

洪水氾濫に伴う油流出解析モデルの開発

Numerical modeling of flood-induced oil spill

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生会員 高橋広大 (Kodai Takahashi)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 岩崎理樹 (Toshiki Iwasaki)
 寒地土木研究所寒地河川チーム 正会員 井上卓也 (Takuya Inoue)
 佐賀大学理工学部理工学科都市工学部門 正会員 大串浩一郎 (Koichiro Ohgushi)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

近年、気温上昇に伴う異常気象が発生しており、我が国においては令和元年10月に発生した台風19号をはじめ、過去からは想定できない規模の災害を引き起こしている。その中でも令和元年8月27日から28日にかけて秋雨前線の活発な活動により九州の広範囲に強い雨雲がかかり、佐賀県全域にかけて大雨が発生した。特に六角川水系六角川を有する佐賀県大町町においては、近傍の南溪雨量観測所で、およそ毎時100mmの雨が二時間にわたり観測され、六角川左岸側で内水氾濫が発生し、最大3mを超える浸水を記録した。この内水氾濫により、大町町に位置する佐賀鉄工所からクエンチオイルが流出する事故が発生した(図-1)。この流出した油は下流に位置する住宅地や病院にまで流れ込み、田畑の汚染や居住困難など甚大な被害を発生させた。

このような油流出事故による二次災害を防ぐためには事前に流出事故による被害範囲、汚染リスクを把握したうえで油タンクの位置を決定したり、ある種のハザードマップの様なものを作成するなど対策が必要となる。そのためには、氾濫流によって移動・拡散する油の挙動を把握できる計算モデルが必要となる。しかし、現状では海域における油流出を対象とするようなモデルは数多く存在する¹⁾が、本事例のように陸地、特に家など構造物が存在する地域において氾濫流によって輸送される油の移動を評価するモデルに関する検討は不足している。予測を超えた異常気象が発生する昨今、このような事故はますます増加していくと考えられ、油流出被害を予測するツールとして高精度に解析を行うことができる数値計算モデルの開発が望まれる。

そこで本研究では、上記の事故を取り扱い、汚染リスクの評価が可能となるような非海上を対象とした油移動拡散モデルを構築した。構築したモデルを、簡単な油拡散条件と六角川における油流出事故に適用し、モデルの適用性と予測可能性について検討した。

2. 数値計算モデル

本研究ではiRIC²⁾に同封されている非定常二次元浅水流モデルを基にした氾濫モデルであるNays2dFloodに新たに油輸送拡散モデルを組み込み、対象とした六角川における油輸送解析を行うこととした。以下、本研究で構



図-1 油流出事故の様子(共同通信社より)

築したモデルの概要について述べる。

2.1 油輸送モデル

油の輸送拡散を数値的に扱う方法としては、大きくEuler型とLagrange型のモデルがあるが、本研究ではTklich et al.³⁾を参考に、Euler型の油輸送方程式を採用した。式(1)に直交座標系における油輸送方程式を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = Q_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 h : 水表面の油厚さ、 u, v : 油輸送速度、 D : 拡散係数、 Q_0 : 油の発生項である。ほかの物質輸送に対して油輸送の特徴的な点は、油が乱流拡散のみならず、油自身の特性によっても拡散することである(油拡散: spreading⁴⁾)。これらの影響は、以下のように拡散係数とゼロ方程式乱流モデルを用いた乱流拡散成分と、重力-粘性卓越領域における油拡散成分を足し合わせることでモデル化される。

$$D = \frac{gh^2\rho_o(\rho_w - \rho_o)}{\rho_w f} + \frac{\kappa}{6} u_* h_w \quad (2)$$

ここに、 g : 重力加速度、 ρ_w : 水の密度、 ρ_o : 油の密度、 f : 水と油の摩擦に関する係数、 κ : カルマン定数、 u_* : 摩擦速度、 h_w : 水深である。また、油輸送速度については、水深平均モデルの枠組みでは、水深平均流速に対して水面上の風の影響を考慮することで、以下のように推定することが多い。

$$(u, v) = \left(u_x + \frac{\tau_x}{f}, u_y + \frac{\tau_y}{f} \right)$$

$$= (u_x + 0.03U_x, u_y + 0.03U_y) \quad (3)$$

ここに u_x, u_y : x, y 方向の水深平均流速, U_x, U_y : x, y 方向の
水面上方 10m における風速である。また, Q_o は単位時
間単位面積当たりの油の流出量であり, 次式で与える。

$$Q_o = \frac{Q}{A_s T_o} \quad (4)$$

ここに, Q : 油の総流出量, A_s : 流出面積, T_o : 流出
時間である。Tkalic et al. は, 油の乳化など状態変化や,
表面, 水, 底面間の油の交換を考慮しているが, 本研究
では短期問題に加え, 海域を対象としないことから, こ
れらの影響は無視して, 水表面の油厚さを計算すること
で, 油の挙動を表現することとした。

