この講演会は技術者継続教育機構認定プログラム申請中です.

平成２９年度応用水理研究部会
講　演　集

平成29年12月2日

ウインク愛知

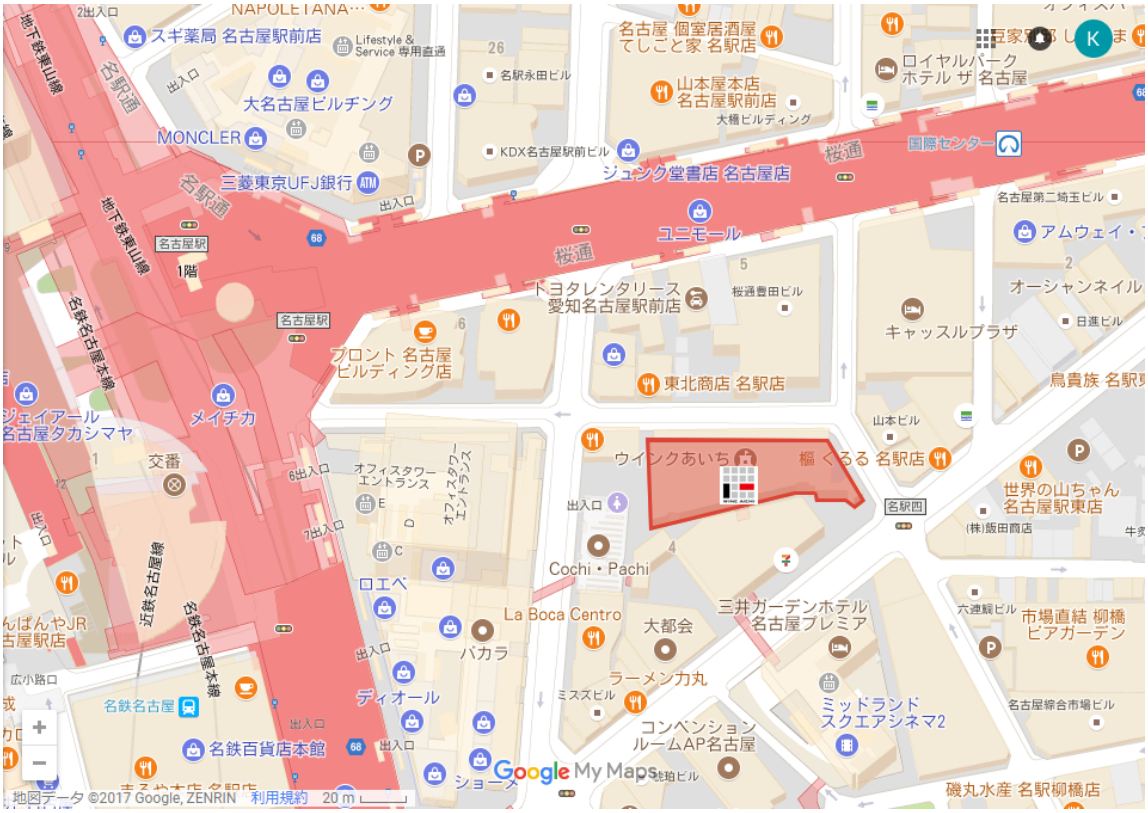
（公社）農業農村工学会応用水理研究部会

―――＜＜発表者の皆様へ＞＞―――

・発表時間は25 分（20 分発表＋5 分質疑）です.
・PC（Windows10, PowerPoint2016）を準備しておりますが，ご自身のPCをつないで頂くことも可能です.

―――＜＜参加者の皆様へ＞＞―――

会場は愛知県産業労働センター　ウインク愛知　1106会議室です．JR名古屋駅桜通口からミッドランドスクエア方面徒歩5分です.



平成29年度応用水理研究部会講演会プログラム（於：ウインク名古屋）

開始時刻	内容	講演者／座長	題　　目	ページ
10:00	開会挨拶			
	第1セッション	座長：仲村渠将		
10:10	発表課題１	○原啓太郎	格子ボルツマン法を用いた多孔質媒体における非混合性流体の置換現象の再現	3
10:35	発表課題２	○土橋正幸	羽束川流域における SWAT モデルを用いたリン負荷量の推定	6
11:00	発表課題３	○田畑俊範	有明海における貧酸素水塊の動態解析に向けた 3 次元 ・ 座標系モデルの開発	11
11:25	発表課題４	○福田晃大	ネスティングを導入した2次元単層モデルによる大量の河川水の挙動追跡	15
11:50	休憩			
	第2セッション	座長：木村匡臣		
13:00	発表課題５	○福田信二	簡易 GPS 機器を用いた小河川の流速分布解析	20
13:25	発表課題６	○Otieno Ndede	Robust optimal harvesting policy for fish in a pond with price volatility　（価格ボラティリティを有する養魚のロバスト最適水揚げ戦略）	22
13:50	発表課題７	○宇波耕一	Lipschitz continuity of value functions solving a dynamic programming problem for a water storage tank （貯水タンクに対する動的計画問題の解となる価値関数のリプシッツ連続性）	26
14:15	発表課題８	○尾﨑彰則	塩分を含む閉鎖性水域の降雨によって形成される 塩分成層の定量化と可視化に関する研究	28
14:40	休憩			
	第3セッション	座長：竹内潤一郎		
15:10	発表課題９	○山村 愛二	TM/TC を用いたチェックゲート操作による需要主導型配水システムの提案	34
15:35	発表課題１０	○浅田洋平	水撃作用による管路内の圧力波形を利用した漏水位置と漏水量の推定について	39
16:00	発表課題１１	○内藤　和樹	ウルトラファインバブルによる赤土粒子の凝集・沈降の鈍化現象	44
16:25	総合討論			
16:50	閉会挨拶			
17:00	代表幹事会			

格子ボルツマン法を用いた多孔質媒体における非混合性流体の置換現象の再現
Reproduction of Displacement of Immiscible Fluids in Porous Media Using Lattice Boltzmann Method

○原 啓太郎*・竹内 潤一郎*・藤原 正幸*
HARA Keitaro, TAKEUCHI Junichiro, and FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

多孔質媒体における，水-石油，水-空気といった非混合性流体の片方の流体によるもう一方の流体の置換（浸透）は，シェール層におけるオイルの回収や NAPL（Non-Aqueous Phase Liquid）による地下水汚染，土壌の水分保持特性など多岐にわたる事象に関係する現象である．この現象の解析には，多孔質媒体内の流路の複雑さなどから巨視的な支配式である Navier-Stokes 方程式を直接解くのではなく，インベージョンパーコレーションや格子ボルツマン法のような別のモデルを用いた解析が行われている．

格子ボルツマン法（Lattice Boltzmann Method, 以下 LBM）とは，1980 年代後半より注目されている数値流体解析手法である．本研究では，LBM の混相流モデルのひとつである RK（Rothman and Keller）モデルを使用する．RK モデルには表面張力や密度比，動粘性係数比をそれぞれ独立に制御できるという利点がある．

本研究では，RK モデルを用いた非混合性二相二次元 LBM モデルを c++により実装し，多孔質媒体における非混合性流体の置換現象の数値計算を行う．

2. 非混合性二相二次元 LBM モデル

本研究では，x, y 方向をそれぞれ幅 Δx で分割した正方格子を用いている．このモデルは 2 次元 9 速度モデル（図 1）と呼ばれ，この時離散速度ベクトル $\vec{\mathbf{c}}_i$ （$i=1\ldots9$）は式(1)で表される．

$$\{\mathbf{c}_i\}=\left\{\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix},\begin{pmatrix}-1\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}0\\-1\end{pmatrix},\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix},\begin{pmatrix}-1\\1\end{pmatrix},\begin{pmatrix}-1\\-1\end{pmatrix},\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix}\right\} \quad (1)$$

RK モデルでは，位置 $\mathbf{x}$，時刻 t における流体 k の密度分布関数 $f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t)$ は，以下の時間発展式に従って陽的に求められる．

$$f_i^k(\vec{\mathbf{x}}+\vec{\mathbf{c}}_i,t+1)=f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t)+\Omega_i^k\left(f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t)\right) \quad (2)$$

ここで Ω_i^k は衝突項であり，式(3)のように 3 つの項により決定される．

$$\Omega_i^k=\left(\Omega_i^k\right)^{(3)}\left[\left(\Omega_i^k\right)^{(1)}+\left(\Omega_i^k\right)^{(2)}\right] \quad (3)$$

式(2)の時間発展式は以下の 4 つの項をそれぞれ計算し，求められる。

(1)粘性項: $\left|f^k(\vec{\mathbf{x}},t_*)\right\rangle=\left(\Omega_i^k\right)^{(1)}\left(\left|f^k(\vec{\mathbf{x}},t)\right\rangle\right)$

(2)界面張力項: $f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t_{**})=\left(\Omega_i^k\right)^{(2)}\left(f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t_*)\right)$

(3)再配色項: $f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t_{***})=\left(\Omega_i^k\right)^{(3)}\left(f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t_{**})\right)$

(4)移流項: $f_i^k(\vec{\mathbf{x}}+\vec{\mathbf{c}}_i,t+1)=f_i^k(\vec{\mathbf{x}},t_{***})$

それぞれの項について，詳しくは参考文献の[1-3]を参照されたい．また表 1 に格子ボルツマン法で用いられる単位を示す．SI 単位系から LBM 単位への変換は，密度比や粘性係数比などの無次元数を用いて行われる．

表 1 LBM 単位
Table1 Units in LBM

	Unit
質量	mu（mass unit）
長さ	lu（lattice unit）
時間	ts（time step）

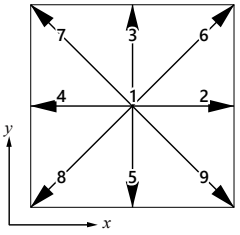


図 1 2 次元 9 速度モデル
Fig.1 D2Q9

*京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University
キーワード：水分移動，フィンガリング，格子ボルツマン法，Rothman and Keller モデル

3. 数値実験

3. 1. 二層クエット流

実装したプログラムの妥当性を確認するベンチマーク問題として，二層クエット流の数値計算を行う．図 2 に概略図と表 2 に計算に用いたパラメータを示す．ここで，A は界面張力にかかわるパラメータであり，β は界面厚さにかかわるパラメータである．またρ は流体の密度，τ は緩和時間係数で粘性係数にかかわるパラメータである．また添え字 1, 2 は 2 種類の流体を表す．計算格子は10×100とし，上下境界はすべりなし境界，左右境界は周期境界とした．流体 1 を平板間の中央部分（$0<|y|<a$）に，流体 2 をそれ以外の部分（$a<|y|<b$）に配置し，体積力$\varsigma=1.5\times10^{-8}$を x 軸に平行に両流体に加えた．また，計算値$u_x$と理論値$u_x^{anl}$との比較は$x=5$の断面にて行い，その誤差$E_{(t)}$は式(4)，また収束条件は式(5)のようにした．

$$E_{(t)}=\frac{\sum_j\left|u_x(j,t)-u_x^{anl}(j)\right|}{\sum_j\left|u_x^{anl}(j)\right|} \tag{4}$$

$$\left|\frac{E_{(t)}-E_{(t-10^3\Delta t)}}{E_{(t-10^3\Delta t)}}\right|<10^{-4} \tag{5}$$

上記の計算を表 3 に示すとおり，5 種類の動粘性係数比 M（$=\upsilon_1/\upsilon_2$，υは動粘性係数）について行った．また計算結果を図 3 に，誤差を表 4 にまとめる．

これらの結果から，動粘性係数比が1/5～50の場合は計算値と理論値はよく一致しており，妥当な計算が行えると言える．

表 4 各ケースの誤差
Table4 error in 5 cases

	A	B	C
誤差(-)	5.28×10^{-2}	3.93	1.71
	D	E	
誤差(-)	20.97	5.70	

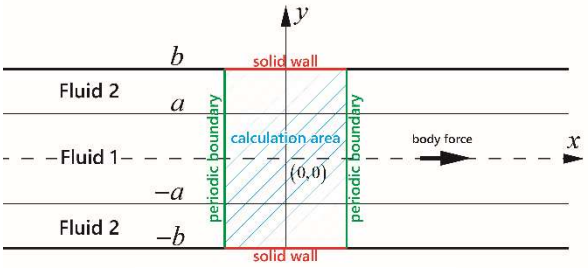


図 2 概略図
Fig.2 Schematic

表 2 パラメータ
Table2 Parameters

Parameter	Value
A（mu·ts^{-2}·lu^{-2}）	1.0×10^{-4}
β（-）	0.5
ρ_1（mu·lu^{-3}）	1.0
ρ_2（mu·lu^{-3}）	1.0
a	24.5
b	49.5
体積力ς（mu·lu·ts^{-1}）	1.5×10^{-8}

表 3 計算条件
Table3 Calculation condition

	τ_1	τ_2	M
A	1	1	1
B	0.6	1	1/5
C	1	0.6	5
D	0.51	1	1/50
E	1	0.51	50

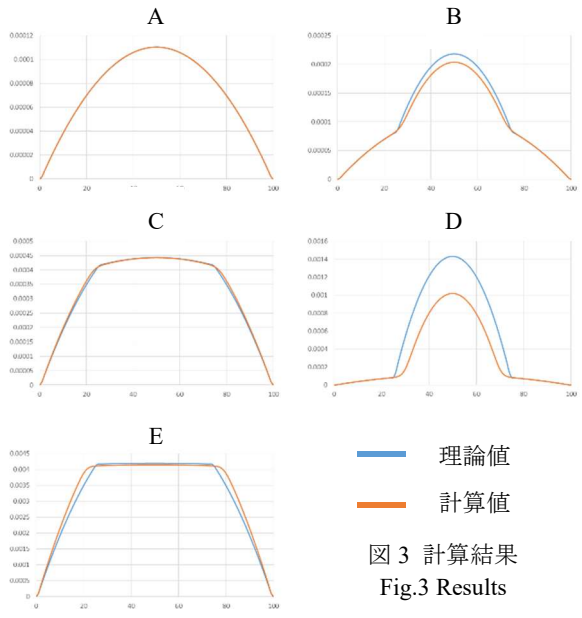


図 3 計算結果
Fig.3 Results

3. 2. 非混合性流体の置換現象

多孔質媒体における非混合性流体の置換現象の数値計算を行う. 侵入流体としてジヨードメタン(CH_2I_2), 被侵入流体として水を仮定して各パラメータを与える. 数値計算に用いたパラメータを表 5 に示す. 添え字 1 はジヨードメタン, 添え字 2 は水を表す. 計算領域は 300×300 とし, 上下境界には圧力境界, 左右境界には周期境界, 粒子表面にはすべりなし境界を課した. 上下境界間の圧力差は $7.5\times10^{-4}\,\mathrm{mu\cdot lu^{-1}\cdot ts^{-2}}$ とした. ジヨードメタンが水に比べて濡れ性が低いことから, ジヨードメタンは非濡れ性流体, 水は濡れ性流体としてふるまう. また多孔質媒体は DEM を用いて粒子をパッキングすることで作成したが, 粒子間に隙間を作る際, 隙間が 4 格子から 8 格子になるよう調節した.

計算結果を図 4 に示す. 図中の灰色部分がジヨードメタンを, 青色部分が水を示す. 本計算条件において, 半径が 2 格子と 4 格子の毛管の毛管圧を計算したとき, それぞれ $3.07\times10^{-4}\ \mathrm{mu\cdot lu^{-1}\cdot ts^{-2}}$, $6.69\times10^{-4}\ \mathrm{mu\cdot lu^{-1}\cdot ts^{-2}}$ であることから, 今回の圧力差では一様浸透することが予測されるため, これら結果は妥当であると考えられる.

4. まとめ

本研究では, RK モデルを用いた非混合性二相二次元 LBM モデルにより, 多孔質媒体における非混合性流体の置換現象の数値計算を行った.

数値実験では, まずベンチマーク問題としてクエット流の計算を行い, 動粘性係数比が 1/50 ~ 5 の場合は妥当な結果が得られた. 非混合性流体の置換現象の数値計算では大きい間隙から流体が侵入していく様子が再現できた. また侵入様式としては一様侵入の結果が得られ, 設定した間隙半径と毛管圧からも妥当な結果と考えられる.

今後は, 圧力差や間隙の大きさを調整し, 選択流のような別の侵入様式についての再現を行う. またより定量的な評価を行うため, キャピラリー数やレイノルズ数などの無次元数を用いてパラメータの設定を行う. また疎水性粒子を混入させたときにどのように侵入様式が変化するかについての考察も行う.

表 5 パラメータ
Table5 Parameters

Parameter	Value
$A\ (\mathrm{mu\cdot ts^{-2}\cdot lu^{-2}})$	1.0×10^{-2}
β (-)	0.99
$\rho_1\ (\mathrm{mu\cdot lu^{-3}})$	1.0
$\rho_1\ (\mathrm{mu\cdot lu^{-3}})$	1.0/3.322
τ_1 (ts)	0.919
τ_2 (ts)	1.0

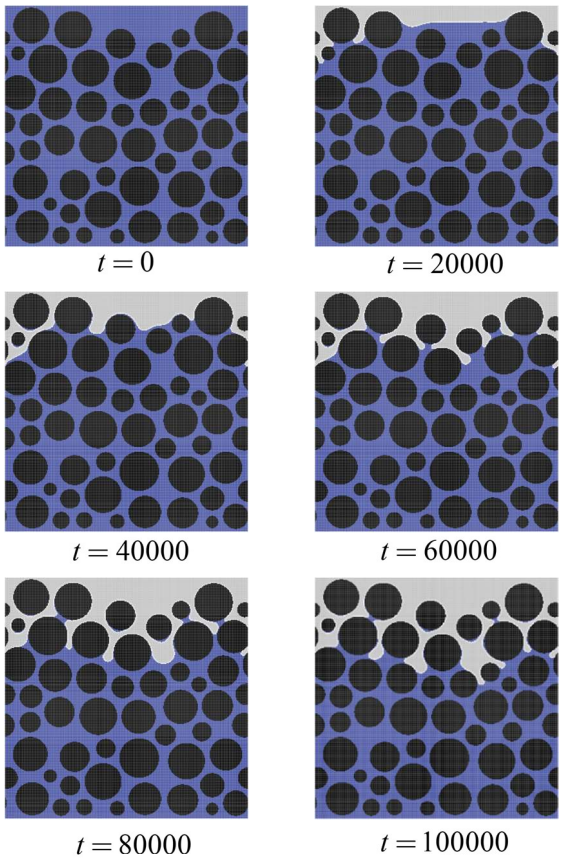


図 4 計算結果
Fig.4 Results

参考文献

[1] Leclaire, S., Pellerin, N., Reggio, M., and Trépanier, J. Y. (2014): Unsteady immiscible multiphase flow validation of a multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 47(10), 105501.

