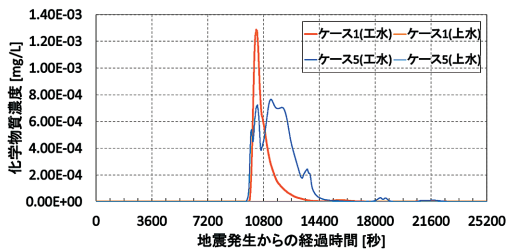


図4.8 柴島取水口における化学物質濃度の時間変化

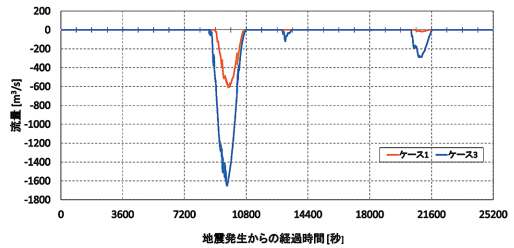
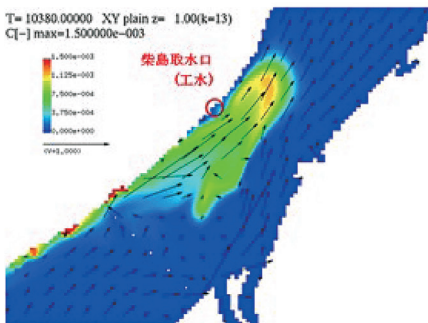
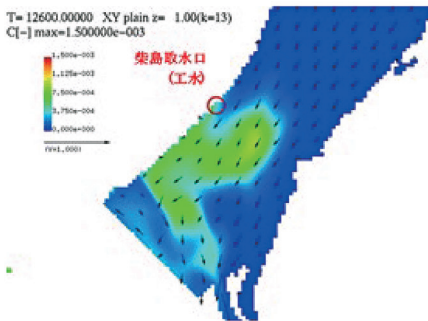


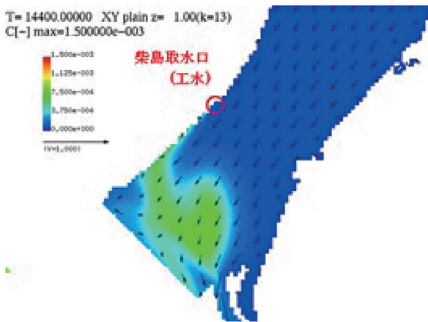
図4.10 淀川大堰地点の流量の時間変化



(1) 10380 秒



(2) 12600 秒



(3) 14400 秒

図4.9 柴島取水口 (工水) を含む平面における化学物質の拡散の様子 (ケース5)

において、2.0とした。その他の条件は同一である。

4.3.2 解析結果および考察

図4.10に淀川大堰地点の流量の時間変化を示す。同図よりケース1では越流は2回だったのに対し、ケース3では3回確認される。第一波による越流量は、ケース3の方が大幅に多いという結果が得られた。

図4.11に淀川大堰周辺の水面近傍における化学物質拡散の様子(ケース3)を示す。同図より、ケース3においても化学物質が淀川大堰上流側へ拡散したが、拡散範囲には違いが見られる。ケース3では、化学物質が取水口(工水)より大幅に上流側へと遡上していることがわかる。また津波の遡上の速度も大きくなっていることが確認された。また図4.11(3)よりケース3では、淀川大堰調節ゲートだけでなく、制水ゲートからも越流していることも確認された。

図4.12に取水口(工水)と取水口(上水)における対象化学物質濃度の時間変化を示す。同図より、ケース3においては取水口(工水)だけでなく、取水口(上水)でもわずかに化学物質が検出された。取水口(工水)でのホルムアルデヒド濃度の最大値は式(3.1)より約 4.85×10^{-4} [mg/L]であり、ケース1と近い値となった。これは、津波来襲前の化学物質分布は両ケースとも酷似しているためと考えられる。しかし、取水口(工水)への化学物質の到達時刻には差異が見られ、ケース3の方が約600秒早かった。これは津波の遡上速度による違いと考えられる。また同図において、ケース3で約18,000秒において取水口(工水)での化学