2.2 計算スキーム

本計算のような油の輸送拡散を考える際, 与えた物質
の量と拡散域は非常に重要な関係がある。そのため系内
に存在する物質の量は計算過程で不変であり, かつ可能
な限り数値拡散が小さい計算スキームが必要である。そ
こで本研究では, 移流項の解法として保存性を保証しつ
つ数値拡散が小さい解法の一つである CIP-CSL2 法
(Constrained interpolation profile-Conservative semi-
Lagrangian scheme)⁵⁾を用いた。非移流項の計算は中央差
分法を用いた。

移流項の解法として用いる CIP-CSL2 は, 完全保存保
証型 CIP 法である。この方法では, 計算物理量の方向積
分値に対して補間関数を用いることにより, 計算点間の
プロファイルを保存し, 分布と総量の保存を保証するこ
とができるものである。しかし, ここで対象としている
油拡散計算で検討した結果, CIP-CSL2 のみではアンダ
ーシュートやオーバーシュートが発生する問題が存在す
ることが示唆された。そこで CIP-CSL2 に有理関数を用
いる R-CIP-CSL2 を用いた⁵⁾。R-CIP-CSL2 法は, CIP-
CSL2 における補間関数に有理関数を用いて, オーバ
ーシュートやアンダーシュートを抑制する手法である。以
下, 1 次元の CIP-CSL2 法について簡単に説明する。

CIP-CSL2 では, ある物理量 (ここでは油厚さ h) に
対して空間積分値を式(5)のように定義する。

$$D = \int_{x_i}^{x_{i+1}} h dx \quad (5)$$

CIP-CSL2 ではこの空間積分値を式(6)のように三次関数
で補間し, 物理量については式(5)の関係より, 式(7)の
ように求めることができる。

$$D_i = a\zeta^3 + b\zeta^2 + h_i^n \zeta \quad (6)$$

$$h_i^{n+1} = 3a\zeta^2 + 2b\zeta + h_i^n \quad (7)$$

なお, セル内の物理量の総量 σ は式(8)で定義され, こ
れらの時間変化は式(6)から求まる Δt 間にセルから流入
する質量フラックスの差により式(9)のように求める。

$$\sigma_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} h dx \quad (8)$$

$$\sigma_i^{n+1} = \sigma_i^n + D_i - D_{i+1} \quad (9)$$

なお,

$$\zeta = -u_x \Delta t \quad (10)$$

$$i_{up} = i - \text{sign}(u_x) \quad (11)$$

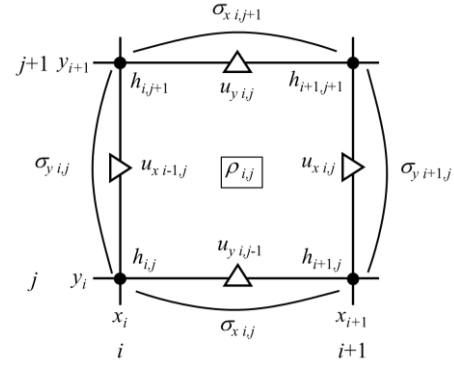


図-2 Staggered 格子における変数定義点

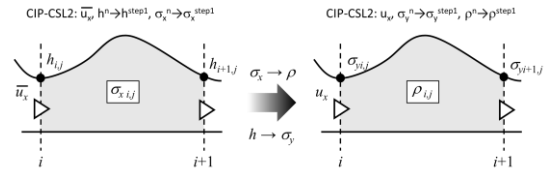


図-3 格子点値, 線積分値, 面積分値の更新

$$icell = \begin{cases} i & u_x > 0 \\ i-1 & u_x < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$a = \frac{h_i^n + h_{i_{up}}^n}{\Delta x^2} + \frac{2\text{sign}(u_x)\sigma_{icell}^n}{\Delta x^3} \quad (13)$$

$$b = -\frac{2h_i^n + h_{i_{up}}^n}{\Delta x} - \frac{3\text{sign}(u_x)\sigma_{icell}^n}{\Delta x^2} \quad (14)$$