[2] Huang, H., Sukop, M., and Lu, X. (2015): Multiphase lattice Boltzmann methods: Theory and application, John Wiley & Sons, 113-114, 121.

[3] Leclaire, S., Pellerin, N., Reggio, M., and Trépanier, J. Y. (2013): Enhanced equilibrium distribution functions for simulating immiscible multiphase flows with variable density ratios in a class of lattice Boltzmann models, International Journal of Multiphase Flow, 57, 159-168.

羽束川流域における SWAT モデルを用いたリン負荷量の推定

京都大学大学院農学研究科　○土橋 正幸・竹内 潤一郎・藤原 正幸

1. はじめに

現在，環境問題の一つに水質汚濁が挙げられ，特に農地などの面源からの負荷流出による汚濁が大きな問題となっている．湖沼のような閉鎖性水域の水質保全には，湖沼内の汚濁物質の除去，つまり浄化が有効な手段の一つと言えるが，湖沼水域へも流入負荷量を適切に制御することもまた有効かつ重要な手法である．対象とする千苅貯水池は，兵庫県神戸市北区に位置する有効貯水量 1,160 万 m^3 の上水用のダム湖であり，波豆川と羽束川が流入する流域面積 96.7 km^2 の水田と森林を中心とした農業流域をもつ．千苅貯水池においては，曝気や水草による浄化といった湖内における対策のみではリンによる汚濁が改善されず，流域対策が必要と考えられている．流域対策を策定するためには，まず汚染源の特定や流出過程の把握が必要不可欠であり，それらの基礎情報を提供するものとして分布型の流出モデルの利用が有効であると考えられる．

本研究では，リンの流出特性を把握するための基礎となる流出解析を扱う分布型モデルである SWAT（Soil and Water Assessment Tool）を用いて，対象とする千苅貯水池に流入する羽束川流域の流出流量とリンの負荷量を推定し，観測データとの比較を行う．

2. SWAT モデル

本研究で使用する SWAT モデルは米国農務省と Texas A&M 大学にて開発された流域水文水質モデルである．日単位での流量の推定を行い，面積が大きく，実測値のない流域において，その土地の管理手法が水，土粒子および化学物質の移流・蓄積状況に与える影響を長期間にわたり予測するために開発された．このような目的のため，このモデルは以下のような特徴を持つ．

・物理的な考察に基づいている．
・データが入手しやすく，モデルを実行させるための最低限のデータは政府機関から入手できる．
・大きな流域の算出を妥当な時間内で終わらせることができるため計算効率が良好である．
・長時間にわたるシミュレーションが可能であり，管理手法の変更などによる影響を長期的に計算することが可能である．

リンの負荷量の推定について，SWAT モデルでは，リンは土壌に含まれる溶存無機態と有機態を含む懸濁態として流出する．無機態リンは安定的，アクティブ，溶存としての 3 つのプールを持ち，有機態リンは安定的，アクティブ，残渣としての 3 つのプールを持っている．溶存無機態リンプールと安定的な無機態リンプールの間には急速な平衡が，アクティブな無機態リンプールと安定的な無機態リンプールには遅い平衡が存在すると仮定されている．この平衡はリン利用性指数（*pai*）によって支配される．この *pai* は，SWAT モデルでは土壌に様々な濃度の K_2HPO_4 を添加し，圃場容水量まで湿らせた後に 25℃でゆるやかに乾燥させ，イオン交換水で再度湿らせる．このサイクルを 6 ヶ月以上繰り返し，最後にイオン交換樹脂によって抽出された溶存態リンによって決定される．*pai* は次式によって計算される[1]．

$$pai = \frac{P_{solution,f} - P_{solution,i}}{fert_{\min P}} \tag{1}$$

ここで，$P_{solution,f}$ は施肥後の急速な反応後の溶存態リンの量(g)，$P_{solution,i}$ は施肥前の溶存態リンの量(g)，$fert_{\min P}$ はサンプルに加えた可溶性リン肥料の量(g)である．

有機態リンおよび土壌粒子に吸着された無機態リンは地表流が発生したときに河道へと輸送される．この形態のリンは HRU(Hydrologic Response Unit)からの土砂流出と関係している．土砂と同時に輸送される懸濁態リンは次式を用いて推定される．

$$sedP_{surf} = 0.001 \cdot conc_{sedP} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \varepsilon_{Psed} \tag{2}$$

ここで，$sedP_{surf}$ は地表流によって土壌表層から河道へ土砂と共に輸送されるリンの総量(kgP/ha)，$conc_{sedP}$ は土壌表層 10 mm 中の土壌の吸着したリン濃度(gP/t)，$area_{hru}$ は HRU の面積(ha)，ε_{Psed} はリンの濃縮係数，sed は解析時間単位の土砂生産量(t)である．また，溶存無機態リンは次式によって表される．

$$P_{surf} = \frac{P_{solution,surf} \cdot Q_{surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf} \cdot k_{d,surf}} \tag{3}$$

ここで，P_{surf} は土壌表層から損失する溶存無機態リン量(kgP/ha)，$P_{solution,surf}$ は土壌表層 10 mm 中に存在する溶存無機態リン量(kgP/ha)，Q_{surf} は日単位における表面流量(mm H_2O)，ρ_b は土壌表層 10 mm の単位容積重量(Mg/m^3)，$depth_{surf}$ は土壌表層の厚さ(10 mm)，$k_{d,surf}$ は土壌表層中の溶存無機態リン濃度と地表流中の溶存無機態リン濃度との比率(m^3/Mg)である．

3. 使用データ

SWAT モデルでは気象，地形図，土壌の特性，土地利用といった地理情報が必要となる．本研究では地形データには国土交通省発行の国土数値図 50m×50m メッシュの標高データを用いる．土地利用データには国土交通省発行の土地利用細分メッシュデータ(100m×100m)[2]を用いる．土壌データには国土交通省発行の 20 万分の 1 土地分類基本調査の兵庫，大阪の土壌分布データ[3]を用いる．

表 1　流域の土地利用，土壌の面積割合

土地利用	
森林	83.38 %
田	10.79 %
建物用地	1.60 %
幹線交通用地	1.25 %
その他の農用地	0.81 %
その他の用地	0.58 %
河川及び湖沼	0.28 %
ゴルフ場	0.28 %

土壌	
灰色低地土	49.21 %
褐色森林土	35.37 %
岩屑土	14.84 %
未熟土	0.58 %

4. モデルの評価

決定係数 R^2 と水文モデルの評価としてよく用いられる Nash-Sutcliffe efficiency(*NS*)を用いて評価を行う．決定係数 R^2 は計算値と観測値の線形的な関係度合いを表し，シミュレーション結果と観測データ

のハイドログラフが近い形を表すとき，R^2 は高い値を示す．*NS* は観測値と計算値をプロットしたとき，どの程度 1:1 ライン上に分布するかを示し，モデル全体の精度を評価するものである．*NS* は以下の式で表される[4].

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - O_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - O_{avg}\right)^2} \tag{4}$$

ここで，O_i は i 日の観測値，O_{avg} は観測値の平均値，P_i は i 日の計算値，P_{avg} は計算値の平均値である．

SWAT における各種パラメータは，SUFI-2（Sequential Uncertainty Fitting Algorithm）を用いて同定される．SUFI-2 では，Latin Hypercube Sampling 法を用いて多数のパラメータセットが生成され，上述の評価値を基にパラメータの範囲が更新される．生成されたパラメータセットの中から最も評価値の高いものが最適解として選ばれるほか，不確実性の程度を表す指標として 95PPU（95% prediction uncertainties）が計算される．95PPU は，すべてのパラメータセットから得られるシミュレーション結果の累積分布における 2.5%と 97.5%の範囲として与えられる．

5. 結果および考察

本研究では計算の時間単位を日単位とし，SWAT へ入力する気候データを 1990 年～2015 年分取得できたため，ウォームアップ期間を 1990 年～2008 年とし，解析期間を 2009 年～2013 年とした．キャリブレーション期間は 2009 年～2011 年，バリデーション期間は 2011 年～2013 年とした．

日流量と全リン日負荷量の評価値について表 2 に，それぞれのグラフを図 1, 2, 3, 4 に示す．

表 2　評価値（左：日流量，右：全リン日負荷量）

	Calibration	Validation
R^2	0.75	0.64
NS	0.74	0.62

	Calibration	Validation
R^2	0.56	0.81
NS	0.19	0.68

流量については，降水時のピークを除けば全体的に良い結果を得ることができた．SWAT を他の日本の流域に適用した例においても，ピーク流量の過小評価が課題とされており，本流域においても同様の結果となった．リン負荷量については，キャリブレーション期間において $NS = 0.19$ であったものの，バリデーション期間においては，R^2 値と *NS* ともに 0.5 を超えている．Moriasi *et al.*（2007）によると R^2 値が 0.5 以上であれば比較的良好に再現できているとされる．しかしながら，全リンの年間負荷量が，2009 年観測値は約 2,379 kg/年，推定値は約 6,884kg/年，2010 年観測値は約 4,680 kg/年，推定値は約 10,963 kg/年，2011 年観測値は約 5,546 kg/年，推定値は約 12,999 kg/年，2012 年観測値は約 2,666 kg/年，推定値は約 7,968 kg/年，2013 年観測値は約 4,667 kg/年，推定値は約 12,300 kg/年となっており，倍以上の過大評価となっている．図 3, 4 から，洪水時を除いて平水時には，観測値はほとんど 95PPU に含まれておらず，パラメータの範囲を見直す必要があると思われる．

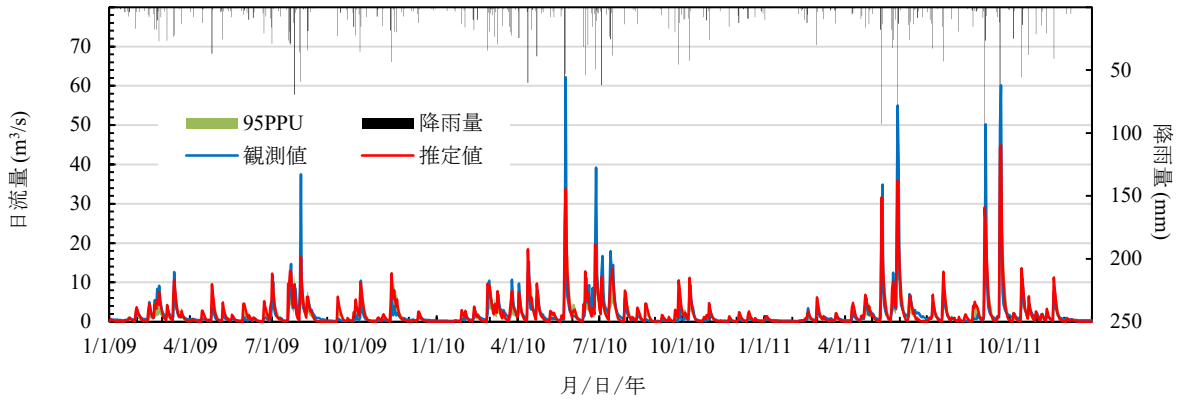


図 1　キャリブレーション期間における日平均流量

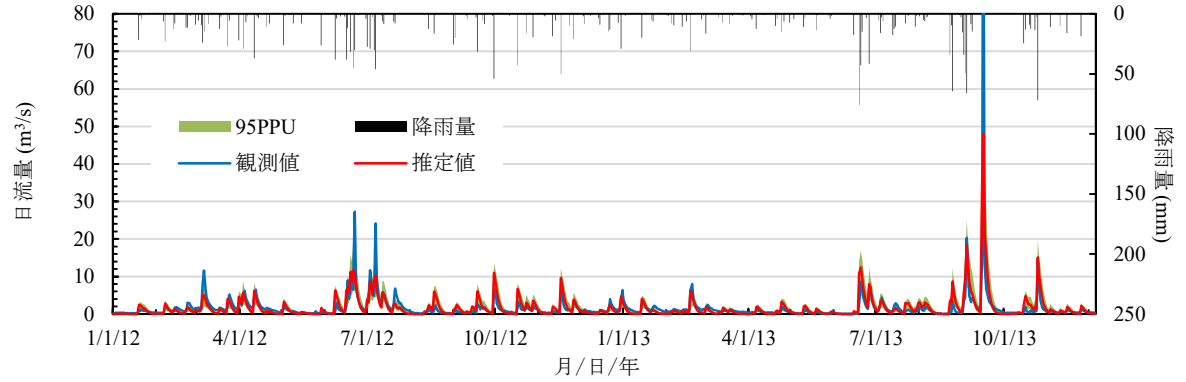


図 2　バリデーション期間における日平均流量

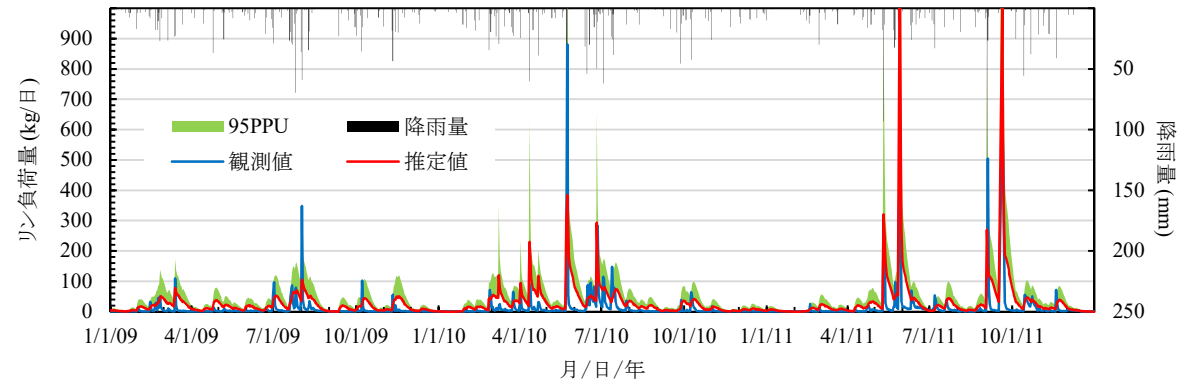


図 3　キャリブレーション期間における全リン日負荷量

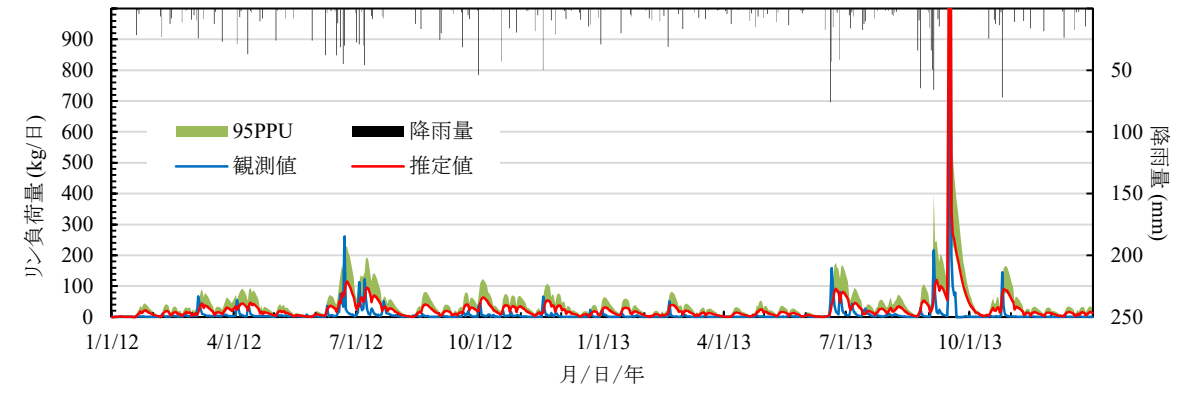


図 4　バリデーション期間における全リン日負荷量

6. まとめ

羽束川流域に対して SWAT モデルを適用した. 全体としては, R^2 値と *NS* による評価値は妥当な結果が得られたが, 特にリンの負荷量に関して過大に評価しており, 定量的に再現できたとは言えない. 土壌中におけるリンの反応を表す SWAT モデルにおけるリンの平衡や表面流量, 千苅貯水池流域におけるリンの流出特性について検討する必要がある.

7. 謝辞

神戸市水質試験場より調査地に関する流量, リンのデータをご提供いただいた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

1. Neitsch, N.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2011)：Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, pp.207-208, pp.272-274.
2. 国土交通省　国土数値情報　ダウンロードサービス http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/
3. 国土交通省国土政策局国土情報課 http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html
4. Krause, P., Boyle, D.P., and Bäse, F. (2005) : Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, *Advances in Geosciences*, **5**, pp.89-97.
5. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007) : Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp.885-900.