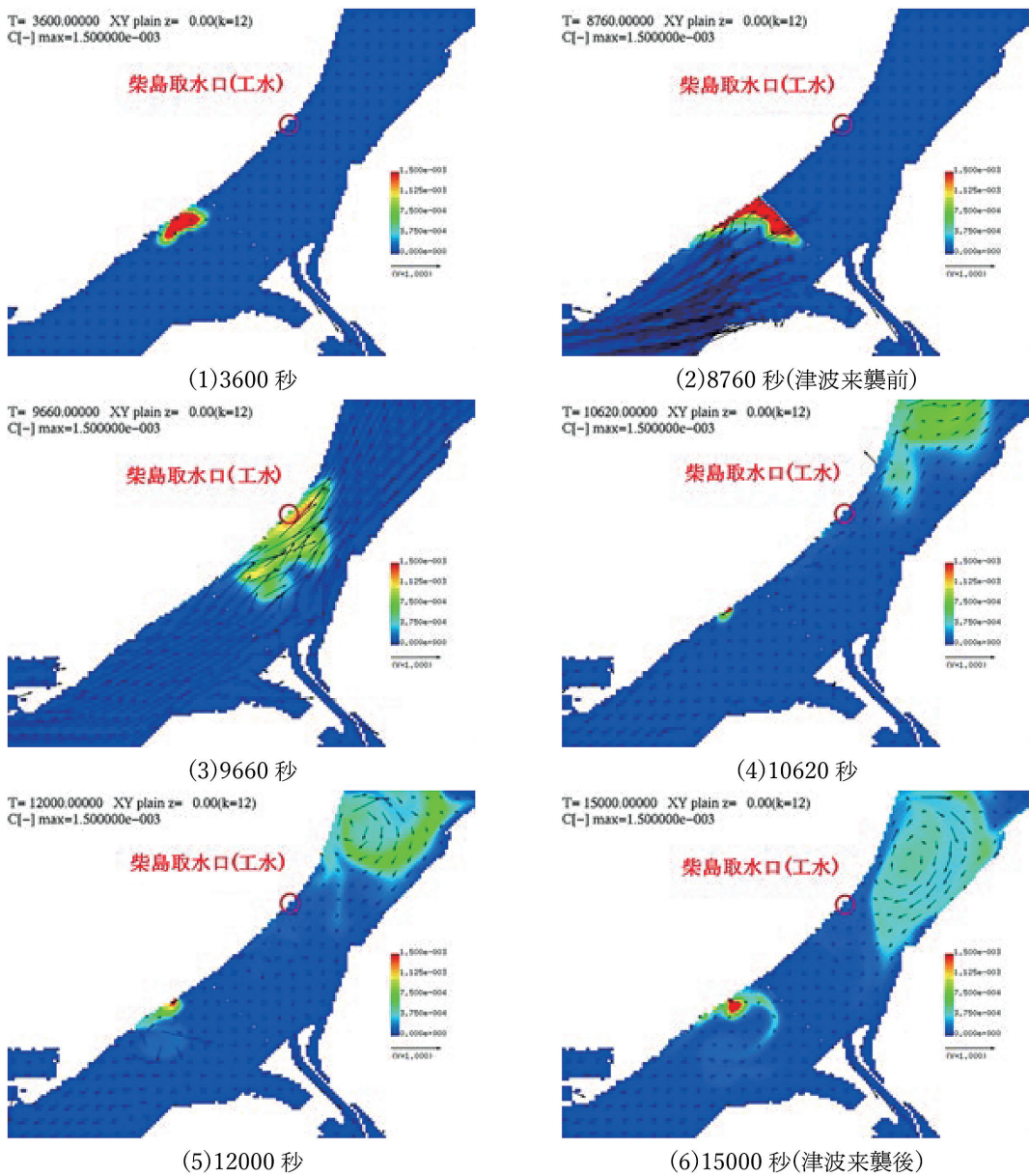


図4.11 淀川大堰周辺の化学物質拡散の様子(ケース3)

