



ダム・河川・沿岸(港湾)における放射性物質動態

シミュレーション技術の開発

2020年2月21日 第31回CCSEワークショップ

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター シミュレーション技術開発室

山田進

本研究の協力者

町田昌彦、岩田亜矢子 (システム計算科学センター) 北村哲浩、操上広志、佐久間一幸 (福島研究開発部門・福島環境安全センター) 宮本泰明、大岡誠、川瀬啓一、渡辺将久 (福島研究開発部門・企画調整室) 船坂英之 (元福島研究開発部門・企画調整室) 名古屋、木野、山口、鈴山 (アーク情報システム)











はじめに



福島第一原子力発電所(1F)の事故により環境中に放出された 放射性物質の水系による動態の評価



重要課題:水系(ダム・河川・沿岸)における 放射性物質放射性物質の動き



これらの動態を評価するためのシミュレーション手法と 典型的なシミュレーション結果を紹介





対象とする地形による シミュレーション手法の違い

河川

川幅と比較し水深が浅いため、 2次元シミュレーション

ダム・沿岸

水深が深く上層と下層での振る舞いが異なることもあるため、3次元シミュレーション

対象とする放射性物質による 振る舞いの違い

セシウム

多くが小さい土砂に吸着するため、 流水中の浮遊砂の振る舞いと同じと みなせる

トリチウム(溶存体セシウム)

水と区別できないため、その振る舞いは 水と同じとみなせる



2次元シミュレーション(河川)



連続の式(質量保存)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0$$

運動方程式(運動量保存)

 $\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg\frac{\partial H}{\partial x} - \tau_x + D^x$ $\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg\frac{\partial H}{\partial y} - \tau_y + D^y$

流速u(v)・水位hを計算する





g:重力加速度(9.8m/s²) D^x (D^y):拡散項



台風による洪水時のシミュレーション(2015年9月7日0時からスタート)を実施











河川敷に多く堆積していることが確認できる

[1] iRIC, https://i-ric.org/ja/[2] S. Yamada, et. al., Proc. of M&C+SNA+MC 2015, 2015.



請戸川河口付近の2Dシミュレーション:結果





水深が深くない河川であれば2D シミュレーションで計算できる Sanada



2012年12月無人へリにより測定 Sanada, Y,. Et. al, Exploration Geophysics 45(1) 3-7, 2013. http://dx.doi.org/10.1071/EG13004



3次元シミュレーションの必要性





水深が深い場合は3次元性を考慮する必要がある



2Dと同様に連続の式(質量保存)および運動方程式(運動量保存)を 組み合わせて流速・水深を計算

鉛直方向の流速の計算方法をどうするか?

静水圧近似と非静水圧近似

静水圧近似

- 水平方向の流速を計算して、それに 合わせて鉛直方向の流れを計算する
- 鉛直方向の流れが小さければ有効

こちらを利用

非静水圧近似

- 水平方向と鉛直方向の流速を同時に計算
- 鉛直方向の流れを詳細に再現できる

連立一次方程式を計算する必要があり 計算量が大きい



高性能計算にはこの部分の 高速化が重要











3次元シミュレーション(ダム)







3次元シミュレーション(ダム)



3次元シミュレーション結果







- 水温の成層化を再現できない
- シグマ座標系では横方向のセルは 高さが同じとは限らない
- 水平に移動したつもりが鉛直にも 移動している





クリープ補正



水平方向のセルの高さが違うため、異なる高さの水温での比較により計算 実際の現象とは異なる(温度成層化が再現できない原因) 水平方向の値として、同じ高さの温度を補間(水平拡散に関する問題を回避) 圧力も同様に補正することで水平圧力勾配に関する問題も回避できる

参考: Stelling, G. S. et. al., Int. J.Numer. Methods Fluids, Vol.18, 1994, pp.915-935. 入江他、海岸工学論文集、50巻(2003)pp.361-365



3次元シミュレーション(ダム)



3次元シミュレーション結果(補正あり)





水平方向の圧力、水温の補正により、水温の成層化を再現



季節によるダム内の流れを 評価することが可能に



3次元シミュレーション(沿岸)



1F港湾を含んだ沿岸の3次元 地形の変化に合わせてメッシュ シミュレーション サイズを変更 領域全体を均一なメッシュサイズで 分割するれば、前述のコードで3次元 変化が大きい(海岸付近・港湾) シミュレーション可能 メッシュサイズを小さく メッシュサイズ:m単位 変化が小さい(外洋) ✓ 1F港湾内の動態を評価できる メッシュサイズを大きく ✓ 計算量は多くなる メッシュサイズ:数百m~km単位 ✓ 少ない計算量で広範囲を計算可能 ✓ 1F港湾が数メッシュで表現 領域を適切にいくつかの領域に分割して、 港湾の形状の再現性は悪い それらを入れ子構造(ネスティング)にして 港湾内の動態の精度に問題 シミュレーション



3次元シミュレーション(沿岸)



ネスティング



1つの領域に小さい領域が

複数個入っていてもよい

入れ子構造の領域ごとに流れ場等を計算しその計算結果を1つ大きいまたは小さい領域の境界条件として利用する





3次元シミュレーション(沿岸)









3次元シミュレーション(沿岸)



- 2つの川(請戸川、前田川)の影響を考慮したシミュレーション
- シミュレーション開始日時 2014年10月13日 0時
- ・ 気象データ:

 気象データ:
 2014年10月13日
 0時から21時まで

(21時以降は21時のデータを利用)

• 初期条件

海水 水温:20℃ 塩分:3.42%

MANAL_2014101321 1000mb Wind



2014年10月13日午後9時の風速

• 境界条件

河川・K排水路からの流入量

塩分:0% 水温:25℃

時間	流量 (m ³ /sec)		
	請戸川	前田川	K排水路
0-2	200	100	1
2-14	200	100	10
14-	10	5	0.1



3次元シミュレーション(沿岸)











適応格子

地形変化よりもメッシュサイズが 大きいので正確に表現できない





地形に合わせてメッシュサイズを変更





赤い領域が計算点

地形をより正確に表現できる







非静水圧近似を用いたシルトフェンスのモデル化



計算量が多いため、必要な部分のみ非静水圧近似で計算して ネスティングで静水圧近似のコードに接続する

参考文献:金山進,安井章雄,古牧大樹,安野浩一朗,琴浦毅,膜と流体の練成解析のための簡便なアルゴリズム,土木学会論文集 B2 (海岸工学),68 (2012), I 811-I 815.



まとめ



福島第一原子力発電所(1F)の事故により、環境中に放出された放射性物質の水の影響による動態を評価するシミュレーション手法と、この手法を用いて得られた典型的な 計算結果を紹介



水系による放射性物質の動態評価 計算機シミュレーションが有力な評価手法の1つに