有明海における貧酸素水塊の動態解析に向けた 3 次元σ座標系モデルの開発
Development of Three-Dimensional Sigma Coordinate Model for the Dynamic Analysis of Anoxic Water Mass in the Ariake Sea

○田畑俊範*，福田晃大**，林航**，平松和昭*，原田昌佳*
Toshinori Tabata, Akihiro Fukuda, Wataru Hayashi, Kazuaki Hiramatsu and Masayoshi Harada

1. はじめに

九州西部に位置する有明海は，広大な干潟が非常に高い生物生産力を可能とし，漁業活動が盛んに営まれ，豊饒の海と呼ばれていた．しかし，近年大規模な赤潮や貧酸素水塊の発生といった環境異変が発生している．さらに，それに伴いノリ養殖の生産量の不安定化や二枚貝漁獲量の激減など様々な被害が生じており，これらの解決に向けた対策が求められている．特に，貧酸素水塊は 1990 年代後半より夏季の底層における発生が確認されており，2000 年代からは毎年出現していることが報告されている．2010 年には貧酸素水塊の発生後に有明海の有用二枚貝の一種であるタイラギの大量斃死がみられた．そのため，有明海における貧酸素水塊の動態解析を行うことは喫緊の課題となっている．有明海における貧酸素水塊の既往の研究は，実測に基づいた貧酸素水塊の出現状態の考察や底泥における酸素消費速度の算定にとどまっており，貧酸素水塊の動態解析を数値解析により行った例は少ない．貧酸素水塊の動態解析を行うにあたり，3 次元モデルの開発が必須となるが，有明海は潮汐が非常に大きい海域であるために，通常のデカルト座標系を用いた 3 次元モデルによる解析は困難となる．そこで，本研究では鉛直方向にσ座標系を導入することで貧酸素水塊の解析に向けた 3 次元モデルの開発を行った．

2. 数値シミュレーションモデル

有明海は湾内水の振動周期と外洋の潮汐周期が共鳴現象を起こし，最大潮位差が 6m にもおよぶ日本最大の潮汐が発生する海域である．その大きな潮位差から日本の干潟面積の約 4 割にあたる約 200km^2 の干潟が広がる．こうした干満差の大きな海域を対象とした 3 次元流動モデルを構築する際，デカルト座標系のレベルモデルを採用すると，海表面を含む層の厚さを潮汐の振幅より大きくとる必要がある．すると，水深の浅い箇所における層数が少なくなり，鉛直構造の再現が困難となる．一方で，水面を$z = \eta$，底面を$z = -h$とする通常のデカルト座標系を，水面で$\sigma = 1$，底面で$\sigma = 0$のように規格化するσ座標系を採用することで鉛直方向の層分割を水深にかかわらず同数にすることが可能となる．そのため，本研究では有明海における 3 次元σ座標系流動モデルの開発を行った．3 次元 Reynolds 方程式にσ座標変換を行うことで以下の支配方程式を導出した．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} + H\frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \tag{1}$$

*九州大学大学院生農学研究院／Faculty of Agriculture, Kyushu University
**九州大学大学院生物資源環境科学府／Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University
キーワード：有明海湾奥部，3 次元流動モデル，σ 座標系，成層化関数

$$\frac{\partial(H\boldsymbol{u})}{\partial t}+\frac{\partial(Hu\boldsymbol{u})}{\partial x}+\frac{\partial(Hv\boldsymbol{u})}{\partial y}+\frac{\partial(H\omega\boldsymbol{u}^*)}{\partial\sigma}$$
$$=Hf\begin{pmatrix}v\\-u\end{pmatrix}-\frac{gH}{\rho}\left[(\rho_0+\rho'\sigma)\nabla\eta-\rho'(\sigma-1)\nabla h-\nabla\left\{H\int_\sigma^1\rho'd\sigma\right\}\right]+\frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(A_\sigma\frac{\partial\boldsymbol{u}^*}{\partial\sigma}\right)+HA_h\left(\frac{\partial^2\boldsymbol{u}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\boldsymbol{u}}{\partial y^2}\right) \quad (2)$$

ここで，η は水位（m），h は水深（m），(u,v) は (x,y) 方向の流速（m/s），ρ は密度（g/m^3）であり，$H=\eta+h$，$\sigma=(z+h)/H$，$\boldsymbol{u}=(u,v)$，$\nabla=(\partial/\partial x,\partial/\partial y)$ である．f はコリオリ係数（1/s），g は重力加速度（m/s^2）であり，A_h および A_σ はそれぞれ水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数（m^2/s）である．また，σ 座標系における鉛直流速に相当する ω（1/s）は，以下のように定義される．

$$\omega=\frac{1}{H}\left[\sigma\int_0^1\frac{\partial(Hu)}{\partial x}d\sigma+\sigma\int_0^1\frac{\partial(Hv)}{\partial y}d\sigma-\int_0^\sigma\frac{\partial(Hu)}{\partial x}d\sigma-\int_0^\sigma\frac{\partial(Hv)}{\partial y}d\sigma\right] \quad (3)$$

これらの計算には，佐々木ら（1996）による半陰解法に基づく効率的なアルゴリズムを適用した．すなわち，式中の*が付加されている水位 η，鉛直移流項および鉛直粘性項に関しては陰差分とし，その他の項については陽差分とした．水平方向の渦動拡散係数には，以下に示す Smagorinsky モデル（Smagorinsky. J., 1963）を用いた．

$$A_h=\frac{1}{2}S_m\Delta x\Delta y\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここで，S_m は Smagorinsky 係数（=0.2），$(\Delta x,\Delta y)$ は (x,y) 方向の格子幅（m）である．鉛直方向の渦動拡散係数には，以下に示すリチャードソン数による成層化関数モデルを導入することで決定した．

$$A_\sigma=A_{\sigma0}\times(1+\alpha R_i^\beta)^\gamma \quad (5)$$

ここに，$A_{\sigma0}$ は中立時における渦動粘性係数を表しており，α，β，γ は係数で，Henderson-Sellers(1985)にならい，$\alpha=37,\beta=2,\gamma=-1$ を採用した．R_i はリチャードソン数で，次式によって表される．

$$R_i=-\frac{g}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial z}\Bigg/\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right] \quad (6)$$

沿岸浅海域では潮位の変化に伴い干潟が干出する．このとき水深は 0m となるため，干潟が発生する際に水深が極小となり，計算が破綻する．そこで本モデルでは，干出・冠水スキーム（Wetting and Drying Scheme, WDS）を導入し，さらに格子点に Land Mask 関数（*LMF*）（内山，2004）を定義し，冠水・干出の判定を行い，計算の発散を防いだ．この *LMF* は，陸域では 0，海域では 1 の 2 値を取る関数である．まず，水深の閾値 d_{th}(=0.2m)を設定する．次に各計算格子点におけるある瞬間の水深 H と d_{th} の大小判定を行う．$H>d_{th}$ となる場合，そのメッシュは冠水していると判断し，*LMF*=1 とし計算領域に残す．一方 $H\le d_{th}$ となる場合，そのメッシュは潜在的に干出していると判断し，さらに以下の 3 つの条件から構成される WDS を適用する．

$$\left.\begin{array}{ll}\text{a)} & \min\left[\eta_{m-1,n},\eta_{m+1,n},\eta_{m,n-1},\eta_{m,n+1}\right]\le\eta_{m,n}\\ \text{b)} & \min\left[D_{m-1,n},D_{m+1,n},D_{m,n-1},D_{m,n+1}\right]\le d_{\min}\\ \text{c)} & \max\left[LMF_{m-1,n},LMF_{m+1,n},LMF_{m,n-1},LMF_{m,n+1}\right]=0\end{array}\right\} \quad (7)$$

すなわち，当該メッシュに隣接する周囲 4 つのメッシュに注目し，それぞれの格子点の値と当該メッシュの格子点の値を比較する．上記の条件のうち少なくとも 1 つ以上を満足する場合は，そのメッシュは

実際に干出していると判断し，*LMF*=0 とし，計算領域から除外する．もし上記の条件を 1 つも満たさない場合，当該メッシュを最低水深 $d_{\min}$ との比較を行い，$H > d_{\min}$ の場合そのメッシュは冠水していると判断し，*LMF*=1 とし計算領域に残す．一方で，$H \le d_{\min}$ となる場合，$H = d_{\min}$ とし，LMF=0 として計算領域から除外する．本研究の解析対象領域を **Fig.1** に示す．湾口の境界条件には，富岡における主要 6 分潮を用いて計算した潮位変動を与えた．また，流入河川は，**Fig.1** に示す有明海の主要 9 河川とし，年平均値を与えた．シミュレーション期間は，流速の実測データが得られた 2013 年 1 月 18 日 01:00（小潮満潮時）から同 2 月 4 日 02:00（小潮満潮時）とした．**Table 1** にシミュレーションの計算条件を示す．モデルの検証には，**Fig.1** に示す 3 地点の潮流観測結果を用いた．

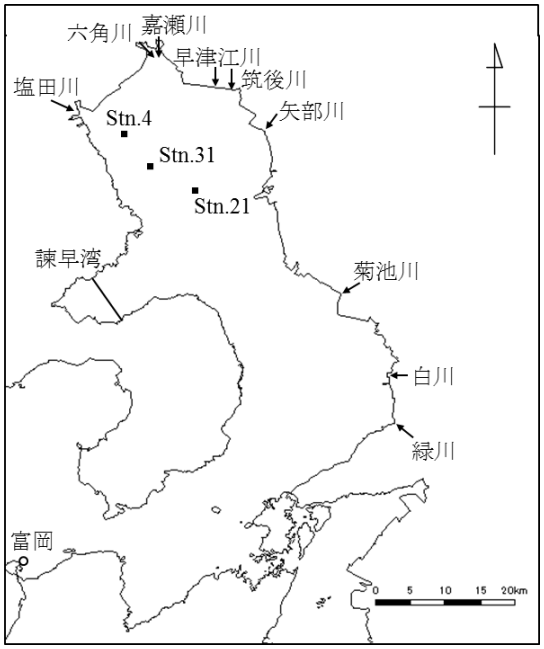


Fig.1 解析対象領域および潮流観測所

Table 1　シミュレーションの計算条件

格子数	*x* 方向：109 *y* 方向：163
格子間隔	500m×500m
層数	11 層
タイムステップ	10 秒

3. 結果と考察

Figure 2 は，2013 年 1 月 28 日 05:00（最干潮時）における海域の様子である．最干潮時における干潟の発生箇所は，海底地形の水深 0m 以上の領域と概ね一致したため，干潟の干出に関して良好に再現できたといえる．また，**Fig.3** は 2013 年 1 月 27 日 21:00 から 28 日 21:00（大潮時）における実測値と計算値の潮流速・流向を比較したものである．流速・流向ともに実測値とよく一致しており，潮流場の良好な再現性が確認できた．以上より，有明海において流動に関する比較的再現性の高い 3 次元 σ 座標系のシミュレーションモデルが構築できたといえる．しかしながら，本モデルは塩分・水温の拡散を考慮していないため，密度成層による 3 次元的な流れ場の再現には未だ至っていない．そのため，今後は塩分・水温に関する拡散モデルの開発を行うことで密度成層の再現を目指す．そして，その上で貧酸素水塊の動態解析を行うために，溶存酸素モデルの構築を行う予定である．

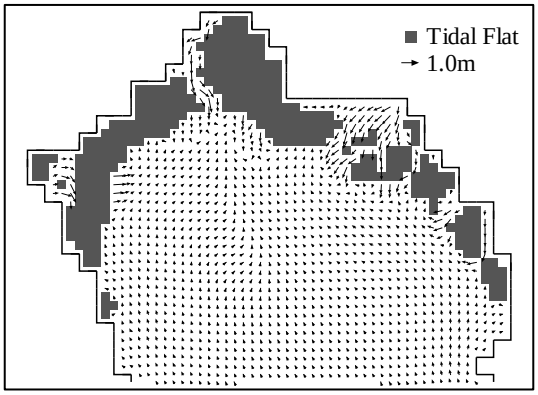


Fig.2　最干潮時における干潟域および潮流ベクトル図

4. おわりに

本研究では，干満差の大きな有明海に対して 3 次元 σ 座標系モデルの開発を行った．その結果，潮流場および干潟の干出に関して良好な再現結

果が得られ，精度の高い 3 次元σ座標系モデルを開発することができた．今後は，水温および塩分の輸送方程式，溶存酸素モデルの導入を行うことで有明海における貧酸素水塊の動態解析に向けたモデルの開発を目指す．

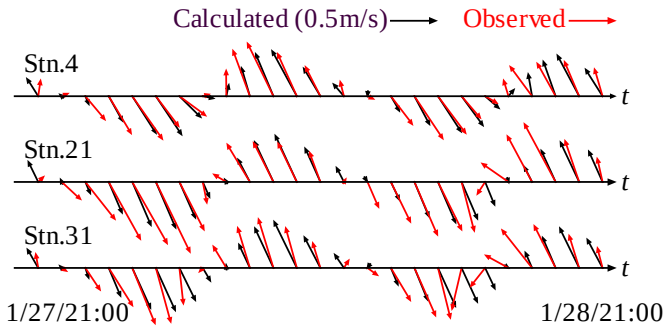


Fig.3　計算値と実測値の再現性（大潮時）

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 17K15347 の支援を受けた．さらに，農林水産省九州農政局には潮流観測データを提供頂いた．記して謝意を表す．

参考文献

Henderson-Sellers B. (1985)：New formulation of eddy diffusion thermocline models, *Appl. Math. Modelling*, **9**(12), pp.441-446

佐々木ら(1996)：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，**43**，pp.1111-1115

Smagorinsky. J. （1963）： General circulation experiments with the primitive equations， *Monthly Weather Review*， **91**， pp.99-164

内山雄介(2004)：海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元σ座標海洋流動モデルへの適用，海岸工学論文集，**51**，pp.351-355

ネスティングを導入した 2 次元単層モデルによる大量の河川水の挙動追跡
Simulation of Large Fresh Water Behavior Using Nested Two-Dimensional Model

○福田晃大[*1]・田畑俊範[*2]・平松和昭[*2]・原田昌佳[*2]
Akihiro Fukuda, Toshinori Tabata, Kazuaki Hiramatsu and Masayoshi Harada

1. はじめに

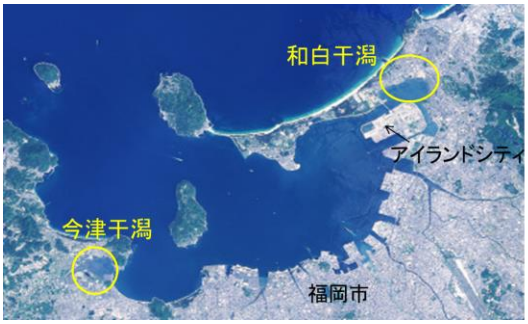


Fig. 1 博多湾（Google より）
Map of Hakata Bay from Google

九州北部に位置する博多湾（**Fig. 1**）は，アジアの玄関口として港湾機能を持つ大都市近郊の閉鎖性海域である．数多くのふ頭や東部のアイランドシティと呼ばれる人工島の存在など，大規模開発が進んでおり，湾は複雑な海底地形を有する．その一方で，東部の和白干潟や西部の今津干潟といった豊かな生態系を有する干潟が湾内に存在し，自然保護の観点からも価値の高い海域といえる．この海域では近年，集中豪雨に起因する膨大な淡水流入による環境への影響が懸念されている．特に湾奥部においては豪雨後の赤潮や貧酸素水塊の発生が年に数回観測されている．さらに，淡水とともに流入する大量の土砂による底生動物・魚類のへい死等，干潟の生態系への影響が懸念され，水産資源の保全・確保の観点からこれらの問題に対して検討を行っていくことは重要である．これらに対し，数値シミュレーションを用いた解析が有効であり，密度流を考慮に入れた 3 次元的な検討が必要であるが，集中豪雨に起因する膨大な淡水流入が沿岸海域に及ぼす影響についての研究例は少ない．過大な流速を伴う大量の河川水を考慮した 3 次元的な解析を行うには，小さい時間幅と格子幅での計算が必要となり，多大な計算時間を要する．そこで，解析の第一歩として膨大な淡水流入の平面的な挙動を把握するため，2 次元単層モデルを博多湾に適用し，解析を行った．

本研究では，2 次元単層モデルにネスティングを適用し，東部のアイランドシティ周辺および西部の今津湾といったより詳細な解析が必要な領域を高解像度に計算した．また，博多湾に流入する各河川にタンクモデルを適用し，集中豪雨時の河川流量を計算した．最後に本モデルを用いて，過去福岡市に甚大な被害を及ぼした集中豪雨を対象とし，降雨前後の塩分分布を比較することにより，河川水の挙動追跡を行った．

2. 2 次元単層モデル

本モデルの基礎式は 3 次元 Reynolds 方程式および塩分の乱流拡散方程式を水面から水底まで鉛直積分して得られる．以下に連続式および運動方程式を示す．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\{(h+\eta)u\}+\frac{\partial}{\partial y}\{(h+\eta)v\}=0 \tag{1}$$

[*1] 九州大学大学院生物資源環境科学府/Graduate School of Bioenvironmental Sciences, Kyushu University
[*2] 九州大学大学院農学研究院/Faculty of Agriculture, Kyushu University
キーワード：2 次元移流分散モデル，エッジネスティング，タンクモデル，集中豪雨，博多湾

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+fu=-g\frac{\partial \eta}{\partial y}+A_H\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-\frac{{\gamma_b}^2 v\sqrt{u^2+v^2}}{h+\eta} \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-fv=-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+A_H\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-\frac{{\gamma_b}^2 u\sqrt{u^2+v^2}}{h+\eta} \tag{3}$$

ここで，u，v はそれぞれ x，y 方向の流速（m/s），h は水深（m），η は水位（m），f はコリオリ係数（1/s），g は重力加速度（m/s^2），A_H は渦動粘性係数（m^2/s），γ_b は底面摩擦係数である．運動方程式中の右辺第 4 項に当たる風応力項は，その影響が小さいものとして無視した．

さらに，以下に塩分の移流分散方程式を示す．

$$(h+\eta)\frac{\partial S}{\partial t}+u(h+\eta)\frac{\partial S}{\partial x}+v(h+\eta)\frac{\partial S}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left\{(h+\eta)K_H\frac{\partial S}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{(h+\eta)K_H\frac{\partial S}{\partial y}\right\} \tag{4}$$