物質濃度がわずかに増加するのは、取水口(工水)より上流側へ遡上した化学物質が流下してきたためと考えられる。

図4.13に柴島取水口(工水)を含む平面における化学物質の拡散の様子(ケース3)を示す。ケース3ではケース1より上流側まで遡上しているた

め(図3.9参照)、大川へ化学物質が流入し始める時刻はケース1より遅くなると考えられる。

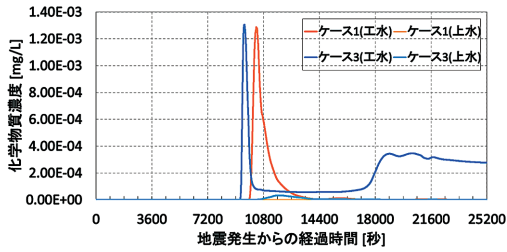
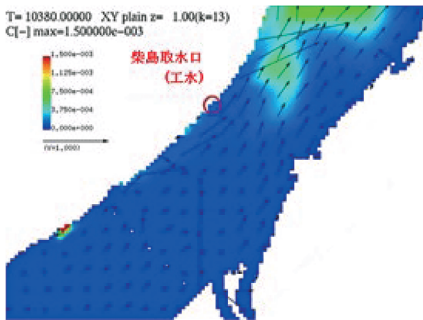
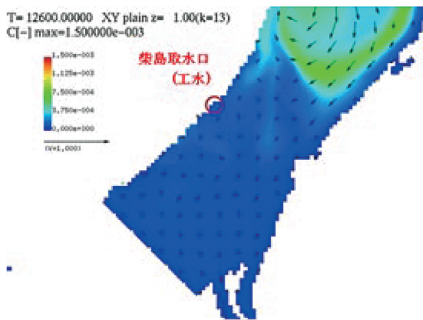


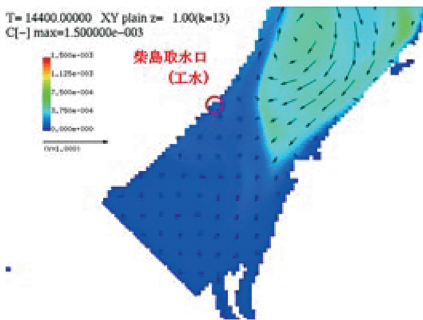
図4.12 柴島取水口における化学物質濃度の時間変化



(1) 10380 秒



(2) 12600 秒



(3) 14400 秒

図4.13 柴島取水口 (工水) を含む平面における化学物質の拡散の様子 (ケース3)

5. 柴島取水口 (工水) 前面での濃度比較

3章, 4章で化学物質挙動解析を行った結果, 取水口 (上水) より取水口 (工水) で化学物質遡上の影響が大きいことがわかった。本章では, 取水口 (工水) での化学物質濃度の時間変化に着目し, 河川流量ごとにそれぞれ比較を行う。

5.1 解析ケースの概要

河川流量2ケース, 対象化学物質2ケース, 断面すべり量の倍率 (津波強さ) 2ケースの組み合わせで計8ケースの解析 (表3.2) を実施した。

5.2 解析結果および考察

ここでは, 河川流量ごとに解析結果を示し, 考察を行う。

5.2.1 河川流量62 [m³/s] のケースの考察

図5.1に濁水時に想定される流量である62 [m³/s] での解析結果 (ケース1~4) を示す。同図より, ケース1とケース3では, 津波強さによる化学物質濃度の最大値の変化が小さい。一方, ケース2とケース4では, 変化が大きくなっている。したがって, 密度の小さい化学物質の方が, 津波強さによる化学物質濃度の最大値に影響を及ぼしやすいと言える。また, ケース1とケース2では, 化学物質密度による最大値の差が大きいが, ケース3とケース4では, 差が小さくなっている。したがって, 津波強さが大きい方が, 密度による化学物質濃度の最大値の差が小さくなることがわかる。

5.2.2 河川流量196 [m³/s] のケースの考察

図5.2に平水時に想定される代表的な流量である196 [m³/s] での解析結果 (ケース5~8) を示す。同図より, 化学物質密度が大きく津波が強い場合に, 化学物質濃度の最大値が最も大きくなる。さらに, 化学物質密度に関わらず, 津波が強い方が長時間にわたって取水口 (工水) で化学物質が検出されることも確認される。また, ケース5とケース6, ケース7とケース8より, 値に差はあるものの密度が違っても化学物質濃度

