

沿岸に放流される処理水拡散の観測とLESシミュレーション

Field Survey and LES Simulation of Dispersion of Treated Waste Water Disposed in a Coastal area

中山昭彦¹・Jeremy D. Bricker²・本田翔平³

Akihiko NAKAYAMA, Jeremy D.Bricker and Shouhei HONDA

The flow velocity, salinity and temperature distributions were obtained using Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and conductivity and temperature sensors in the coastal area off Tarumi of Kobe-City. The results are analyzed to obtain the diffusion of effluent disposed from an outfall of a nearby treatment plant. Based on this data, a fully three-dimensional Large Eddy Simulation (LES) method has been performed to reproduce the current and the dispersion of the concentration field of the disposed waste from the outfall. No approximation on the pressure distribution and the position of the water surface are made except for the filtering effects due to the unresolved motion. The overall flow appears to be reproduced but the details of the turbulent flow and the reproduction of the turbulent motion responsible for the dispersion need to be further verified with more detailed data.

1. はじめに

沿岸域で放出される汚染水や下水処理水は沿岸の環境に影響を及ぼす可能性があるため、放流位置や放流法の計画には放流水流動と拡散特性の詳細な把握が重要である。海域での物質の乱流拡散の予測法はいくつかある。簡易な方法としてはVisual Plume (Frickら2003) など乱流連行係数を仮定し、ブリュームの軌跡に沿った積分値を予測する方法があるが、平坦地形に限られ流速や潮位の変化も考慮されないなど制約が大きい。放流水の拡散状況は海域の潮流、地形、また混合する海水の成層特性などに大きく影響される。POM (Blumbergら1987), ODEM (中辻ら1992) などは海底地形を考慮し、潮流を計算でき、塩分とともに混合物濃度の計算が可能であるが、静水圧近似をした多層モデルで乱流変動を計算しないので、渦粘性や渦拡散また境界条件も経験則に頼るため、放流地点近傍の3次元拡散の普遍的予測には限界がある。

本研究では、乱流のシミュレーション法としていろいろな分野で適用され、沿岸での拡散のシミュレーションにも適用されTangら (2008), その有用性が示されているLarge Eddy Simulation (LES) 法を上述のような沿岸での乱流拡散の予測・解析に応用する。具体的手法は、これまで著者らが開発・検証してきたNakayamaら (2010) をもとに温度、塩分による浮力変動も考慮した乱流の大スケール運動をシミュレーションすることにより混合物の拡散場の予測をしようとするものである。手法は開水路乱流では幾つかのベンチマーク流れで検証され実河川

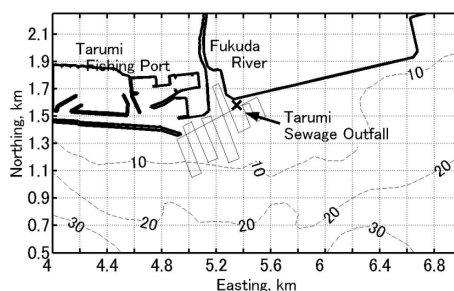
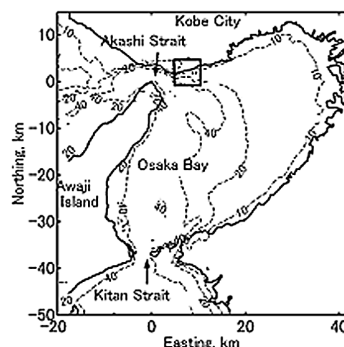