ここで，S は塩分（psu），K_H は移流分散係数（m^2/s）である．A_H と K_H の評価には Smagorinsky モデルを用いた．以下にモデルの式を示す．

$$A_H=K_H=(C_s\Delta)^2\left\{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2+2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

ここで，C_s はモデル定数で，0.10 とした．Δは格子幅（m）である．数値解法には，連続式と運動方程式に leapfrog 法を，移流分散方程式の移流項に風上差分，拡散項に ADI 法を適用した．

博多湾には，大きいメッシュスケールでは捉えることが難しいほど面積が小さい干潟域や，ふ頭や人工島といった構造物などで地形が複雑になっている領域が存在する．このような領域の詳細な計算および計算時間の短縮を両立するため，本モデルにネスティングを適用した．本研究ではエッジネスティングという，**Fig. 2** に示すような大メッシュの計算領域（大領域），小メッシュの計算領域（小領域）それぞれの計算結果をタイムステップごとに他領域へ境界条件として与える方法を開発した．この方法は，大領域と小領域を同一のタイムステップで計算する場合，他のネスティング手法と比べ，プログラムが簡便で取り扱いが容易であるという特徴を持つ．**Fig. 3** に示す計

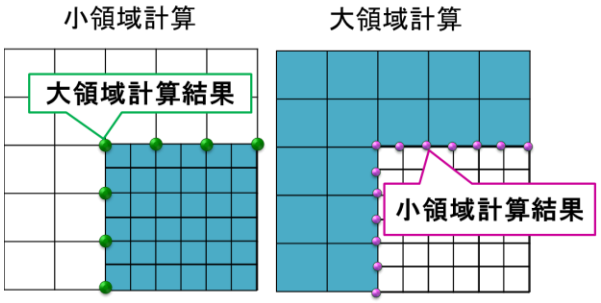


Fig. 2　エッジネスティング概要図
Scheme of Edge Nesting

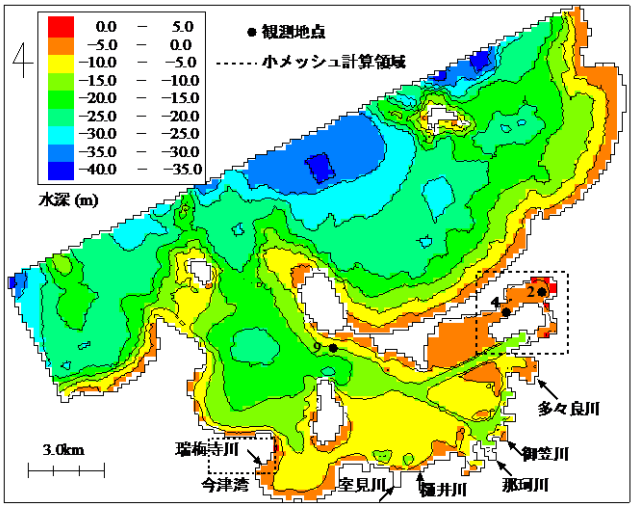


Fig. 3　博多湾の海底地形（大領域）
Bathymetry of Hakata Bay

算領域において，博多湾全域を100m メッシュの大領域，**Fig. 4** に示す東部のアイランドシティ，西部の今津湾をその 4 分の 1 である 25m メッシュの小領域として計算した．タイムステップは 0.25 s とした．

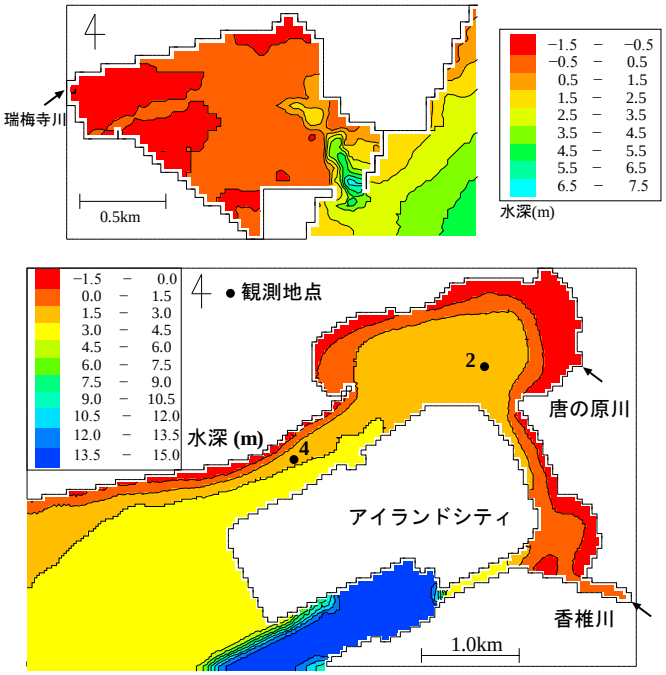


Fig. 4　今津湾およびアイランドシティ周辺の海底地形（小領域）
Bathymetry of Imazu Bay and the region around “Island City”.

3. タンクモデル

集中豪雨時の河川流量を算定するために，博多湾に流入する 38 の河川にタンクモデルを適用した．タンクの段数は 3 段とし，タンクモデルの各パラメータは試行錯誤的に決定した．一例として，今津湾に流入する瑞梅寺川におけるタンクモデルおよび 2002 年 4 月からの 1 年間の実測値と計算値との比較を **Fig. 5** に示す．計算値が実測値と概ね一致していることが分かる．以上のンクモデルを用いて，河川流量を算定し，淡水流入量の入力値として与えた．

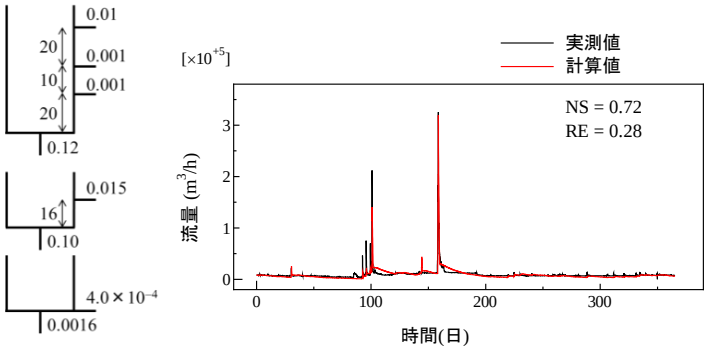


Fig. 5　瑞梅寺川におけるタンクモデルおよび実測と計算値の比較
Tank model of Zuibaiji River and comparison of observed and calculated river discharges

4. モデルの検証

本モデルの検証のために，2007 年 7 月 10 日～8 月 3 日を計算期間としてシミュレーションを行った．7 月 30 日における 1 時間ごとの潮流速および塩分の実測値と計算値との比較を **Fig. 6** に示す．計算値は実測値と概ね一致しており，アイランドシティ周辺の局所的に狭くなっている領域の再現性も高い．したがって，本モデルの有用性が示された．

5. 集中豪雨の影響解析

本モデルを用いて，日雨量 163.5mm を記録し福岡市に甚大な被害をもたらした 2002 年 9 月 16 日の集中豪雨を対象に解析を行った．計算期間を 2002 年 9 月 11 日～21 日とし，タンクモデルにて算定された集中豪雨時の河川流量を入力値として，海域に流入する淡水の挙動を追跡した．博多湾全域における降雨前後の塩分分布の計算結果を **Fig. 7** に示す．湾奥のほとんどが河川からの淡水によって覆われていることが分かる．また，博多湾の湾口

にまで低塩水が広がっており，このことから集中豪雨による大量の河川流入は博多湾のほぼ全域に影響を及ぼすことが考えられる．次に，アイランドシティ周辺の領域における降雨前後の塩分分布の計算結果を **Fig. 8** に示す．降雨前後の分布を比較すると，降雨後は和白干潟全体が淡水に覆われていることが分かる．また，アイランドシティよりも西に位置する河川の淡水流入により，低塩水がアイランドシティ周辺にまで及んでいる．このとから，アイランドシティ周辺では降雨前後で湾内環境が著しく変化することが考えられる．さらに，今津湾における降雨前後の塩分分布の計算結果を **Fig. 9** に示す．今津湾における降雨前後の分布を比較すると，淡水が湾内全域および湾外へ広がっている．膨大な河川流量は，大量の浮泥を運ぶため，淡水の挙動と同じく湾内に広範囲にわたって堆積する可能性がある．今津干潟には，アサリをはじめとした多くの底生動物が生息することから，大量の淡水や浮泥の流入による干潟の生態系への影響が大きいと示唆される．以上のように，アイランドシティ周辺の領域や今津湾では，ネスティングによる高解像度計算により，降雨前後の淡水の挙動を詳細に検討することができた．

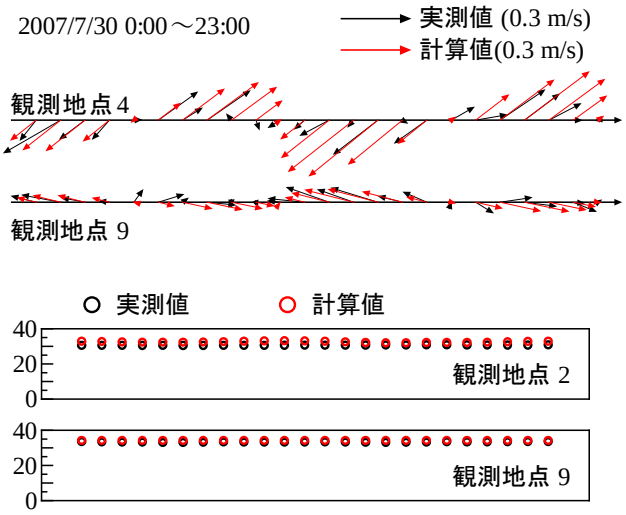


Fig. 6　観測地点 2, 4, 9 における潮流速・塩分の実測と計算値の比較
Comparison of observed and calculated tidal current velocities and salinities at station 2, 4 and 9.

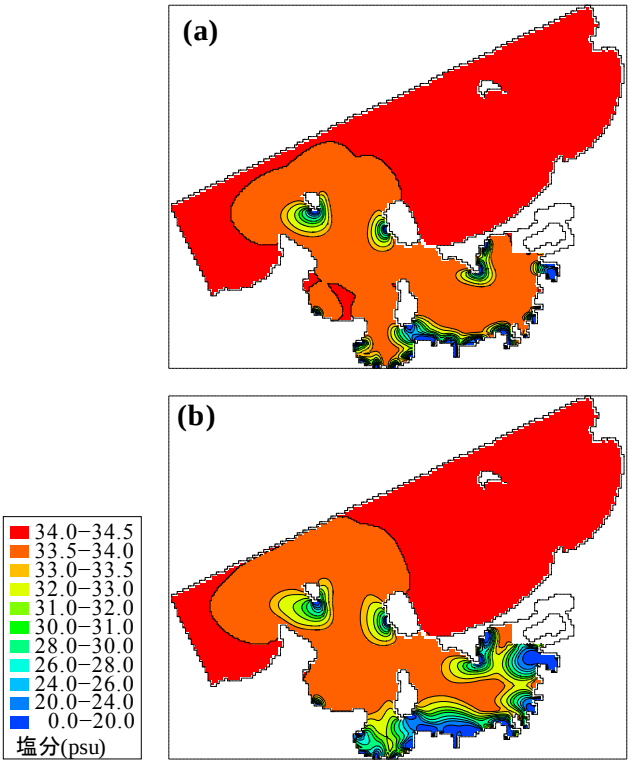


Fig. 7 博多湾全域における塩分分布
（a）16 日 8:00 （b）19 日 22:00
Distribution of salinity in Hakata Bay.
(a) at 8:00 on 16th (b) at 22:00 on 19th

6. まとめ

本研究では，ネスティングを導入した 2 次元単層モデルを博多湾に適用し，集中豪雨が海域に及ぼす影響について検討した．潮流速と塩分における本モデルのシミュレーション結果と実測値との比較により，モデルの高い再現性が確認された．特に，ネスティングの導入により，構造

物などの影響で局所的に狭くなっている領域が高精度で再現されていることが分かった．また，タンクモデルによって算定された集中豪雨時の河川流量をモデルの入力値として，淡水の挙動のシミュレーションを行った．その結果，ネスティングによる高解像度計算により，降雨前後の塩分分布の著しい変化を詳細に検討することができた．

今後は，モデルを 3 次元に拡張することで密度流の効果を考慮に入れるとともに，浮泥の輸送も考慮に入れることでさらなる海域への影響評価を目指す．

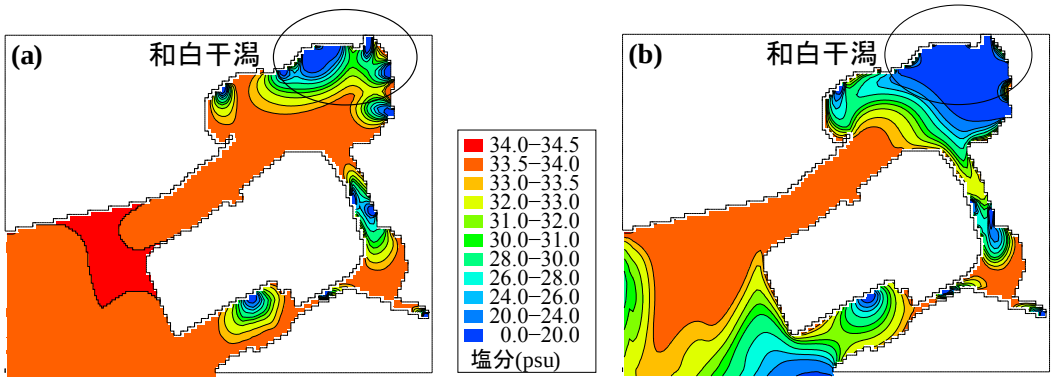


Fig. 8 アイランドシティ周辺における塩分分布 （a）16 日 8:00 （b）19 日 22:00
Distribution of salinity around Island City. (a) at 8:00 on 16th (b) at 22:00 on 19th

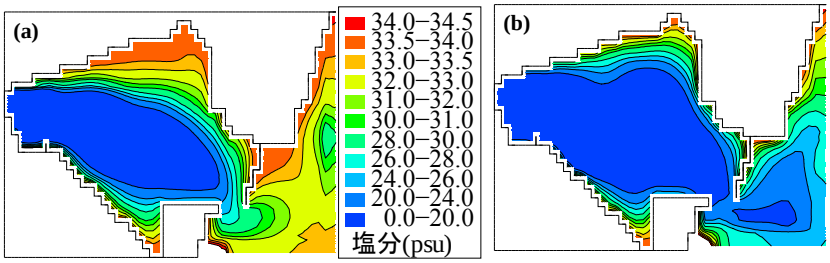


Fig. 9 今津湾における塩分分布 (a)16 日 8:00 (b)18 日 6:00
Distribution of salinity in Imazu Bay. (a) at 8:00 on 16th (b) at 6:00 on 18th

簡易 GPS 機器を用いた小河川の流速分布解析
Preliminary analysis on the flow velocity of a small stream using a GPS logger

○福田 信二[1]
○FUKUDA Shinji

1. はじめに

近年の計測技術の進歩とともに，各種センサー類の低価格化が進み，IoTの利活用を含むビッグデータサイエンスの時代が到来している．このような潮流は，農業工学分野においても例外ではなく，新規計測技術による高精度かつ高解像度なデータによる数値解析の更なる発展が期待されている．水理解析では，河川や水路における1次元や2次元解析に関する研究が多い一方で，モデルパラメータの同定やモデルの検証には観測断面における流量観測の結果が用いられることが多い．これに対し，超音波多層流向流速計（ADCP）のように時間的にはスナップショットではあるが，3次元での流況調査が可能になってきた．特に，測量分野では，無人航空機（UAV）関連技術の向上に伴って，作業の簡略化と高精度化が大きな飛躍を見せている．本報では，高度な生態水理調査への応用を目標に，安価な簡易GPSロガーの流速分布推定への適用可能性の評価を試みた．

2. 方法

東京都国立市に位置する都市小河川である矢川において，簡易GPSロガー（Canmore Electronics社製，GT-740FL）を20 cm×20 cmの発砲スチロール板により水中カメラ（Ricoh社製，Theta S）と連結し（**Fig. 1**），上流から下流端までを流下させ，1秒間隔で位置を記録することにより，断面流速の推定を試みた．また，流速評価の再現性を評価するために，区間長10 mの調査区間を14地点設定し，2017年11月に物理環境調査を実施した．流水環境調査（水深，流速，水面幅，河床材料，植生被度）では，5 m間隔で各地点3断面において実施し，水深と流速の測定には，それぞれ金尺と電磁流速計（KENEK社製，LP30・LPT-325）を使用した．流速については，横断方向に3点の測点を設け，2点法により計測した後，流量と断面積から断面平均流速を計算した．河床材料および植生被度は，目視により定量した．簡易GPSロガーの流下速度と実測の流速から本機材による流速測定時の更正係数を求めた．

Fig. 1　Survey equipment for flow tracking

3. 結果と考察

本調査では，3日間の調査結果（計12回）から，樹冠下部や橋脚部を除く地点において流速の推定を実施した（**Fig. 2**）．同図のように，勾配の大きい下流部において流速が大きい傾向が示されている一方で，多くの地点において流速が0 m/sと評価されるとともに，特に，遮蔽物のある地点において，位置精度の低下による誤差の増大が確認された．結果として，位置精度低下の影響から全体的な再現性は低かったが，解析結果の移動平均等により，再現性の改善が認められた．その他，GPS信号の受信再開後に位置精度が安定するまでには一定時間を有することから，地図情報等に基づく誤差データの除去等による再現性向上が期待できる．

[1]東京農工大学大学院農学研究院　Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

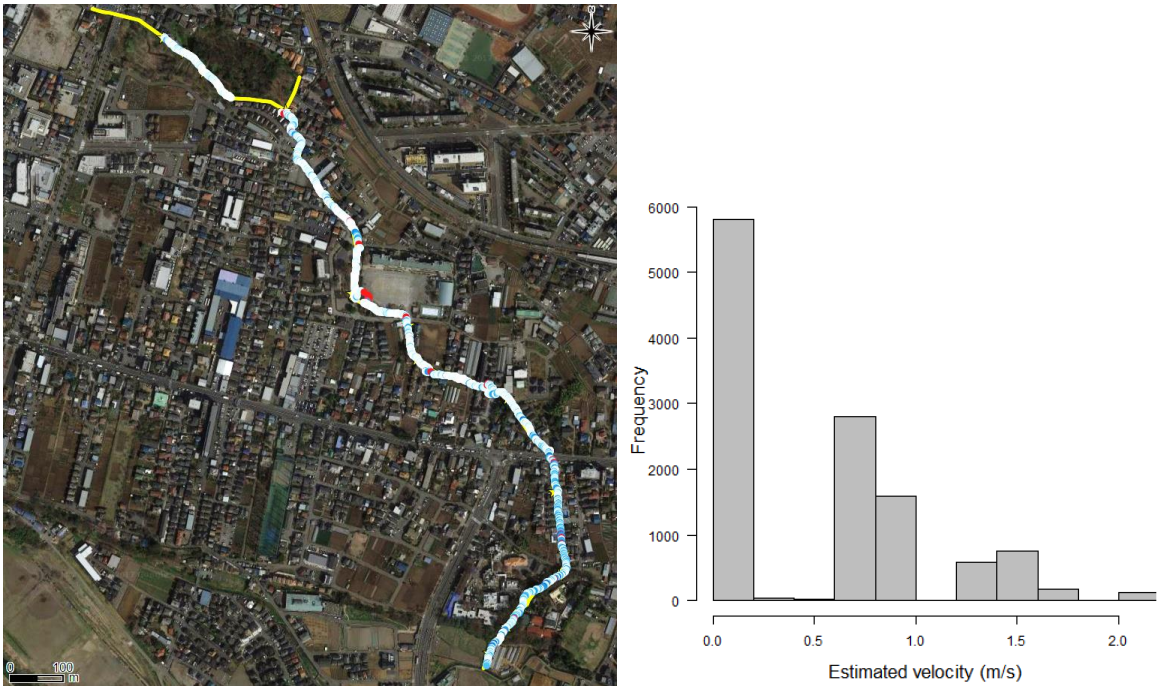


Fig. 2 Spatial distribution and frequency of estimated flow velocity in Yagawa: white marks indicate slow flow while dark blue is for faster flow; red indicates velocity over 2 m/s.