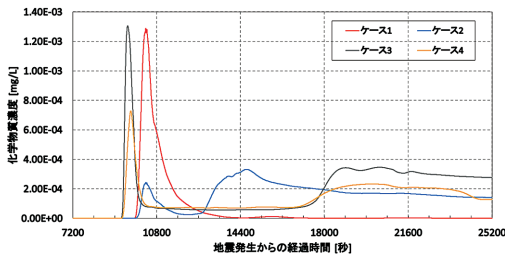


図5.1 河川流量62 [m³/s] の解析結果

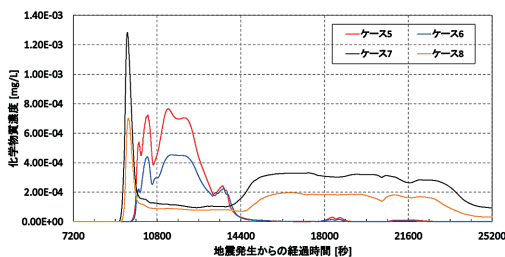


図5.2 河川流量196 [m³/s] の解析結果

の時間変化の特徴は類似していると言える。このことから、水が調節ゲートから淀川大堰下流側へも流れる場合は、密度による拡散挙動の違いが小さいとわかる。

以上のことから、淀川大堰のゲート開度によって取水口(工水)での取水に及ぼす影響が変わってくるのがわかる。

6. おわりに

本研究では、本解析手法を用いて基本ケースについて巨津波来襲時の淀川における化学物質の挙動解析を行い、取水への影響を検討した。また、異なる条件下での化学物質の挙動比較も行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

本解析手法を用いて基本ケースについて巨津波来襲時の淀川における化学物質の挙動解析を行い、取水への影響を検討した。その結果、

1) 淀川大堰下流側で流出した化学物質が津波遡上によって淀川大堰上流側に拡散し、柴島取水口(工水)付近まで到達することが確認された。本条件では水質基準¹⁵⁾を上回ることはなかったが、

化学物質流出シナリオ(総流出量・流出時間)によっては津波来襲時に化学物質の河川遡上による取水障害発生の可能性があることが示唆された。

2) 柴島取水口(工水)での化学物質濃度は第1波による調節ゲートからの越流の影響が大きいことがわかった。

3) 本条件では、淀川大堰の運用によって大堰下流側へは河川水が流下しないように設定されているため、大堰上流側へ拡散した化学物質はその後、大川への河川水流入に伴って、大川へ拡散することが確認された。

また、化学物質密度や河川流量、断層すべり量(津波強さ)による化学物質の挙動比較を行った。

4) 河川水密度より高密度・低密度の2種類の化学物質で比較を行った。化学物質密度によって津波来襲前の化学物質分布状況が異なり、取水口(工水)での最大濃度に差が見られた。具体的には、津波来襲前に淀川大堰直下流付近に高濃度で分布していた高密度化学物質の方が、最大濃度は約6倍の値となった。また、低密度化学物質の場合は、高密度化学物質に比べて長時間取水口(工水)付近に滞留することも確認された。

5) 淀川大堰運用方法の異なる2種類の河川流量で比較を行った。淀川大堰のゲート開度によって津波来襲前の化学物質分布状況が異なるため、取水口(工水)での化学物質濃度の時間変化に差異が見られた。具体的には、河川流量が小さくゲートによって下流側への河川水の流れが遮断されている場合の方が、津波来襲前に淀川大堰直下流付近に高濃度で分布していたため、取水口(工水)での最大濃度は大きい値となった。またゲート開度の大きい河川流量が大きい場合の方が、化学物質が遡上する際の拡散範囲も大きくなることが分かった。

6) 津波強さを内閣府想定¹⁶⁾と同等のものとそれを2倍にしたもので比較を行った。津波強さを2倍にした場合の方が津波の遡上速度が大きいため、取水口(工水)への化学物質到達時刻は約600秒早くなり、化学物質の遡上距離も長くなることが確認された。しかし、津波来襲前の化学物質分

布状況は酷似していたため、取水口(工水)での化学物質最大濃度には差異は見られなかった。

7) 津波来襲時の河川における化学物質挙動は、上記のように複数要因(化学物質密度・河川流量・津波強さ)によって複雑に変化することが明らかになった。特に、取水影響を検討する際の取水口(工水)における化学物質最大濃度の観点では、津波来襲前の化学物質分布状況を大きく変化させる因子である化学物質密度及び河川流量は支配的要因であると考えられる。したがって、化学物質の拡散被害を高い精度で予測するためには、本研究で用いた三次元密度流解析により、化学物質密度を考慮した上で実際に起こりうる条件下での様々なシミュレーションを実施する必要があることがわかった。

また、今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- 1) 本研究では、化学物質の分解や反応・大気中への揮散・水中の懸濁物質への吸着などは考慮していない。より現実に近い化学物質の拡散挙動を把握するためには、これらを考慮した解析モデルの開発が必要となってくる。
- 2) 本研究では、河川水を淡水と設定したが、河川水の塩分を考慮することでより現実に近い挙動解析が可能であると考えられる。
- 3) 本研究では、化学物質流出地点を1点に定めて解析を行ったが、化学物質流出地点による拡散挙動の比較も必要だと考えられる。
- 4) 本研究では、地震動により事業所から漏出し河川に流出した化学物質について挙動解析を行ったが、河床底泥からの溶出や巻上げによる化学物質の拡散についても考慮する必要があると言える。
- 5) 淀川大堰のゲート開度の違いによって、取水への影響にどのような効果があるかさらに検討する必要がある。
- 6) 分子拡散率を化学物質ごとに設定することで、より現実に近い挙動予測が可能であると考えられる。
- 7) 化学物質流出時間(流出開始時刻・流出終了