図-1 対象海域

にも応用されているが、非定常で開境界のある沿岸流では検証されていない。著者らが観測を行ってきた海域でのデータを用いて検証する。

2. 観測域と観測方法

対象とする海域は図-1に示す大阪湾西部、明石海峡東側に位置する神戸市垂水処理場の放流口を中心とし、東西約2km、南北約1kmの範囲である。直線的な海釣り公園

1 正会員 Ph.D. 神戸大学教授大学院工学研究科市民工学専攻
2 Ph.D. URS, Corp.
3 学生会員 修(工) JR 東海

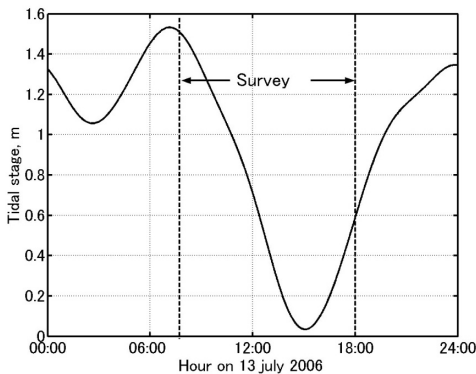


図-2 観測日の潮位時間変化

岸壁に福田川の河口や垂水港の突堤などの尖った海岸線が特徴的である。

観測は2006年の夏季と冬季それぞれ大潮時、と小潮時の約10時間ほど連続して行われた。本稿ではそのうちとくに7月13日満潮時の午前8時から干潮後の午後5時までに行われた観測の結果に注目する。図-2はこの日の潮位を示す。観測日は大潮にあたり観測時間内に潮位は最大1.5m変化している。明石海峡では満潮時には西向き、干潮時には東向きに流速3m/sを越す強い潮流が存在する。観測域では午前8時から午前11時にかけては海峡と同様西流である。11時から12時にかけて引き潮となり東流へと転流する。また、12時から海峡で東流が強くなり14時以降垂水沖では反流が生じるため沿岸部では再び西向きの流れとなる。観測日は西風1.5m/sで風の影響はなく波も20cm程度で穏やかであった。7月14日のNOAAのデータによれば明石海峡周辺の水温は25.5℃、大阪湾東部で最高28.5℃であった。

観測ではADCPおよび曳航式多目的水質計を設置した観測船で観測海域を航行することにより流速3成分と水温、塩分濃度の海面近傍の分布を計測した。ADCPでは水深方向分布を得ることができるが、曳航式水質計1台では固定した水深での分布しか得られないので、別途投入式水質計にて重要な地点での鉛直分布を計測した。同時に水温・塩分濃度計測用の小型CTを二機およびGPS機能を搭載した浮標を処理水放流地点より放流し、追跡することにより放流水の移流・拡散の観測も行われた。計器は水深0.1mおよび1mの位置になるよう取付けられた。同時にGPSを搭載した浮標を放流し、移流・拡散状況も観測した。なお放流された処理水の水温(27℃)と塩分濃度(電気伝導度はほぼゼロ)は一定であったので、放流されたあとの処理水の濃度は水温と塩分濃度の観測値から算出できた。

3. LES法数値計算法

本計算に用いた計算法は著者らが開水路乱流の計算に開発したもののNakayamaら(2010)をもとに海域での拡散のシミュレーションのために、水温と混合水の濃度の計算を導入したものである。以下に概要を記述する。

基礎式はフィルタ平均された速度ベクトル u_i 、と圧力 p についてのBoussinesq近似運動方程式と連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\bar{\epsilon}_{ijk}\Omega_j u_k = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \delta_{i3}(\beta(T - T_0) + \zeta(C - C_0))g - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。ここで Ω_j は地球の回転速度、 T_0 、 C_0 はそれぞれ基準温度と濃度で、 ν は動粘性係数、 β 、 ζ は熱、濃度変化による膨張係数、 g は重力加速度で、 x_3 (z とも記される)方向を鉛直上向きにとっている。水温 T および放流水濃度 C は

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(Tu_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(Cu_j)}{\partial x_j} = \gamma \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (4)$$