一般に，浮子による流速測定には，更正係数による実流速への近似が行われる（例えば，原田ら，2007；二瓶・酒井，2010）．本調査結果から浮子更正係数を算出したところ，0.588±0.236となり，既往の手法よりも著しく小さな値となった．これは，本研究に使用した浮体の形状および水中カメラ部の形状により，一般的な浮子よりも表面流速の影響を強く受けたことに起因すると考えられる．既往の研究（二瓶・酒井，2010）では，浮子の喫水比により更正係数を整理していることから，種々の条件下における流速観測に基づく特性評価が求められる．

4. おわりに

本研究では，都市小河川において，簡易GPSロガーによる流速推定を試みた．15地点の物理環境調査による検証から，再現性は低いものの，断面平均流速の傾向を捉えることが可能であり，一般的な浮子を用いた流速測定と同様に，更正係数による流速推定が可能であることが示された．測位精度誤差の大きい地点は，樹冠の大きい地点や橋脚下部の条件不利地であり，位置推定精度の安定には一定時間を有することから，測定間隔や移動距離等に基づく実用的な流速評価プロセスの確立が望ましい．また，測定回数の増加による再現性の向上も期待できる．今後は，本報で試行した流速測定に加えて，水深測定や植生，河床材料等の評価に向けた技術開発により，データ取得の簡易化と高精度化が進み，動的な生態水理解析の高度化を目指す予定である．

謝辞：本研究は，科学研究費補助金（17H03886，17H04631）および（公財）高橋産業経済研究財団の助成を受けた．ここに記して，謝意を表する．

引用文献

原田靖生・二瓶泰雄・酒井雄弘・木水啓（2007）：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，51，1081–1086.

二瓶泰雄・酒井雄弘（2010）：実河川洪水流における浮子の更正係数，土木学会論文集 B，66(2)，104–118.

Robust optimal harvesting policy for fish in a pond with price volatility
（価格ボラティリティを有する養魚のロバスト最適水揚げ戦略）

○Elizaphan Otieno Ndede[1], Koichi Unami[1], Masayuki Fujihara[1]
[1]*Graduate School of Agriculture, Kyoto University*

1. Introduction

Fish is one of the most important primary sources of animal protein for human consumption globally. Food and Agricultural Organization (FAO) (2017) statistics show that global fish consumption has doubled in the past two decades but also that fish supply grows faster that the world population which may result in wastages. Amidst these supply-demand related challenges, there exist uncertainties and it is prudent to appreciate that a proper management operation approach is of great importance to the enterprise if profits must be increased. Fish harvesting strategy in artificial fish ponds is thus, important to fish-farmers who practice commercial aquaculture under these uncertainties (Yu and Leung, 2006).

Mathematical techniques have been used to support decision making in such real-life system problems under uncertainty (Gorissen et al, 2015). One such approach is stochastic optimization (SO) which deals with uncertainty on only the soft constraints (Palma and Nelson, 2009). Exact solutions to optimization problems is hard to process and usually intractable when SO technique is applied (Dyer and Stougie, 2006). This work has been critiqued by Hanasusanto et al (2016) which concluded that SO problems are even more challenging to solve and can be solved with very low accuracy, if any. Yu and Leung (2009) explored a framework for optimal harvesting in a continuous aquaculture operation with nonhomogeneous seasonality of growth, concluding that the use of SO could mislead the aqua-manager to make undue economic losses. Robust optimization (RO) was then developed to solve uncertain optimization problems by considering the uncertain data to be existing in an uncertainty set. In operation management of agricultural systems, the concept of RO has been used for scheduling harvesting of wine grape (Bohle et al, 2010), planning uncertain biodiesel supply chain (Leão et al, 2010), deciding on the optimal harvesting time in aquaculture (Yu and Leung, 2009), and diverting polluted water flows (Mabaya et al, 2016). Three strategies can be used to harvest fish in ponds, single-batch harvesting (all the fish harvested at once), continuous thinning (results into infinite number of harvests) and discrete partial harvesting. A study by Yu and Leung (2006) explored the optimal partial harvesting of fish. They found out that it is the most efficient approach to this problem and it can improve profitability of an aquaculture enterprise.

In this study, we consider that growth models for market price of fish with volatility are given and then analyze harvesting policy for fish in the framework of RO (Ben-Tal and Nemirovski, 1999), as Bertsimas and Sim (2003) points out that discrete RO approach can solve impulsive optimization problems with more efficiency over the variability region. Demonstrative optimization is performed using a robust counterpart optimization (RCO) technique with hypothetical model parameters. With discrete harvesting stages in the time domain, the robust optimal harvesting policy under presence of volatility is prescribed as a partial harvesting strategy.

2. Methodology

We assume harvesting of fish from a hypothetical pond to sell at market. The market price of fish evolves in time with changing volatility, but the fish farmer has no information on the realized market price. Here, a time stage is taken as one week. The objective of RO is to predetermine the ratio of fish harvested from the pond each week during a harvesting season lasting $n = 8$ weeks, in order to maximize the total profit at worst. A subscript i for any variable represents the i th week.

2.1 Growth models

The market price p taking biological growth and mortality into account inclusively, is assumed to consists of a nominal part p^* and an uncertain part which is standardized by a volatility σ.

A logistic model of Verhulst type is employed for representing the growth of nominal price as

$$p_{i+1}^* = p_i^* + r\left(C - p_i^*\right)p_i^* \tag{1}$$

where r is the growth rate of the nominal price, and C (>0) is the carrying capacity of the nominal price (Tsoularis, 2001). The factor $\left(C - p_i^*\right)$ suppresses the exponential growth as the nominal price approaches to the carrying capacity.

While, the exponential model without any suppression is employed for representing the growth of the volatility as

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \beta\sigma_i \tag{2}$$

where β is the growth rate of the volatility.

It is also assumed that there are some correlations among the market prices at different weeks to accept a conservatism for extreme cases. Gorissen et al (2015) recommended to describe possible realizations of p_i with the ellipsoidal uncertainty set as

$$U^{\theta} = \left\{ \begin{pmatrix} \vdots \\ p_i \\ \vdots \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \left| \sum_{i=0}^{i<n} \frac{\left(p_i - p_i^*\right)^2}{\sigma_i^2} \le \theta^2 \right. \right\} \tag{3}$$

where θ (>0) is the risk-aversion parameter.

2.2 Robust counterpart optimization

Because information on the realized market price is not available, a policy is to predetermine the ratio x_i of fish harvested from the pond for each week i. The optimization problem is to find x_i ($0 \le i < n$) so as to maximize the performance index z defined by

$$z = \sum_{i=0}^{i<n} p_i x_i \tag{4}$$

under the constraints

$$\sum_{i=0}^{i<n} x_i = 1 \tag{5}$$

and

$$x_i \ge 0\,. \tag{6}$$

If there is no uncertainty, the trivial solution to this optimization problem is the single-batch harvesting at the last week ($x_{n-1} = 1$ and $x_i = 0$ for the other is). However, with the presence of uncertainty described by (3) RCO searches for x_i so as to maximize z. This is indeed a nonlinear programming problem to maximize

$$y = \min\left\{ z = \sum_{i=0}^{i<n} p_i^* x_i - \theta\sqrt{\sum_{i=0}^{i<n} \sigma_i^2 x_i^2} \right\} \tag{7}$$

with the constraints (5) and (6). The local extremum condition for (7) is

$$\left(p_i^* - p_{i+1}^*\right)^2 \sum_{k=0}^{k<n} \sigma_k^2 x_k^2 - \theta^2 \left(\sigma_i^2 x_i - \sigma_{i+1}^2 x_{i+1}\right) = 0 \tag{8}$$

which is solved numerically together with (5) using Newton-Raphson method. The risk-aversion parameter θ helps to adjust the trade-off between the robustness and the optimality of the model (Gregory et al, 2011), is minimized as far as (6) remains satisfied.

3. Results and discussion

The RCO minimizing the risk-aversion factor was attempted under each of the following hypothetical conditions:

Carrying capacity of nominal price $C = 1.0$;

Initial nominal price $p_0^* = 0.5$;

Initial volatility $\sigma_0 = 0.1$;

Growth rate of nominal price $r = 0.3, 0.5, 0.7$; and

Growth rate of volatility $\beta = 0.05, 0.20, 1.00$.

The results of the nine cases with different r and β are summarized in Figure 1, where the red lines represent the nominal price p_i^*, the blue areas represent the envelopes $p_i^* \pm \theta\sigma_i$ of possible market price (some are not fully contained in the panels), and the orange lines represent the optimal ratio x_i. The minimum risk-aversion factor θ is precise to one decimal place.

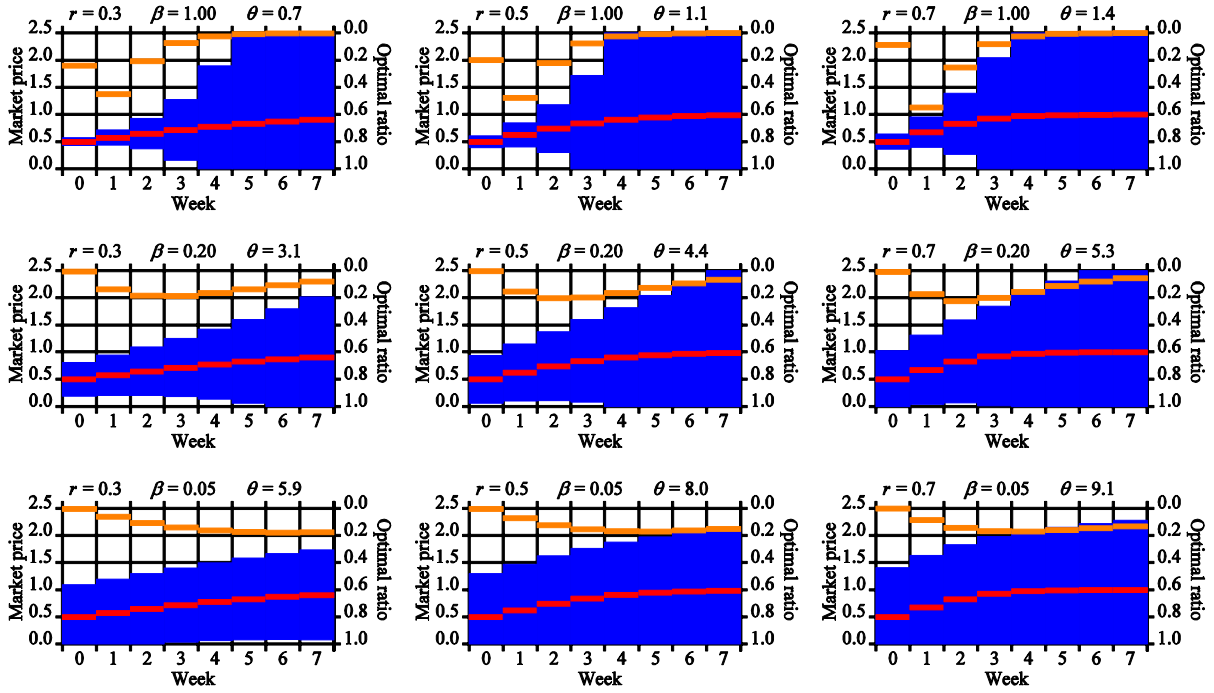


Figure 1: Results of RCO with different growth model parameters

In all the nine cases of growth condition considered, we observe that there is a distinct distribution of the optimal ratio to individual harvesting stages. This shows that the RCO model can effectively compute optimization problems that involve harvesting policy in discrete-time. The optimal ratio allocations of fish to be harvested in each week vary depending on the growth conditions considered. In this maximization problem, the robust optimal model operates to allow the farmer to harvest more fish while volatility remains small in comparison to nominal price. We observe that RCO responds differently to the growth conditions with regard to the values of r and β.

From Figure 1, we can deduce that r does not really alter the strategy by which the model allocates the optimal harvesting ratio across the harvesting period. However, the model seems to be reacting more to the growth rate of volatility. This is best illustrated by the results when either r or β is alternatively constant (see Figure 1). This shows how robust the model is. When the growth rate of volatility is higher, the worst-case market condition grows worse towards the end of the harvesting period so then, the model tends to allocate less optimal ratio for harvesting (see Figure 1, when $\beta = 1.00$) than when it is way smaller (see Figure 1, when $\beta = 0.05$). This implies that under these growth conditions, it is more favorable to harvest in the earlier weeks of the period when β is high and later in the harvesting period when β is low. From the results, the best worst-cases occur in week 1 for growth conditions $\beta = 1.00$ and $r = 0.3, 0.5, 0.7$; weeks 2 & 3 when growth conditions are $\beta = 0.2$ and $r = 0.3$, week 2 for $\beta = 0.2$ and $r = 0.5, 0.7$ and in week 6 when $\beta = 0.05$ and $r = 0.3, 0.5$, weeks 4 & 5 when $\beta = 0.05$ and $r = 0.7$, respectively. RCO model therefore, predicts that under the respective growth conditions it is most optimal to harvest highest ratio of fish during these weeks.

These results confirm that a discrete RO technique can effectively manage the optimal harvesting of fish in a pond to maximize the market returns under price volatility as projected. We were able to demonstrate how RCO approach manages partial harvesting of fish in discrete harvesting stages to maximize market profits with given hypothetical model parameters.

4. Conclusions

In this paper, we presented a robust optimal policy model for harvesting fish in a pond by considering price volatility to maximize profits. The RCO model allocated the optimal harvesting ratio with robustness to immunize the system from infeasible realizations. We demonstrated that harvesting policy can be analyzed more efficiently by a discrete RO technique to guarantee profit increment under various hypothesized growth conditions of the model parameters.

Acknowledgements
This research is funded by grants-in-aid for scientific research No.16K15005 and No.16K15007 from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References
Ben-Tal A, Nemirovski A: Robust solutions of uncertain linear programs. Operations Research Letters, 25, 1-13, 1999.
Bertsimas D, Sim M: Robust discrete optimization and network flows. Math Program, 98, Series B, 49-71, 2003.
Bohle C, Maturana S, Vera J: A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. European Journal of Operational Research, 200, 245-252, 2010.
Dyer M, Stougie L: Computational complexity of stochastic programming problems. Math Program, 106, Series A, 423-432, 2006.
FAO: FAO Aquaculture Newsletter, No. 56, April 2017.
Gorissen BL, Yanikoglu I, den Hertog D: A practical guide to robust optimization. Omega, 53, 124-137, 2015.
Gregory C, Darby-Dowman K, Mitra G: Robust optimization and portfolio selection: the cost of robustness. European Journal of Operational Research, 212, 417-428, 2011.
Hanasusanto GA, Kuhn D, Wiesemann, W: A comment on "Computational complexity of stochastic programming problems". Math Program, 159, Series A, 557-569, 2016.
Leão R, Oliveira F, Hamacher S: Dealing with uncertainties in the biodiesel supply chain based on small farmers: a robust approach. Conference proceedings in: *42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, Brazil*, 2010.
Mabaya G, Unami K, Yoshioka H, Takeuchi J, Fujihara M: Robust optimal diversion of agricultural drainage water from tea plantations to paddy fields during rice growing seasons and non-rice growing seasons. Paddy Water Environ, 14, 247-258, 2016.
Palma CD, Nelson JD: A robust optimization approach protected harvest scheduling decisions against uncertainty. Can J Res, 39, 342-355, 2009.
Tsoularis A: Analysis of logistic growth models. Res Lett Inf Math Sci, 2, 23-46, 2001.
Yu R, Leung P: Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. Marine Resource Economics, 21, 301-315, 2006.
Yu R, Leung P: Optimal harvest time in continuous aquacultural production: The case of nonhomogeneous production cycles. Int J Production Economics, 117(2), 267-270, 2009.