時刻)の違いが、化学物質の拡散や取水口濃度にどのような影響を及ぼすか検討する必要がある。

謝辞

河川への化学物質流出については、大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻博士前期課程の濱本翔吾氏の予備検討に基づいている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課：平成24年度災害時における化学物質のリスク低減事業報告書，平成25年3月，2013。<<http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4460/00123678/houkokusho.pdf>>，2020年1月26日アクセス
- 2) 金見 拓：利根川水系ホルムアルデヒド水質事故の概要と提起された課題，日本リスク研究学会誌23(2)，pp.57-64，2013。
- 3) Paul D. Capel, et al.: Accidental input of pesticides into the Rhine River, Environmental Science & Technology, Vol.22, No.9, pp.992-997, 1988.
- 4) 吉田聖一：米国 West Virginia 州 Charleston で起きた化学物質貯蔵タンク漏えい事故，圧力技術，第55号，第5号，pp.18-24，2017。
- 5) 気象庁：南海トラフ地震について <<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/nteq/index.html>>，2020年1月26日アクセス
- 6) 東 博紀・小口正弘・遠藤和人・水谷千亜紀：津波氾濫解析を応用した津波堆積物の化学物質汚染の空間分布早期推定に関する考察，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No4, I_1519-I_1524, 2012.
- 7) 中久保豊彦・多田悠人・東海明宏：地震に伴うPRTR対象物質の流出による浄水場機能への影響評価とその対策効果分析，日本リスク研究学会誌26(3)，pp.131-140，2016。
- 8) Shogo Hamamoto, Lisa Ito, Nozomu Yoneyama, Akihiro Tokai: Estimation of the risk under the accident that hexamethylenetetramine flows out to the river due to a direct earthquake, Gold Schmidt virtual 2020, 23th June, 2020.
- 9) 岸本充生：Natech(自然災害起因の産業事故)リスクの評価と管理，安全工学，53(4)，pp.214-219，2014。

- 10) 永島弘士, 米山 望：津波来襲時の河道内塩水遡上に関する数値解析手法の提案, 土木学会論文集中集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.1, pp.19-32, 2017.
- 11) 米山 望・松宮弘信・鮫島竜一：淀川における河川遡上津波発生時の三次元塩水挙動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.265-270, 2010.
- 12) 細田 尚：開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, 学位論文, 京都大学, 1990.
- 13) 小西克享：計算熱流体講義ノート (初版), pp.6 <https://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/Lecture/ThermalFluid/ThermalFluid_1stAll.pdf>, 2020年1月27日アクセス
- 14) 消防庁特殊災害室 石油コンビナートの防災アセスメント指針, 2013.3.
- 15) 水質基準に関する省令, 平成15年5月30日厚生労働省令第101号, <<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/dl/syourei.pdf>>, 2020年1月27日アクセス
- 16) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 津波断層モデル編, 2012.
- 17) 大阪府環境農林水産部環境管理室：化学物質排出把握管理促進法及び大阪府生活環境の保全に関する条例に基づき大阪府内の事業所から届け出された第一種指定化学物質の排出量・移動量および取扱量のデータ (年度) 平成22年度から平成28年度, 2017.
- 18) 永島弘士・笹木将太・William J. PRINGLE・米山 望：数値解析を用いた津波浸水被害優先対策箇所の選定方法に関する考察, 土木学会論文集中集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, I_509-I_514, 2015.

(投稿受理：令和2年10月20日
訂正稿受理：令和3年2月24日)

要 旨

南海トラフ地震発生時には、淀川に近接する事業所から化学物質が漏出し、淀川に流出する可能性がある。その化学物質が津波の河川遡上に伴って拡散し、浄水場に流入することによる取水障害が問題として挙げられる。本研究では、三次元密度流解析手法を用いて巨大津波発生時の淀川における化学物質の挙動解析を実施し、取水への影響を検討した。解析の結果、取水に影響を及ぼす可能性があることを定量的に示した。さらに、複数条件で化学物質の挙動解析を行い、様々な要因によって挙動が変化することを明確にすることで、同解析手法の有用性を示した。