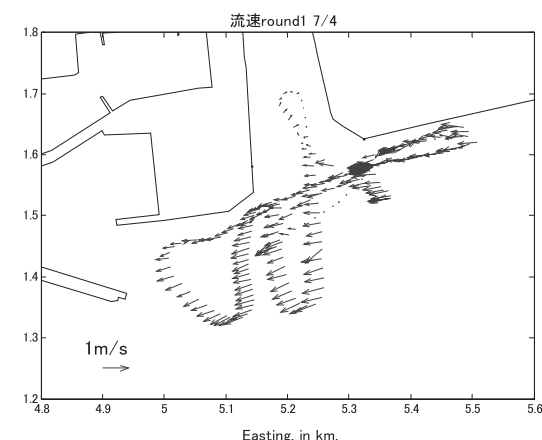
を用いて解く。ここで α 、 γ は温度拡散係数、物質拡散係数で一定としており、サブグリッド応力 τ_{ij} 、サブグリッド熱輸送 q_j 、サブグリッド物質輸送 h_j にはそれぞれ標準Smagorinskyモデルで、および勾配拡散モデルを用いている。Smagorinsky定数およびサブグリッド拡散プラントル数は大気境界層に一般的に用いられる値に倣い、1.1及び0.7とした。

また水面変動は水位 h についての運動学条件の式

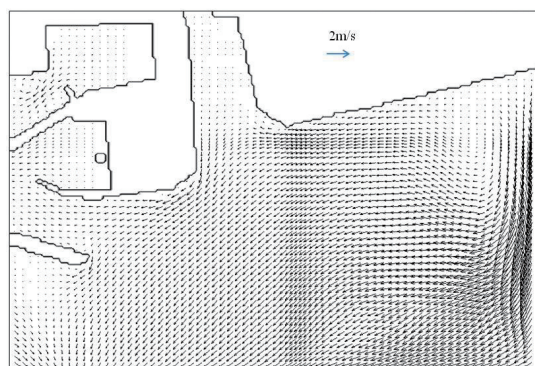
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_{s1})}{\partial x_1} + \frac{\partial(hu_{s2})}{\partial x_2} = u_{s3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を解くことにより得る。 (u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}) は水面での速度成分である。以上のように3次元で3速度成分を解き、圧力にはとくに静水圧分布など近似は用いない。

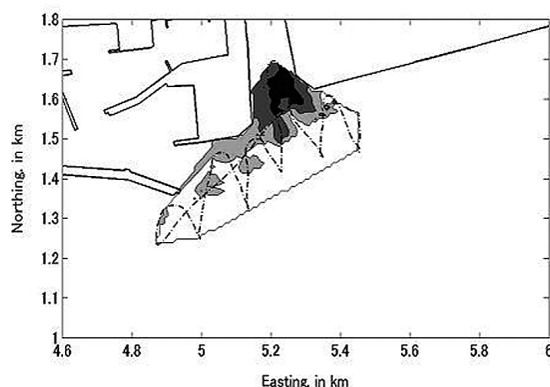
数値計算法はHSMAC法に準じた方法で、圧力は連続式を反復解法にて解く。時間積分は3次精度Adams-Bashforth法で移流項は運動方程式、温度、濃度についても3次風上差分を用い、その他の項を2次精度中心差分で解く。水深関数の式の移流項も3次風上差分を適用している。



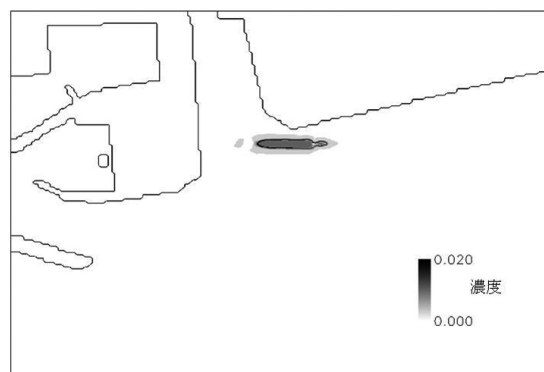
(a) 流速分, ADCP計測結果



(b) 流速分布, LES計算結果



(c) 放流水濃度分布, 塩分温度計測より



(d) 放流水濃度分布, LES計算結果

図-3 西流時の水面近傍流速分布計と放流水濃度分布の観測とLES計算結果の比較、濃度は0.5%間隔の3段階の濃淡、×は放流口的位置

計算格子はで $200 \times 200 \times 45$ の直交格子で、水平方向5m鉛直方向10cmの平たい格子形状である。放流口近傍はやや細かくし2m間隔である。海底地形は1m間隔海底地形より10cm格子で内層している。もっとも深い部分で15mである。