である。上式は 1 次元の CIP-CSL2 であるが, R-CIP-
CSL2 では式(6), (7)の補間関数に有理関数を用いたもの
となる。

本研究では二次元解析となるため, 式(8)と同様に 2
方向の線積分値 σ_x, σ_y , および面積分値 ρ を以下のよう
に定義する必要がある。

$$\sigma_x = \int_{x_i}^{x_{i+1}} h dx \quad (15)$$

$$\sigma_y = \int_{y_j}^{y_{j+1}} h dy \quad (16)$$

$$\rho = \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} h dx dy \quad (17)$$

Nays2dflood は格子系に staggered 格子を採用しており,
図-2 に示すセル境界面で定義される流速を用いて連続式
が計算され, 流体の質量が保存される。このスキームに
対して, 上記 CIP-CSL2 法を適用するために, 図-2 のよ
うに格子点上に油厚さ h を定義することで, 連続式のコン
トロールボリュームと CIP-CSL2 で求める面積分値 ρ
の定義セルが同一になるようにした。

二次元計算では油厚さ h に加えて x, y 方向線積分値
 σ_x, σ_y と面積分値 ρ を二次元移流方程式に従い更新する必
要がある。この解法については, x, y 方向の移流項に対
してフラクショナルステップ法を適用し, 上記で示した
1 次元 CIP-CSL2 法によって各方向の移流項を計算した⁵⁾。
このとき, 図-3 に例として示す通り, 式(5)～(14)に
示す h と σ といった点値と線積分値にかかる更新は, 図-

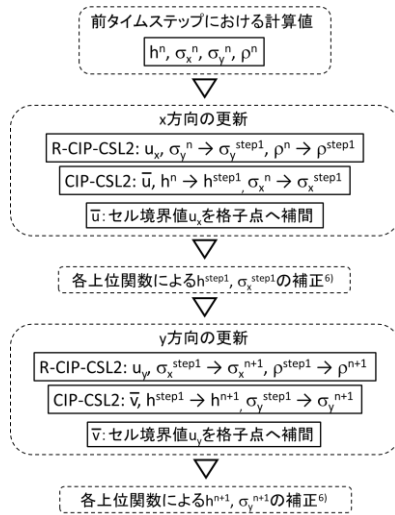


図-4 移流項解法フロー

2 の変数定義点の関係を考えれば、線積分値と面積分値にも成り立つ。すなわち、1 次元 CIP-CSL2 の離散式において h と σ を、 σ_x, σ_y と ρ などと置き換え、適切な流速を用いるだけで同様の方法により値の更新が可能となる。これをまとめたものが、図-4 に示す移流項の解法フローチャートであり、4 回の一次元の CIP-CSL2, R-CIP-CSL2 の計算を行うことで全ての関数を更新できる。ここで h を含む計算においては、流速は格子点の値を用いるが、staggered 格子の関係上、流速は図-2 に示すセル境界に定義されている。そのため、格子点定義である h を更新する際には、これを挟む 2 点間の流速を平均したものを用いることとなる。しかし、この流速は、連続式で用いる流速ではないため、連続式で保障されている質量保存性が満たされず、結果として油の保存性が崩れる原因となる。これは、実際にはオーバー（アンダー）シュートとなって計算結果に影響する。これは、有理関数を用いても効果がないため、ここでは内田・河原⁶⁾を参考に以下のように補正を行った。

図-5 に関数の値を補正する際の図を示す。図-5 に示すように格子点量 h の値は、物理的には挟まれる上位関数 σ から求まる線（面）平均値の間に収まるはずである。図 2 からわかるように h の上位関数の更新のうち、図 4 において R-CIP-CSL2 法により計算される部分では、流体の連続式と同様のコントロールボリュームで物理量の収支が計算されるため、連続式の観点から質量保存に対して矛盾なく値が計算されている。そこで、これを基準として、図-5 のように h の値を線（面）平均値の値に収まるように補正した。このように補正することによってオーバーシュート、アンダーシュートの成長を抑えることが可能となり安定的に計算を行うことができる。