Lipschitz continuity of value functions solving a dynamic programming problem for a water storage tank
（貯水タンクに対する動的計画問題の解となる価値関数のリプシッツ連続性）

○Koichi Unami[1], Osama Mohawesh[2], Yamato Fujikura[1], Masayuki Fujihara[1]
[1]*Graduate School of Agriculture, Kyoto University*
[2]*Faculty of Agriculture, Mutah University*

1. Introduction

Most small-scale irrigation schemes involve water storage tanks to buffer between demand and supply of water. A prototype of micro irrigation scheme equipped with a flash flood harvesting facility and a solar energy driven desalination plant has been constructed in a harsh arid environment of Jordan Valley where natural surface water as well as groundwater is saline (Unami et al., 2015). The desalination plant is indeed an innovated greenhouse where condensed dew can be efficiently collected (Mohawesh et al., 2015). After a flash flood event occurred on February 16, 2017, the prototype commenced operation in its updated form. Freshwater from the desalination plant is being manually collected and stored in a well-sealed tank of 6,000 L capacity almost every day in the morning. While, based on the operator's decision made after dew collection each day, irrigation is performed with the freshwater stored in the tank for few hours at most. Table 1 shows the date (dd/mm/yyyy), the duration T (min), and the amount V_{col} (L) of freshwater collected in advance, for each irrigation event performed during the period from February 16, 2017 through October 31, 2017. When considering each irrigation event as a period of regulating outflow from the water storage tank, an optimal control problem is formulated to determine the discharge of the regulated outflow. In such an irrigation event, the water storage tank is under zero-balance condition except for the regulated outflow for irrigation, while the variability of the irrigation interval and the amount implies arbitrary initial storage volume. Fujikura et al. (2016) formulated a primitive dynamic programming (DP) problem for such a water storage tank and presented a heuristic viscosity solution with a proof of a comparison theorem. However, that mathematical analysis hypothesized continuity of the value function. Here, the DP problem is reviewed in the context of application to the prototype, and then Lipschitz continuity of the value function is demonstrated.

Table 1. Operation of the water storage tank in terms of irrigation events and collected freshwater

Date	T (min)	V_{col} (L)	Date	T (min)	V_{col} (L)
24/04/2017	155	898.585	14/07/2017	30	272.800
15/05/2017	85	391.810	30/07/2017	150	392.240
25/05/2017	60	195.150	31/08/2017	30	836.940
10/06/2017	145	386.700	20/09/2017	30	509.610
18/06/2017	150	195.685	03/10/2017	30	208.050
03/07/2017	135	337.540	28/10/2017	50	601.930

2. Formulation of a dynamic programming problem

Let $[0,T)$ be the period of an irrigation event with the terminal time T. At $\tau \in [0,T)$, the storage volume x of the tank having a capacity V is driven by the outflow discharge $u = u(\tau)$ regulated on the base of full information on x, resulting in the water balance equation

$$\mathrm{d}x = -u(\tau)\,\mathrm{d}\tau . \tag{1}$$

The optimal strategy for the regulated outflow discharge u, which is considered as the control variable, minimizes the performance index

$$J^u = J^u(t,x) = \int_t^T \left| u(\tau) - q \right| \mathrm{d}\tau \tag{2}$$

where t is the current time, and q (>0) is the constant water demand to which the outflow discharge is regulated to follow. The performance index (2) evaluates the total deviation of the actual outflow discharge from the target as a penalty, as both of shortage and excess of soil moisture negatively affect the growth of irrigated plants. The optimal intake discharge u^* achieves the infimum $\Phi(t,x)$ of $J^u(t,x)$ as

$$\Phi(t,x) = J^{u^*}(t,x) \le J^u(t,x) \tag{3}$$

for any admissible u. This $\Phi = \Phi(s,x)$ is referred to as the value function. According to the DP principle (Fleming and Soner, 2006), the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation governs $\Phi(t,x)$ and u^* in $\Omega = [0,T) \times (0,V]$ as

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u^* \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \left| u^* - q \right| = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \sup_{u \in U} \left\{ u \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \left| u - q \right| \right\} = 0 \tag{4}$$

where U is the set of admissible control prescribed as

$$U = [0, q_{\max}] \tag{5}$$

where $q_{\max} (\geq q)$ is the maximum outflow discharge. Considering the cases that the irrigation event is over and that the water storage tank becomes empty, the terminal condition

$$\Phi(T,x) = 0 \tag{6}$$

and the boundary condition

$$\Phi(t,0) = q(T-t) \tag{7}$$

are imposed.

3. Lipschitz continuity of value functions

Let $0 \leq t_0 \leq t_1 \leq T$, $0 \leq x_0 \leq x_1 \leq V$, and $x_i(t,u) = x_i - \int_{t_0}^{t} u(\tau) \mathrm{d}\tau$ for $i = 0,1$ with $u(\tau) \in U$ and $t \in [t_0, T]$. The first exit time of $x_i(t,u)$ from Ω is denoted by $\tau_i(u)$. Noticing that the empty state $x_i(t,u) = 0$ of tank remains until the terminal time once the tank becomes empty at $\tau_i(u)$, it is shown that

$$\left| \Phi(t_0, x_1) - \Phi(t_0, x_0) \right| \leq \left| x_1 - x_0 \right|. \tag{8}$$

A series of inequalities holds for any $\varepsilon > 0$ as

$$\Phi(t_0,x_0) - \Phi(t_1,x_0) \leq \int_{t_0}^{t_m} \left| u(\tau) - q \right| \mathrm{d}\tau + \Phi\left(\tau_m, x_0(\tau_m,u)\right) - \Phi(t_1,x_0) < \Phi(t_0,x_0) - \Phi(t_1,x_0) + \varepsilon \tag{9}$$

where $\tau_m = \min\left(t_1, \tau_0(u)\right)$ for some $u(\tau) \in U$ during the period $[t_0, \tau_m]$. Using (8) as well as the boundedness of $\int_{t_0}^{t_m} \left| u(\tau) - q \right| \mathrm{d}\tau$ and $\left| x_0 - x_0(\tau_m, u) \right|$, it is shown that

$$-q_{\max}(t_1 - t_0) \leq \Phi\left(\tau_m, x_0(\tau_m,u)\right) - \Phi(t_1,x_0) \leq q_{\max}(t_1 - t_0) \tag{10}$$

and then

$$\left| \Phi(t_1,x_0) - \Phi(t_0,x_0) \right| \leq (C + q_{\max}) \left| t_1 - t_0 \right| \tag{11}$$

where $C = \max(q, q_{\max} - q)$.

4. Conclusions

The practical problem to determine the optimal rate of the regulated outflow from the water storage tank motivated the mathematical analysis of the DP problem. The freshwater from the desalination plant is collected and measured, to clarify the variability of initial states in the DP problem. The comparison theorem discussed in the earlier study now takes effect, as the Lipschitz continuity of value functions is proven.

Acknowledgements

This research is funded by grants-in-aid for scientific research No.26257415 and No.16KT0018 from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References

Fleming WH, Soner HM (2006) *Controlled Markov Processes and Viscosity Solutions*, Springer Science+Business Media, New York.

Fujikura Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M (2016) Mathematical analysis of a primitive dynamics programming problem for water reservoirs, *Proc H28 Symposium of Applied Hydraulics Division*, *JSIDRE*, 40–44.

Mohawesh O, Unami K, Fujihara M (2015) Designing and modeling on-farm desalination system using dew collection technology, *Proc H27 Symposium of Applied Hydraulics Division*, *JSIDRE*, 17–24.

Unami K, Mohawesh O, Sharifi E, Takeuchi J, Fujihara M (2015) Stochastic modelling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells, *J Clean Prod*, 88, 185–195.

塩分を含む閉鎖性水域の降雨によって形成される塩分成層の定量化と可視化に関する研究

Study on Quantification and Visualization of Salinity Stratification Caused by Rain in Closed Water Body with Saline Water

○尾﨑　彰則*，パニタン　カイウジャンタウィ**，モントン　アノンポニャスクル***，
グエン ヴァン ティン****，ミンハズ アハメッド****
OZAKI Akinori, PANITAN Kaewjantawee, MONTON Anongponyoskul,
NGUYEN Van Thinh, MINHAZ Ahmed

１．はじめに

一般的に流れの停滞性が強い閉鎖性水域では，水域鉛直方向の流体密度差による成層構造が形成されやすい環境下にあり，その成層構造の強固化・複雑化に伴い水質汚濁が進行するとされている．成層構造については，気象要因あるいは水域内流体特性と関連付けて，形成，発達，解消に関わるプロセス・メカニズムについて検討した研究が多く報告されている(1)他．また，成層構造の安定度と鉛直混合力との関係性から，水域内の水質状態に関わる議論がなされている(2)他．

これらの閉鎖性水域の成層化に関わる既往の研究では，水温による成層化とそれに伴う水質・水理現象について，特に陸水におけるダム，湖沼，貯水池等を対象現場として取り扱われているが，水産養殖池や汽水域等の塩分を含む水域に関わる現象についてはあまり取り扱われていない．塩分を含む閉鎖性水域では，水温成層に加え塩分成層が形成されるため，より複雑かつ難解な成層状態にあり，水域内水環境状態の維持・管理が難しくなると考えられる．自然環境下において，この塩分成層を形成する主要因は降雨であり，降雨強度および水域内塩分濃度の違いにより，降雨によって形成される塩分成層の規模，成層安定度等が異なることが考えられ，水環境状態悪化との関連性が示唆される．この降雨による塩分成層と水環境状態悪化との関連については，特に水産養殖池では，水環境悪化が養殖対象物生産量に直接的に影響を及ぼすことから極めて重要な問題であり，早急な解明が求められると考えられる．

以上のことから本研究では，水産養殖池等の塩分調整を行っている閉鎖性水域を対象として，水域に生じる降雨によって形成される塩分成層状態について，自作の雨滴発生装置を用いた水理実験を行い，降雨後の塩分成層状態の定量化と降雨継続下の塩分成層形成過程の可視化により検討した．

２．実験概要

（１）実験水槽および雨滴発生装置

実験は，長さ 0.6 m，幅 0.3 m，深さ 0.4 m の実験水槽と，水槽上部に設置した雨滴発生装置を用いて実験を行った（Fig. 1 参照）．雨滴発生装置は，アクリル製水槽の底面に直径 3 mm で穿孔し，

*　九州大学熱帯農学研究センター *Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University*
**　カセサート大学クーロンワン水産研究所 *Klongwan Fisheries Research Station, Kasetsart University*
***　カセサート大学水産学部 *Faculty of Fisheries Kasetsart University*
**** 九州大学大学院地球社会統合科学府 *Graduate School of Integrated Sciences for Global Society, Kyushu University*
キーワード：雨滴発生装置，密度成層，ブラント・バイサラ振動数

これに 10 ㎛のピペットチップを水槽外側から逆向きに挿入することにより雨滴孔とし，この雨滴孔数を可変（34 孔，26 孔，18 孔）させて降雨量を調整した（Fig.2 参照）．なお，この雨滴発生装置による雨滴については，楕円を仮定して推定した長径が 2.6 mm, 落下速度が約 2.8 m/s であり，自然現象で観察される同程度径の雨滴に比べ半分程度の速度[3]であった．

本研究では，これらの実験装置を用いて，降雨後の塩分成層状態の定量化に関する実験および塩分成層形成過程の可視化に関する実験の 2 つをそれぞれ行った．各実験条件に関しては，実験水槽内塩水の初期塩分濃度と雨滴発生装置による降雨量を変化させ，降雨開始後の実験水槽内水位が約 20～25 mm 程度上昇するまで降雨を継続した．

（2）塩分成層状態の定量化に関する実験

塩分成層状態の定量化に関する実験では，水温計および電気伝導度計を水槽中央部に設置し，水温および電気伝導度の鉛直分布（10 mm 間隔）を計測した．計測は降雨開始前および降雨停止後 10 分後に行い，得られた水温および電気伝導度から塩分濃度を算定し，成層状態を検討した．定量化に関わる実験条件を Table 1 に示す．

（3）塩分成層形成過程の可視化に関する実験

塩分成層形成過程の可視化に関する実験では，Fig. 3 に示す位置関係でレーザーシート光（レーザー出力 ＝100 mW，レーザー波長 ＝532 nm）およびデジタルビデオカメラを設置し，実験水槽内塩水体積の 10^{-5} に相当する量[4]のトレーサー粒子（球状ポリマー粒子，粒径≒10 ㎛，比重=1.02）を混入させ，レーザーシート光照射によって鮮明になるトレーサー粒子の軌跡を撮影（撮影フレームレート=5.03 FPS，撮影継続時間=10 分）し，撮影動画について PIV 解析（使用 PIV 解析ソフト: FlowExpert2D2C（カトウ光研株

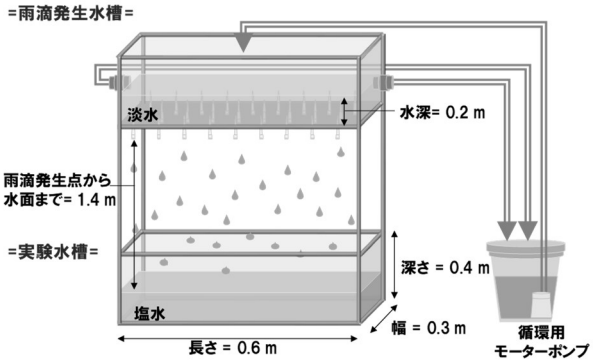


Fig. 1 実験装置模式図
Schematic diagram of experimental apparatus

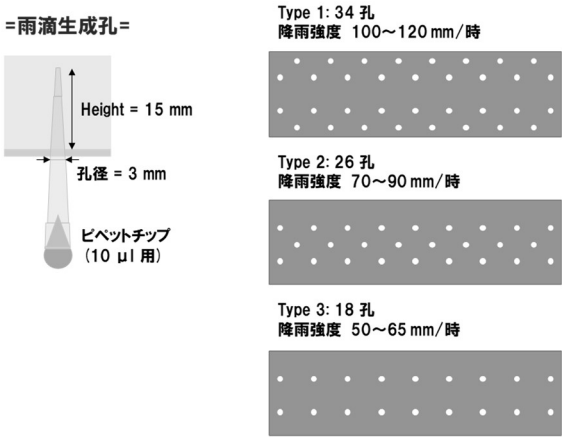


Fig. 2 雨滴生成孔配置図
Setting conditions for raindrop hole

Table 1 塩分成層状態の定量化に関する実験条件
Experimental conditions for quantification of salinity stratification

実験番号	雨滴生成タイプ 雨滴孔数	初期水深 mm	初期塩分濃度 %	初期水温 ℃	降雨量 mm	降雨継続時間 分	降雨強度 mm/時
1-1	Type1 34	200	3.03	19.3	24.0	12.0	120.0
1-2			2.69	18.9	24.0	12.0	120.0
1-3			2.40	18.5	23.0	12.0	115.0
1-4			2.16	15.7	22.0	12.0	110.0
1-5			1.94	15.6	21.0	12.0	105.0
1-6			1.73	15.5	22.0	12.0	110.0
1-7			1.54	15.3	22.0	12.0	110.0
1-8			1.42	12.9	21.0	12.3	102.2
1-9			1.26	13.1	21.0	12.3	102.2
2-1	Type2 26	200	3.05	16.1	24.0	16.0	90.0
2-2			2.68	16.0	21.0	17.0	74.1
2-3			2.43	13.7	22.0	16.0	82.5
2-4			2.12	13.8	21.0	16.0	78.8
2-5			1.91	14.2	24.0	17.0	84.7
2-6			1.72	14.4	23.0	17.0	81.2
2-7			1.58	14.7	21.0	17.0	74.1
2-8			1.43	15.1	21.0	18.0	70.0
2-9			1.26	13.4	20.0	14.0	85.7
3-1	Type3 18	200	3.06	15.4	24.0	24.0	60.0
3-2			2.72	15.5	24.0	24.0	60.0
3-3			2.42	15.5	24.0	24.0	60.0
3-4			2.15	15.7	24.0	24.0	60.0
3-5			1.96	15.9	24.0	24.0	60.0
3-6			1.72	15.9	24.0	24.0	60.0
3-7			1.55	14.7	22.0	25.0	52.8
3-8			1.40	14.9	25.0	24.0	62.5
3-9			1.23	15.2	25.0	24.0	62.5

式会社)）を行い，流体特性を検討した．なお，PIV 解析においては，撮影した水槽側面画像のうち，高さ 0.2 m（水底から初期水位点），長さ 0.6 m（水槽長さ全体）の範囲を解析対象として，解析対象範囲をx方向 62 分割，z方向 21 分割することにより格子を設定して解析を行った．可視化実験に関わる実験条件を Table 2 に示す．

３．実験結果

（１）降雨前後の塩分濃度鉛直分布

Fig. 4 に降雨発生前と降雨停止 10 分後の塩分濃度鉛直分布の一例を示す．Fig. 4 より，降雨停止 10 分後の塩分濃度鉛直分布は，下層から，初期濃度とほぼ同じ値を持つ塩分濃度安定層，濃度勾配の値が高い塩分濃度遷移層，初期濃度の 75 ~ 85 %程度の塩分濃度を持つ混合層の 3 層に分かれていることがわかる．

（２） 降雨停止後の塩分成層状態

Fig. 4 の塩分濃度鉛直分布を詳細に検討するために，ブルント・バイサラ振動数N^2を算出し検討した．ブルント・バイサラ振動数は密度成層の安定度を示すパラメータで以下の式で与えられる(5)．

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_i}\frac{d\rho(z)}{dz} \qquad (1)$$

ここで，ρ_iは降雨前の鉛直方向密度の平均値(kg/m^3)，zは水深(m)，$d\rho(z)$は水深zにおける密度(kg/m^3)，gは重力加速度(9.8 m/s)である．