境界条件は海底、海岸では滑りなし条件を、境界に最も近い格子点で適用する。水面は圧力一定、せん断応力ゼロの条件を適用する。その他境界条件であるが、観測された流速を海岸線に対しほぼ垂直な南北境界の一面で与え、後は水深を指定する開境界条件としたBlumbergら(1985)。福田川の河口では一定流入速度 $10\text{m}^3/\text{s}$ の流入を与えた。また放流口からも $1.0\text{m}^3/\text{s}$ の濃度100%の処理水を流入させた。計算初期は静止、水平水面とし、境界の流速、水位を観測値にあわせて与えた。水面下の分布は標準的対数分布とした。また放流水は海底海岸に侵入しない不透過条件を与えた。

乱れを発達させるため流出面での速度、圧力変動を流入側の変動速度として与えた。乱流を捉え、水面波伝播も捉えるのに時間刻みは1/100ほどに抑える為、計算時間は多くとも実時間で1時間に足りない。従って本シミュレーションは潮汐周期に比べ十分短い時間で、特に対象沿岸で西向きの流れが卓越する時間帯と東向き流れの時間帯と分けて行った。

4. シミュレーション結果と観測値との比較

図-3に、沿岸で西向き流れの卓越する満潮に近い時間帯での観測結果と計算結果を示す。観測結果は観測船の航行経路に沿った位置のみである。LES計算結果は計算開始約実時間で20分後の流速分布である。観測に比べ全体的に滑らかな分布であるが、河口や垂水港堤防近傍の乱れが見られる。この図では見られないが海底地形で盛り上がりのある部分で流速が変化している。境界での流

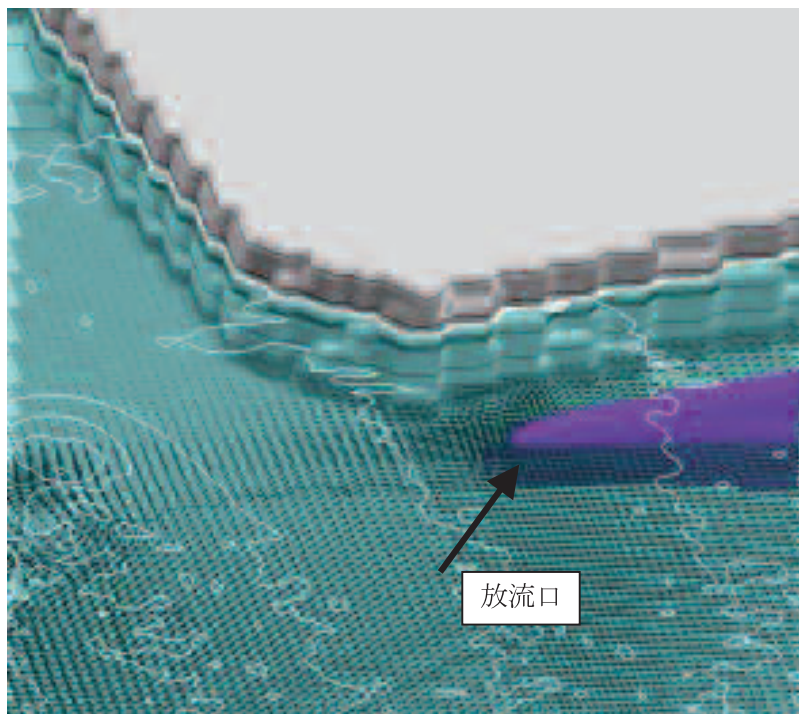


図-4 東流時の放流口近傍の拡大，水面コンタ，水面下2mの流速ベクトル，濃度0.5%の等値面．

速は強制的に観測値を与えている．観測値をある程度平坦化しているものの，全体の釣合は上手く取れていない可能性があり，東端境界近傍でやや変則になっているのが見られる．