3. 数値計算と考察

上記の油輸送拡散モデルを Nays2D Flood に組み込むことで、流れと油輸送の計算を行う。以下では、まずモデルの確認として、単純な場における油拡散を計算する。そのうえで、六角川における油流出過程に適用する。

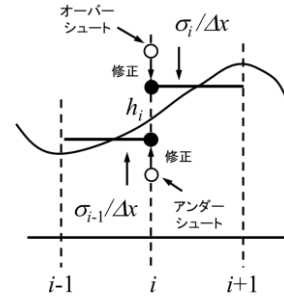


図-5 関数補正の図解

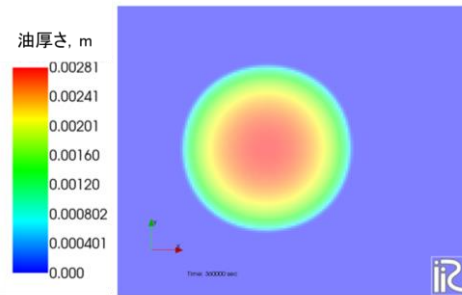


図-6 瞬間流出油の拡散結果

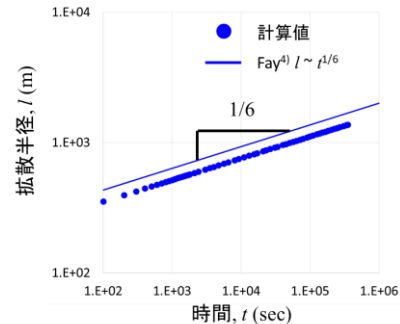


図-7 時間と拡散半径の関係

3.1 瞬間放出された油の拡散過程

松崎・藤田¹⁾を参考に、総量 10000 m³ の油を面積 662400 m² から瞬間流出させ、100 時間までの油拡散について計算した。図-6 に流出後 100 時間の結果を示す。なお、格子数は 151×151（格子サイズ：40×40m）であり、水の密度 $\rho_w = 1000$ g/cm³、油の密度 $\rho_o = 861$ g/cm³ とした。図-7 は、このようにして計算された油の拡散半径 l の時間変化を示したものである。一方、油の拡散半径の時間変化については Fay⁴⁾により理論的な検討が実施されている。Tkalic et al. のモデルで用いられている油拡散を示す拡散係数は、Fay の検討における重力-粘性力つり合い領域のものであり、Fay と同様の考え方によれば、油の拡散半径 l の時間変化は次式で表されるように時間 t の 1/6 に比例する。

$$l = \left(\frac{\Delta \rho g V^2}{2\mu} \right)^{\frac{1}{6}} t^{\frac{1}{6}} \quad (18)$$

ここに、 $\Delta \rho$ ：水と油の密度差、 V ：油の総量、 μ ：粘性係数、 δ ：水-油の境界層厚さである。図-7 よりわかるように計算結果はこの理論的關係をよく表現しており、構築した計算モデルは Fay や Tkalic et al. により考察されている油拡散を矛盾なく計算できていることがわかる。

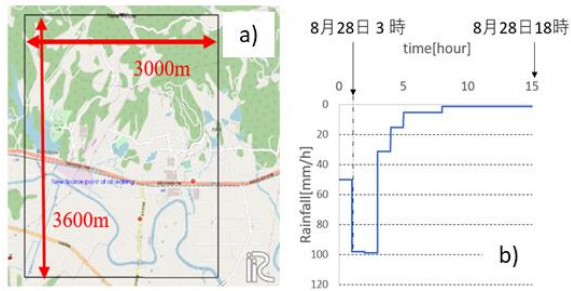


図8 六角川における油流出計算条件.

a)計算範囲, b)計算領域に与えたハイドログラフ.

3.2 六角川における油輸送拡散計算

(1) 計算条件

計算は図-8a に示す範囲を 601×501 (6×6 m) の格子数で計算格子を作成し, この領域全体に図-8b に示す南溪観測所で観測された降雨を一樣に与えた. なお, 地形データは国土地理院基盤地図情報数値標高を使用して計算格子の初期地形とし, 計算開始から2時間後~10時間後まで, 油の流出量の合計が実際の事故と同様の 54 m^3 となるように油の流出を与えた ($Q_0=18.76 \text{ l/s}$). また, 風の影響は考えないものとして計算を行った.