Fig. 5 に示すブルント・バイサラ振動数の鉛直分布からも，塩分濃度の鉛直分布が，下層から，塩分濃度安定層，塩分濃度遷移層，混合層の 3 層に分かれることが確認できる．また，塩分濃度遷移層で出現するピーク値に相当する水深は，鉛直方向密度分布の変曲点を示している．この変曲点の水深，それぞれの降雨条件において初期塩分濃度の低下に伴い，変曲点の位置が深くなっており，降雨の影響が下層まで到達していることがわかる．

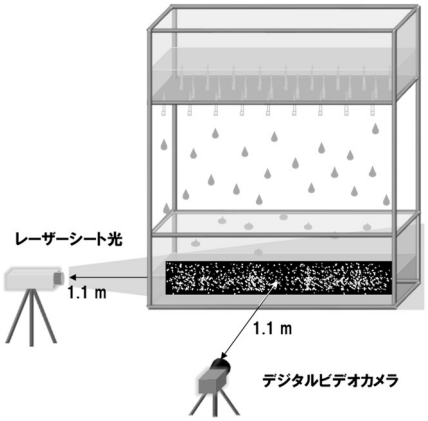


Fig. 3 可視化実験におけるレーザーシート光およびカメラの位置関係
Setting position of laser sheet and video camera for visualization of salinity stratification

Table 2 実験条件
（塩分成層形成過程の可視化に関する実験）
Experimental Conditions for Visualization of Salinity Stratification

実験番号	雨滴生成タイプ 雨滴孔数	初期水深 mm	初期塩分濃度 %	初期水温 ℃	降雨量 mm	降雨継続時間 分	降雨強度 mm/時
A-1	Type1 34	200	0.0	11.1	10.8	21.0	116.3
A-2		200	1.0	11.0	10.5	20.0	114.3
A-3		200	3.0	11.2	11.5	20.0	104.3
B-1	Type2 26	200	0.0	11.2	10.5	17.0	97.1
B-2		200	1.0	11.6	11.8	17.0	86.2
B-3		200	3.0	11.2	10.7	16.0	90.0
C-1	Type3 18	200	0.0	10.9	20.7	16.0	46.5
C-2		200	1.0	10.9	20.5	15.0	43.9
C-3		200	3.0	10.3	20.5	14.0	41.0

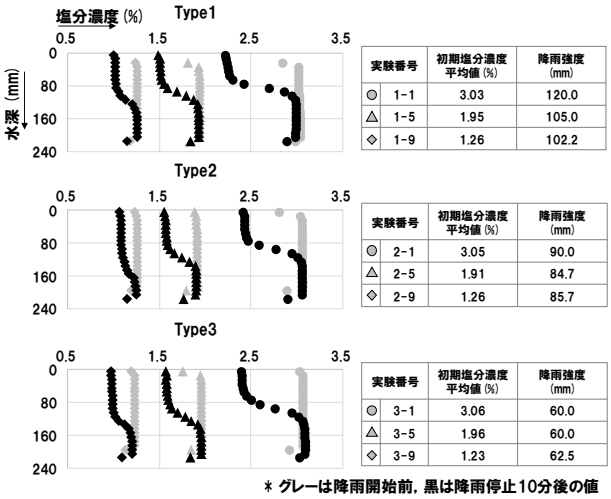


Fig. 4 降雨前と降雨停止 10 分後の塩分濃度鉛直分布
Variation of salinity concentration fluctuation 10 minutes after stopping the rain

Fig. 6 は，ブルント・バイサラ振動数の鉛直分布に基づいて，塩分濃度安定層，塩分濃度遷移層，混合層の 3 層の割合と，初期塩分濃度に対する各層の平均濃度の割合（C_{LA}/C_I，右軸，反転色ドット）を示したものである．ここでC_{LA}は各層の平均濃度，C_Iは初期塩分濃度である．また，図中鉛直方向の色は，図中下から塩分濃度安定層，塩分濃度遷移層，混合層に対応している．Fig. 6 より，初期塩分濃度の低下に伴い，混合層割合が増加し，塩分濃度安定層割合が減少する傾向が確認できる．また，塩分濃度遷移層の割合については，実験条件に依存することなく，全水深に対して 2〜3 割程度の厚さを持っていることがわかる．一方C_{LA}/C_I値については，混合層のみ初期塩分濃度の低下に伴い値が減少する傾向がわかるが，塩分濃度安定層および混合層については実験条件に依存することなく，それぞれ同程度の割合で塩分濃度を保持していることがわかる．

（3）塩分成層形成過程の可視化実験

Fig.7 は，雨滴孔数 34（実験番号 A-1〜A-3）における塩分成層形成過程の可視化実験で得られたx方向流速Uおよびz方向流速Wの合成流速ベクトルを示したものであり，左から降雨開始後，3 分，6 分および 9 分のベクトルである．Fig.7 より，塩分の有無によって，降雨による内部流体の応答が大きく異なることがわかる．塩分を含まない場合は，降雨が水面に作用することによって生じる流れは水底まで到達しており，水槽内の全層混合が確認できる．一方，塩分を含む場合は，降雨による流れは水底まで到達することはなく，降雨により流れが形成される上層と，流れが低速かつ安定している下層に明確に区分できる．ここで確認できる上層は前述の実験で確認された塩分濃度遷移層・混合層，下層は塩分濃度安定層にそれぞれ相当するものと考えられる．初期期塩分濃度 1%（A-2）および 3%（A-3）の実験結果を比較すると，初期期塩分濃度 1%では

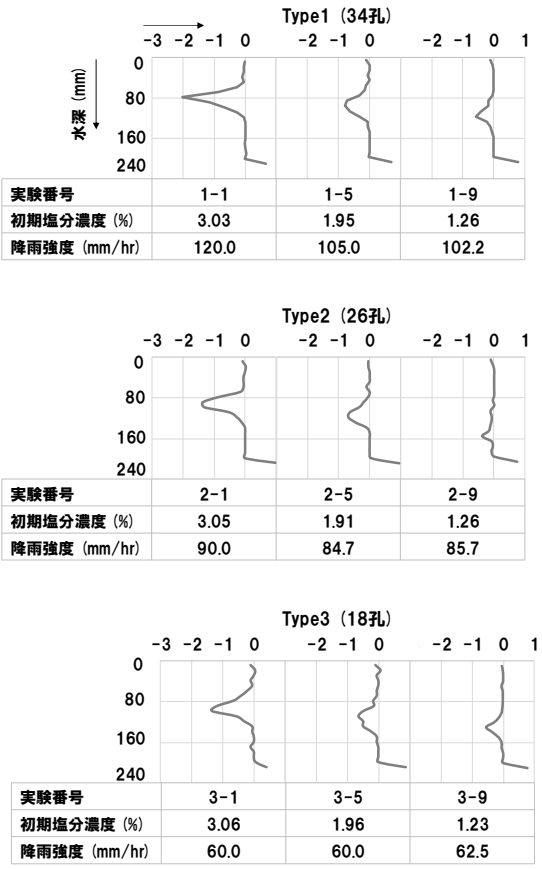


Fig. 5 降雨停止 10 分後の
ブルント・バイサラ振動数鉛直分布
Vertical distribution of Brunt-Vaisälä frequency N^2
10 minutes after stopping the rain

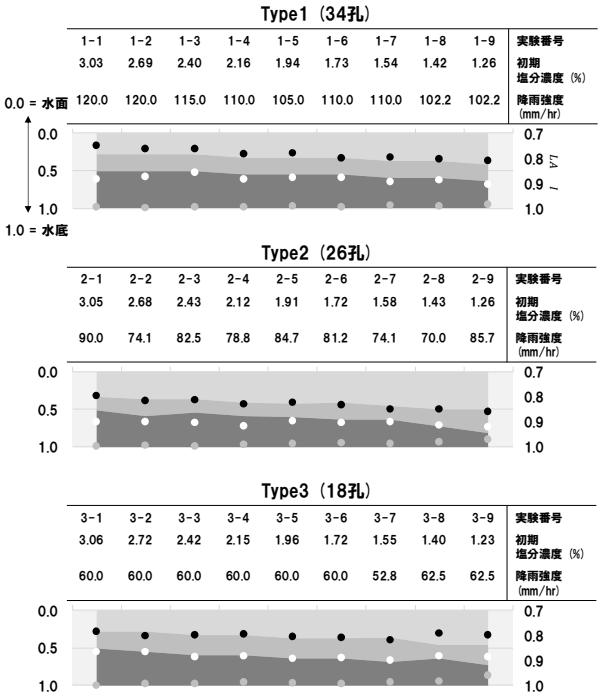


Fig. 6 実験条件
各層の水深に対する割合と層平均濃度
Depth ratio and averaged salinity in each layer

水面から約半分程度の水深までが上層，初期塩分濃度 3%では全水深の 3 割程度が上層であり，いずれの実験条件においても上層割合が時間の経過に伴い増加していることがわかる．この初期塩分濃度の違いによる上層割合の違いは，前述の Fig.6 で確認されたと初期塩分濃度の低下に伴い，混合層割合が増加する傾向とも一致しており，初期塩分濃度が，塩分成層の形成過程および形成後の成層状態に影響を及ぼすことを示している．

Fig.8 は，降雨開始後 6 分後の各実験条件におけるx方向流速Uおよびz方向流速Wの合成流速ベクトルを示したものである．なお，Fig.8 のベクトル図を考察するにあたり，雨滴孔数 26（実験番号 B-1～B-3）の実験については，Fig.2 に示す通り雨滴孔が動画撮影面の直上にあることから，流速ベクトルが他の実験条件に比べて過大に評価されている点に注意する必要がある．まず塩分濃度に関する比較から，同規模程度の降雨が生じた場合，塩分濃度の増加に伴い降雨による流れが下層に到達しにくい状態にあることがわかる．一方，降雨強度に関する比較については，初期塩分濃度の違いによりベクトル分布の傾向が異なる．まず，塩分を含まない場合は，降雨強度の低下に伴い下層

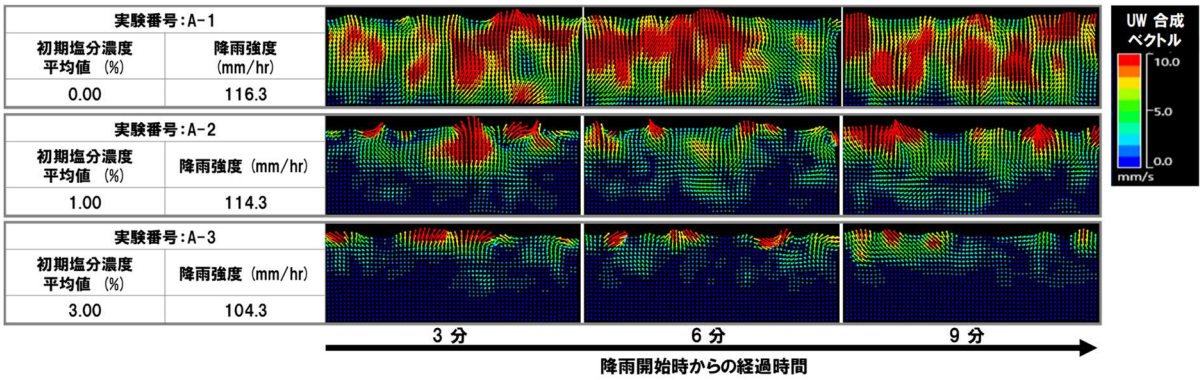


Fig. 6 x方向-z方向合成流速ベクトルの時間変化（雨滴生成孔 TypeA に関する実験）
Time series variation of synthetic vector composited by flow vector for x and z direction (Experimental case in Type A)

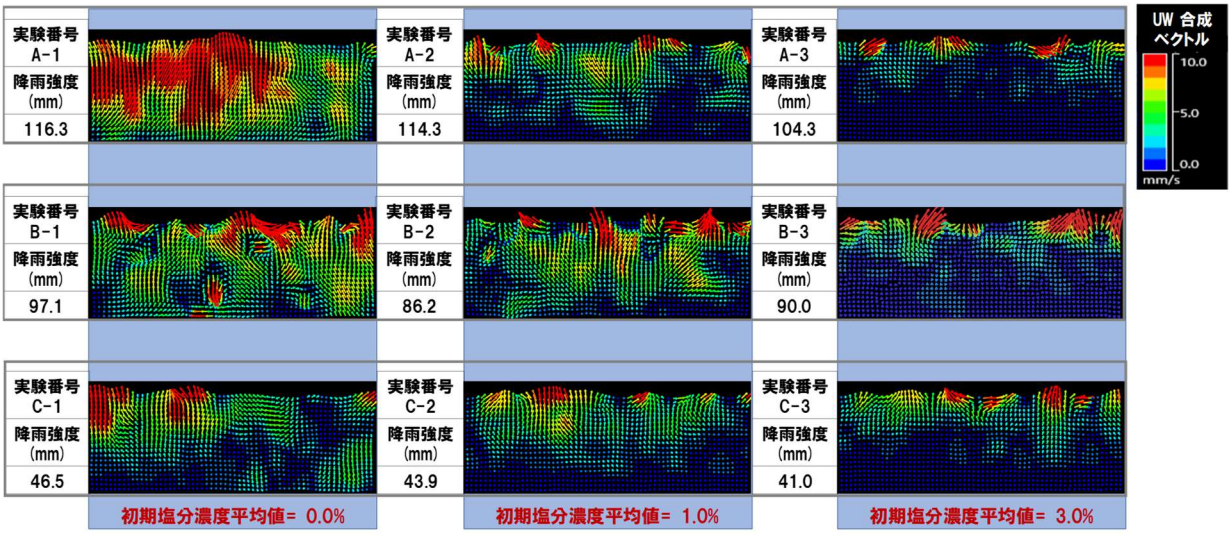


Fig. 7 降雨開始 6 分後のx方向-z方向合成流速ベクトル図（全実験条件）
Synthetic vector composited by flow vector for x and z direction at 6 minutes after starting the rain (All experimental conditions)

まで流れが到達しにくく，下層付近の流れが弱くなる傾向がある．一方，塩分を含む場合（実験番号 B-1～B-3 を除く）は, 降雨強度の強弱と降雨による流れの下層到達範囲の関係が明確ではない．この点については，前述の実験で得た Fig.6 についても同様に，降雨強度の強弱と塩分成層状態の関係を説明する結果は得られていないことから，今後詳細に検討する必要がある．

４．まとめ

本研究では，塩分を含む閉鎖性水域を対象として，水域に生じる降雨によって形成される塩分成層について，自作の雨滴発生装置を用いた水理実験を行い，降雨後の塩分成層状態の定量化と，降雨下における塩分成層形成過程の可視化により検討した．

まず，降雨後の塩分成層状態の定量化に関する実験結果から，降雨後の塩分成層状態が上層から混合層，塩分濃度遷移層および塩分濃度安定層の 3 層に分かれることが分かった．この 3 層については，初期塩分濃度の低下に伴い，混合層割合が増加し塩分濃度安定層割合が減少することが明らかになった．また，各層が持つ塩分濃度については，混合層のみ初期塩分濃度の低下に伴い減少する傾向があり，塩分濃度遷移層および塩分濃度安定層は，それぞれ初期塩分濃度に関係なくほぼ一定の割合で塩分を保持していることが分かった．なお，この 3 層の区分については，塩分濃度の鉛直分布を用いて算定されるブルント・バイサラ振動数の鉛直分布により明確に区分できることを明らかにした．

次に，塩分成層形成過程の可視化実験から，降雨によって生じる塩分成層形成過程の水域内流れは，流れが低速かつ安定である下層と，降雨の影響を受けた流速を持つ上層に分けられることが確認できた．下層安定層については，初期塩分濃度の増大に伴いより安定する傾向が確認できたが，降雨強度との関係性については，本研究では明確にできなかった．この点について検討するためには，初期塩分濃度および降雨強度の設定を幅広くした実験を行う必要があることに加えて，降雨発生装置の構造および配置等についても再度検討する必要があると考えられる．

謝辞

本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究（B）課題番号：16K1877）の助成を受けて実施したことをここに付記する．

参考文献

(1) Bertram B. and Martin S. (2008): Stratification of lakes, Reviews of Geophysics 46(2), RG2005, pp.1-27
(2) 道奥康治 (1992): 密度成層水域における乱れと鉛直混合現象，混相流， 6 巻 2 号，pp.132-148
(3) Gunn, R. and Kinzer, K. D. (1949): The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, Journal of Meteorology, Vol. 6, pp. 243-248
(4) (社)可視化情報学会 (2002): PIV ハンドブック，森北出版(株)，全 169 頁
(5) 有田 正光, 中井 正則, 道奥 康治, 池田 裕一, 中村 由行, 村上 和男 (1998): 水圏の環境，東京電機大学出版，全 404 頁

TM/TC を用いたチェックゲート操作による需要主導型配水システムの提案

Proposal of demand oriented water distribution system by operation of check gate using TM/TC

○山村　愛二*、久保　成隆*、飯田 俊彰*、木村　匡臣*

Aiji Yamamura*, Naritaka Kubo*, Toshiaki Iida*, Masaomi Kimura*

1. はじめに　多くの農業用水において幹線水路は開水路であり、チェックゲートを用いた上流水位一定制御により供給主導型の配水を行っている。しかし、支線や末端水路は近年管路化が進み、需要主導型の配水が求められている。幹線水路が開水路のままで需要主導型の配水を行うためにはファームポンドなどの貯留施設が必要だが、制約により貯留施設の設置が難しい箇所が存在する。そこで、遠隔監視/遠隔操作(TM/TC)によるチェックゲート操作で需要主導型配水システムを実現できないか検討したい。

2. 研究対象地域　Fig.1 に示す愛知用水農業専用区間は知多半島に位置する、桜鐘チェックゲートから美浜チェックゲートまでの約 30km の区間であり、区間内には 50 ヶ所以上の分水工が設置されている。最上流の桜鐘チェックゲートは電動ラジアルゲート、2 番目の北池チェックゲートは上流水位一定制御ゲート、3 番目の半田から内海までの 9 機は上下流水位制御ゲート、最下流の美浜チェックゲートは上流水位一定制御ゲートとなっている。各ゲートの設定水位は Tab.1 の通りである。