図-3 (c) に同じ時間帯での，塩分濃度と水温データより算定した放流水濃度の分布を示している．図-3 (d) に対応する計算結果を示してある．濃度は0.5%間隔の3段の濃淡で示されている．観測では放流水は福田川河口に拡がっているが計算ではあまり広がらずまっすぐ西にのびているのが見られる．これは計算では計算開始から放流水を放流口から放出しているのので，放出総量が少ないのと，実際は長時間前に放出された放流水は周りに広がっているためである．

水面のみの結果では放流口近傍の流況や拡散状況が見えない．図-4に放流口近傍の詳細の計算結果を斜めから見たものを示す．水面下2mの水平面での流速ベクトル分布と濃度0.5%の等値面，さらに水面変動を水位の等高線を表している．岸壁の隅角部での乱れの詳細と水面の変動が見られる．

次に図-5に，沿岸で東向き流れの卓越する引潮時に近い時間帯での観測結果と計算結果を示す．これもLES計算結果は計算開始約実時間で20分後の流速分布である．この時間帯での観測からは全体的に乱れが多く特に堤防近傍などでも乱れが見られる．LES結果でも河口で旋回

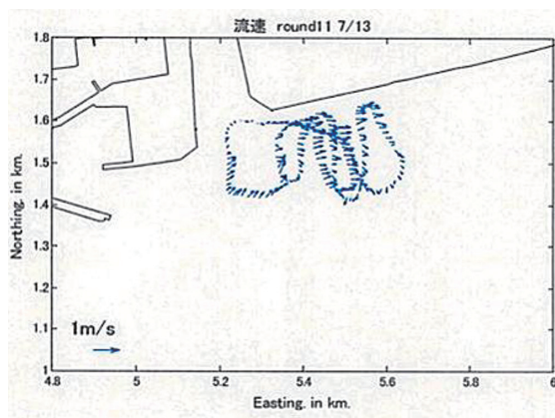
する渦のような流れが捉えられている．

放流水濃度の分布の比較は西流の場合同様計算では放流時間が短いので流れの方向に移流しているが拡散幅は非常に小さい．

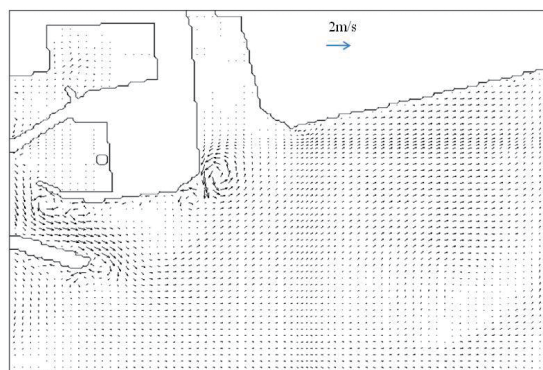
サブグリッドモデルやモデル係数の取り方などはチャンネル乱流などの標準的な値を用い，温度拡散，濃度拡散のサブグリッド拡散シュミット数も一定にとっており検討は要するが，精度ある観測値もひとつようである．