(2) 結果と考察

流出開始2時間後の水深コンターに油厚さコンターを重ね合わせた結果を図-9a に示す. この結果を見ると, 油は堤防に沿って流れたあと, 図-9b に示すように比較的標高が高い病院を囲うように流下していることが確認できる. このように今回対象とした陸地の起伏, 建物が存在する陸地を対象とした時空間的に変化する氾濫流によって輸送される油の挙動をある程度, 解析できていると考えられる.

一方で, 図-9b と図-1 の比較よりも分かるように実際には油は南に流下せず, 何らかの流れによって北東に向かって流下している. 計算からおよそ10時間後の結果(図-9b)では, 水が貯留した後に油が流出し, 鉄工所付近で拡散・停滞しているだけで, 図-1 の様に強い流れを受けた輸送は行われていない. また, 油が工場から病院まで到達する時間についても過大評価している傾向にある. これは, ここで計算された内水氾濫の挙動が実際とは異なっている可能性を示唆している. このような流れの再現性だけでなく, ここでは無視している風の影響などの要因も考えられるため, 油の輸送拡散の再現精度を上げるためには, これらの点について更なる検討が必要である.

4. まとめ

本研究では, 今後多発すると考えられる非海上における油流出によるリスクを事前に予測・評価することを目的として, Euler 型の油輸送方程式を氾濫解析モデルである iRIC Nays2d Flood に適用した. 構築したモデルを用いて簡易な場における油の拡散現象, 並びに六角川で発生した内水氾濫による油流出過程を解析し, モデルの性能と再現性について考察した. 油の拡散のモデルにつ

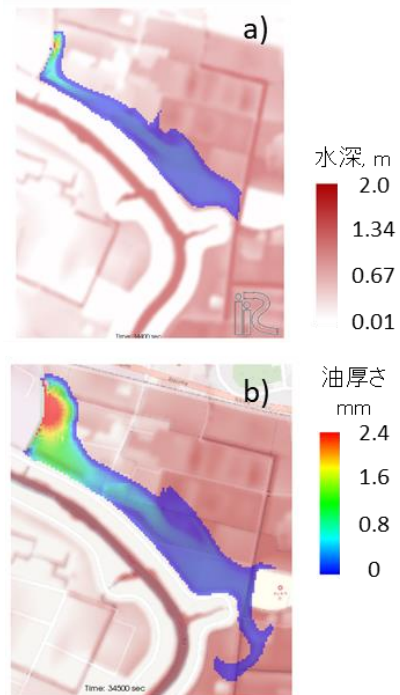


図-9 氾濫流による油移動拡散解析結果.

a) 計算開始2時間後, b)計算開始10時間後.

いては Fay による理論式の結果と概ね合致しており, 構築したモデル, 計算スキームは良好であると考えられる. また, 六角川における油流出過程では, 施設, 陸地の起伏がある場での氾濫流により輸送される油の挙動を解析することができた. 一方で, 実際の事例に適用し再現計算を行うためには時系列的に変化する風向, 風速などその他の要因を考える必要があると考えられる. そのため, 今後油の輸送に影響を与える項目について精査を行い, より再現性の高い計算モデルを構築する予定である.

参考文献

- 1) 松崎義孝, 藤田勇: 海水面における流出油の拡散・移流に関する数値計算法の開発と油流出事故の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.1, pp.15-30, 2014.
- 2) iRIC Project: <http://i-ric.org/ja/>
- 3) Tkalic, P., Huda, MDK. and Gin, KYH.: A multiphase oil spill model, Journal of Hydraulic Research, Vol.41, pp.115-125, 2002.
- 4) Fay, JA.: The spread of oil on a Calm Sea, Plenum Press, pp.53-64, 1969.
- 5) Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T. and Takizawa, K.: Exactly Conservative Semi - Lagrangian Scheme for Multi-dimensional Hyperbolic Equations with Directional Splitting Technique, Journal of Computational Physics 174, pp.171-207, 2001.
- 6) 内田龍彦, 河原能久: 二次元浅水流の保存型 CIP 陽解法の開発とその検証, 応用力学論文集, Vol.9, pp.917-924, 2006.