5. 結論

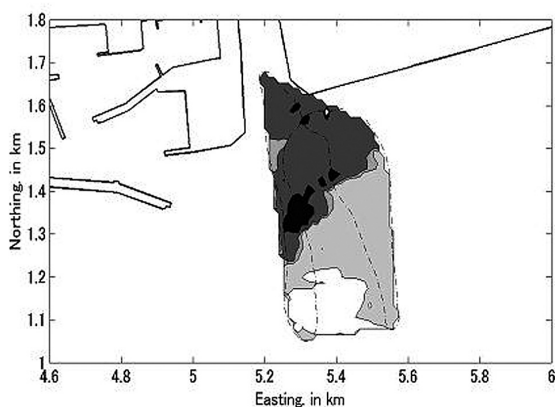
開水路乱流のシミュレーションで検証されているLES法を，沿岸域での放流水の拡散の数値計算に適用し，観測結果と比較した．静水圧や固定水面などを仮定しない乱流計算で，主に放流口近傍の初期拡散と海底，海岸地形の影響を反映できるようなシミュレーションを実施した．2キロメートル四方の海域を約2百万点の直交格子で差分しているが，平均的流れと拡散は捉えられているが，拡散に重要となる乱流変動を捉えるにはさらに細かいメッシュが必要となる．さらに計算された濃度の定量的再現の確認，サブグリッドモデルの改良，浮力による安定性などの影響なども検証する必要があるが，今後の発展が期待される．



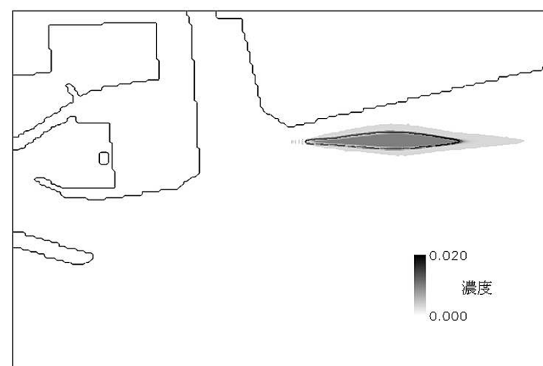
(a) 流速分布 ADCP 計測結果



(b) 流速分布 LES 計算結果



(c) 放流水濃度分布, 塩分温度計測より



(d) 放流水濃度分布, LES 計算結果

図-5 東流時の水面近傍流速分布計と放流水濃度分布の観測と LES 計算結果の比較, 濃度は0.5%間隔の3段階の濃淡

謝辞：本研究を進めるにあたり神戸大学内海域環境教育研究センター, 神戸市環境局, 神戸市建設局, 株エス・イー・エーの協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 中辻啓二・山見晴三・末吉寿明・藤原建紀 (1992) : 大阪湾の恒流系に関する数値実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 906-910.
- Blumberg, A. F. and L. H. Kantha (1985) : Open boundary condition for circulation models, J. Hydraul. Eng., Vol.111(2), pp.237-255.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987) : A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. Ed., N. S. Heaps, Vol. 4, Coastal and Estuarine Sciences, Amer. Geophys. Union, 1-16.
- Bricker, D.J., I. Okabe and A. Nakayama (2006) : Behavior of a small pulsed river plume in a strong tidal cross-flow in the Akashi Strait, *Env. Fluid Mechanics*, Vol.6, pp. 203-225.
- Bricker, D.J.・中山昭彦・青木千夏・高田 誠 (2006) : 変動の激しい潮流に影響される海域での浮標によるプリューム追跡, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 346-350.
- Frick, W.E., P.J.W. Roberts, L.R.Davis, J. Keyes, Baumgartner and K.P. George (2003) : *Dilution models for effluent discharges*, 4th ed., U.S. Environmental Protection Agency, Washington.
- Fujiwara, T., H. Nakata, and K. Nakatsuji (1994) : Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation in a tidal estuary. *Continental Shelf Research*. Vol. 14, n9, pp. 1025-1038.
- Nakayama, A. and N. Hisasue (2010) : Large eddy simulation of vortex flow in intake channel of hydropower facility, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 48(4), pp.415-427.
- Tang, H.S., J. Paik, F. Sotiropoulos and T. Khangaonkar (2008) : Three-dimensional numerical modeling of initial mixing of thermal discharges at real-life configurations, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.134(9), pp.1210-1224.