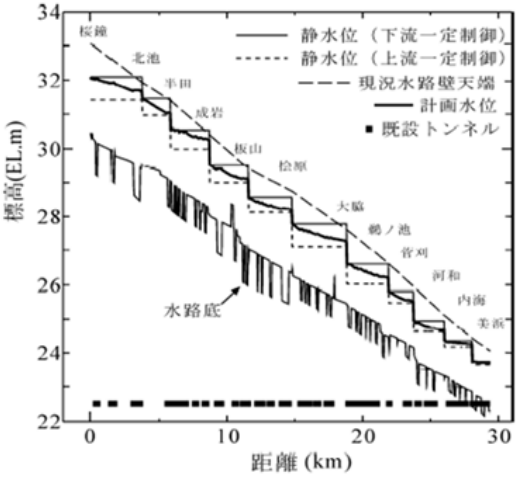


Fig.1　愛知用水農業専用区間縦断図
Longitudinal profile
of agriculture-only section in Aichi Irrigation Project

配水方式としては、予約注文方式という供給主導型の配水方式が採用されている。この配水方式では、供給者は注文を受けて用水の到達時間を考慮して送水量を決定し、農専区間の上流端の桜鐘チェックゲートにおいて終日流量調整を行っている。一方、需要者は分水量を予約して、各分水工で午前 8 時から午後 5 時の間に注文通りに分水を行っている。このような配水方式が徹底されているので、各分水工の分水率はほぼ 100%を達成しているが、この配水方式は供給者と需要者の双方にとって窮屈であり、利便性に欠けるものだと考えられる。

No	チェックゲート名称	区間距離	計画水位	設定水位		
				上流設定	上流下限	下流設定
		km	m	m	m	m
1	桜鐘		32.42	(電動ラジアルゲート)		
2	北池	3.813	32.52	(灌漑期は全開)		
3	半田	2.182	31.22	31.16	30.91	30,210
4	成岩	3.025	30.24	30.222	29.99	29.122
5	板山	3.172	29.15	29.149	29	28.169
6	桧原	3.232	28.38	28.38	28.13	27.286
7	大脇	4.258	27.36	27.31	27.11	26.24
8	鵜池	3.098	27.27	26.37	26.02	25.568
9	菅刈	2.02	25.72	25.696	25.47	24.797
10	河和	2.428	24.87	24.87	24.62	24.39
11	内海	2.036	24.42	24.42	24.17	23.756
12	美浜	1.482	23.7	23.84	(上流水位制御ゲート)	

Tab.1　各チェックゲートの設定水位
Set water level of each check gate

*東京大学大学院農学生命科学研究科　Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

キーワード：水利システムの制御、開水路流れ、チェックゲート

3. 方法　チェックゲートの基本的な制御方式としては上流水位一定制御方式(UC 方式)と下流水位一定制御方式(DC 方式)がある。需要主導型の配水を実現するためには DC 方式が適切だと考えられるが、DC 方式は施設容量に比べて通水可能流量が小さいという欠点を有する。そこで、MC 方式という制御方式が考えられる。この方式においては、Fig.2 のように最大需要時水面形と静水面(プール下流側チェックゲートの上流設定水位)との関係から増幅率 a を設定し、下流チェックゲートでの水位と静水面との乖離水位 ΔH_1 を TM/TC により当該チェックゲートに伝達し、当該チェックゲートでの乖離水位 ΔH_2 を $\Delta H_2=a\Delta H_1$ として制御する。このような制御により、DC 方式と同様に当該チェックゲートの下流水位を制御して需要主導の制御を行いながらも、流量を大きくすることができると考えられる。久保(2015)において、MC 方式は最大配水流量において優れていることが判明している。また、山村(2016)においては、MC 方式の上流端のプールの増幅率によって最大流量に大きな差が生じることが確認されている。

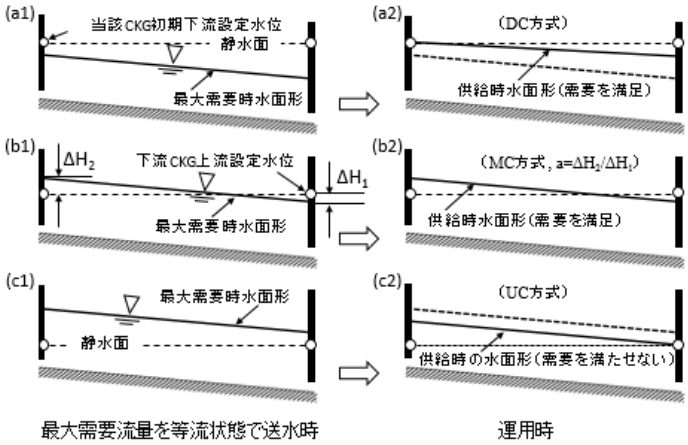


Fig.2　MC 方式
MC method

本研究では、2 つの方法を用いて MC 方式の有効性を検討した。

(1)DC 方式と MC 方式のシミュレーション結果を比較

需要主導型のチェックゲート制御方式である DC 方式と MC 方式とを比較することで、MC 方式の特徴を調べた。DC 方式では全プールについて増幅率 a=0 とすればよいが、MC 方式の増幅率を決めるためには最大需要時水面形と静水面との関係が必要である。最大需要時水面形を求めるために、2015 年 5 月 22 日から 6 月 1 日までで農専区間内の分水工の合計流量が最大時の流量を用いて、不等流計算を行った結果が Fig.3 である。このとき下流端の流量は 0 m^3 とした。この結果に基づいて各プールの $\Delta H_2/\Delta H_1$ を求めると、Tab.2 のようになった。そこで、第 1~6 プールまではこの値をそのまま増幅率 a として適用し、第 7~10 プールまでは増幅率 a=0 とした。シミュレーションは 2015 年 5 月 22 日から 6 月 1 日までの分水実績量を分水予定量とした。分水条件は、水位が分水口高より高い時は分水予定量の 100%、低い時は 0%分水できるとした。なお、シミュレーションにおいては北池チェックゲートでも上下流水位制御を行っていると設定し、第 1 プールの静水面(北池チェックゲートの上流設定水位)は 31.554m とした。

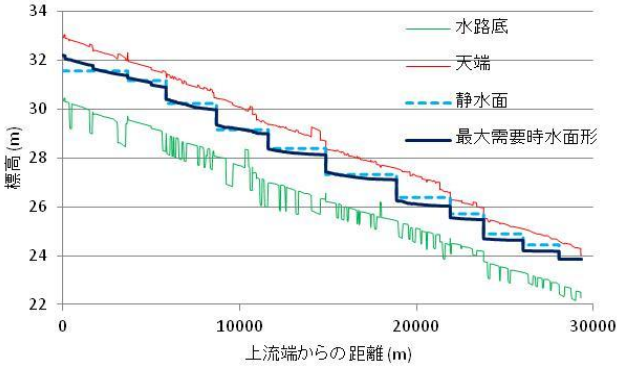


Fig.3　不等流計算結果
The result of unsteady flow calculation

プール	①	②	③	④	⑤
$\Delta H_2/\Delta H_1$	3.9092651	0.551322	0.8477669	1.5061792	0.0057644
プール	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
$\Delta H_2/\Delta H_1$	0.6297769	-0.306275	-0.631964	-0.742738	-0.909424

Tab.2　$\Delta H_2/\Delta H_1$

(2)MC 方式の第 1 プールのみの増幅率を変化させてシミュレーション

Tab.2 の MC 方式での増幅率を第 2～10 プールまではそのままの値を適用し、第 1 プールの増幅率のみを 0～5.0 まで 0.1 ずつ変化させてシミュレーションを行うことにより、第 1 プールの増幅率が流れに与える影響を検討した。第 1 プールの静水面は(1)のときと同様とした。

シミュレーション結果の評価には分水達成率、合計無効放流量、RMSE(桜鐘チェックゲートの流量と分水予定量合計とを比較、需要への追随性を評価)の 3 つを用いた。

4. 結果と考察

(1)DC 方式と MC 方式のシミュレーション結果を比較

Fig.4 は DC 方式、Fig.5 は MC 方式のシミュレーション結果である。グラフでは各時間での桜鐘チェックゲートの流量と各分水工の分水量の合計とを比較している。DC 方式では桜鐘チェックゲートでの最大流量が約 3m^3/s と小さいため、分水達成率は全体で約 90%であり、個々の分水工では最も低いもので 64%であった。無効放流量は 11 日間の合計で約 5.9 万 m^3 となった。

一方、MC 方式においては全分水工について分水率 100%を達成した。しかし、流量の振動が著しく大きくなった。特に最大で約 15m^3/s と桜鐘チェックゲートでの制限流量とほぼ同等の流量が発生し、実際にこのような流れが発生した場合は溢水を免れないであろう。また、合計の無効放流量は約 12 万 m^3 と DC 方式の約 2 倍となった。時間別でみると、AM8:00～PM5:00 で約 800m^3 と全体の 1%に満たず、夜間の無効放流量をどのように減らすかが MC 方式における課題であると言える。

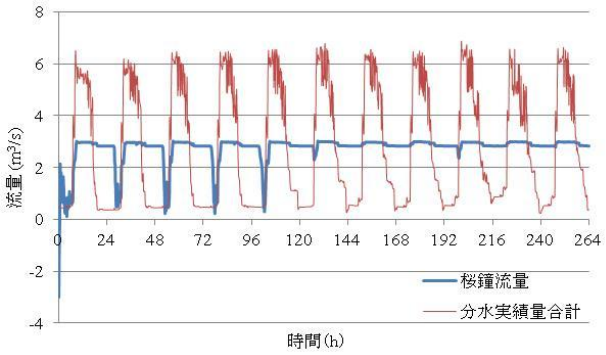


Fig.4　DC 方式のシミュレーション結果
Result of simulation of DC method

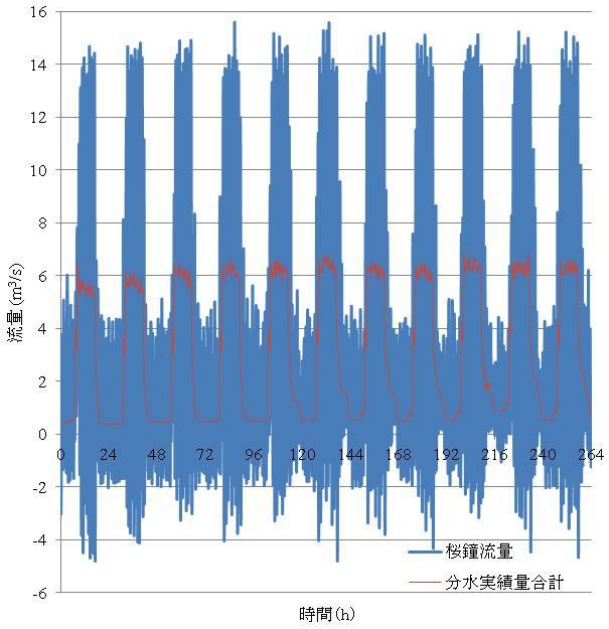


Fig.5　MC 方式のシミュレーション結果
Result of simulation of MC method

(2) MC 方式の第 1 プールのみの増幅率を変化させてシミュレーション

Fig.6、Fig.7、Fig.8 は第 1 プールの増幅率 a を変化させたときの全分水工合計での分水達成率、11 日間合計の無効放流量、桜鐘チェックゲートの流量と分水予定量合計とを比較した RMSE を示している。Fig.5 より、分水達成率 100%となるのは第 1 プールの増幅率が 0.8 以上のときである。

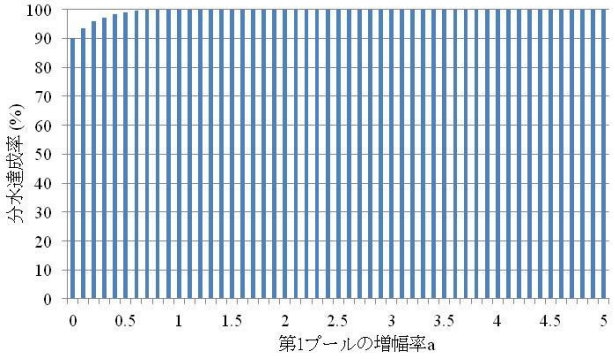


Fig.6　分水達成率
Fill rate of water diversion

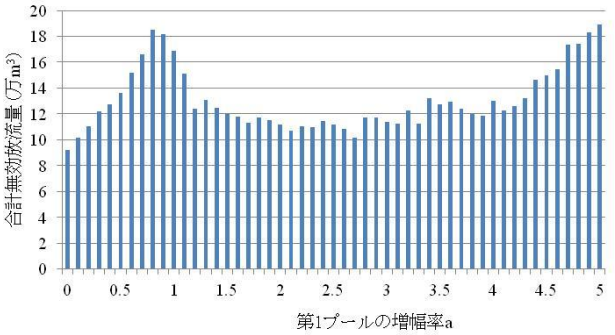


Fig.7　合計無効放流量
Total water delivery loss

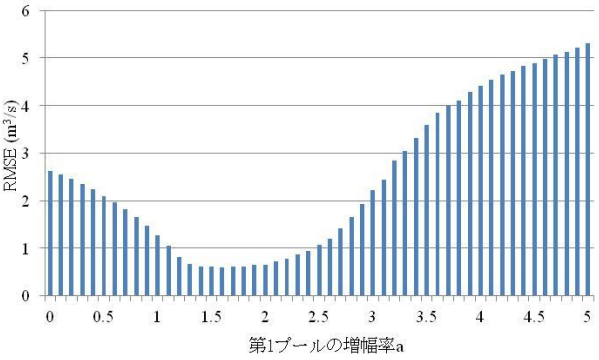


Fig.8　RMSE

続いて、Fig.6 と Fig.7 から合計無効放流量と RMSE は増幅率 a の増大に応じて単調増加するわけではないとわかる。(1)の MC 方式のシミュレーション結果と同様に、無効放流量の 99%以上は分水が行われていない夜間(PM5:00～AM8:00)に発生した。このことから、増幅率 a に対して無効放流量がどう変化するかが以下のように推察できる。

①増幅率 a=0～1.1 では、最大流量が小さいため、水路内貯留を活用して分水を行う。よって、分水達成率に関わらず分水終了時の PM5:00 に水路内貯留が不足している(水位が静水面よりも低い)ため、夜間も通水して水路内貯留を補う必要がある。この夜間通水時に、増幅率 a に比例して無効放流が発生する。増幅率 a=0.8 で無効放流量が最大となり、その後減少するのは、増幅率 a=0.9 以上では最大流量の増加により分水終了時の水路内貯留の不足分が小さくなり、それに伴って夜間の無効放流量が減少するからだと考えられる。

②増幅率 a=1.2～4.0 では、ばらつきはあるものの合計無効放流量がほとんど 12 万 m^3 以下となっている。これは、日中の分水時に十分な流量を確保できるため、分水による水路内の水量の減少を随時上流から補うことができる、つまり分水終了時の水路内貯留の不足分が小さいため、夜間の無効放流が小さくなるためだと考えられる。

③増幅率 a=4.0 以上では、最大流量の増加により無効放流量が増幅率 a に応じて単調増加する。

RMSE についても推察する。

①まず増幅率 a=0 付近では大きい値となる。これは日中は十分な最大流量を得られないことと、夜間需要が小さいにもかかわらず水路内貯留を補充するために流量が発生することに起因すると考えられる。

②増幅率 a=1.2～2.4 付近では RMSE が 1 を下回っている。これは、分水による水路内の水量の減少

を随時上流から補っていることを示しており、需要に対する十分な追随性が得られていると言える。③増幅率 a=5.0 などの大きい値になると、RMSE は大きくなる。これは増幅率の増加に伴い流量の振動が大きくなることに起因すると考えられる。

3 つの指標を総合的に判断しても適切な増幅率 a の値を決定することは現段階ではできないが、今回のケースに限っては増幅率 a=1.5～2.0 程度が適切だと考えられる。また、MC 方式を運用する際には、無効放流量を小さくするためになるべく最大流量が小さくなるように増幅率 a の値を小さく保ちつつも、水路内貯留の減少を抑えるために増幅率 a を小さくしすぎてもいけないと確認できた。今後の課題としては、夜間の無効放流量を小さくするチェックゲート操作方法を開発することが挙げられる。

引用文献

久保成隆 (2015)：TM/TC を活用した需要主導型大容量開水路配水システムの開発. 平成 27 年度応用水理研究部会講演集, 57-66.

山村愛二 (2016)：最大流量等流制御(MC)方式による需要主導型配水システムの提案～愛知用水を対象として～. 東京大学 農学部 生物・環境工学専修 卒業論文

水撃作用による管路内の圧力波形を利用した漏水位置と漏水量の推定について
Estimation of Location and Quantity of Water Leakage from Pressure fluctuation by Water hammer in Pipeline

○浅田洋平*、木村匡臣*、安瀬地一作**、飯田俊彰*、久保成隆*
○Asada Yohei*, Kimura Masaomi*, Azechi Issaku**, Iida Toshiaki*,and Kubo Naritaka*

1. はじめに

農業用管水路はその大半が高度成長期に整備されたものであり，老朽化が進んでいる。そのため漏水・破損事故は増加の一途をたどり，簡便かつ高精度な漏水検知の重要性が高まってきている[1)]。現在，漏水検知に一般的に広く使用されている水張り試験法は，漏水の有無や漏水区間の絞込みには有効な方法であるが，最終的な漏水箇所の特定までには至らない。このため，音聴法や相関法などのように漏水部から発する音を捉えて漏水箇所の特定を行う場合が多いが，これらの方法は外部環境からのノイズの影響を受けやすいという欠点がある。そこで，漏水が水理現象であることを踏まえて，漏水を水理量の変化で検知することを検討した。管路内で分岐部(流量変化部分)がある場合，管内を伝播する圧力波は分岐部で通過波と反射波に分かれることはよく知られており[2)]，漏水部でも流量が変化するため同様の現象が起こると考えられる。そこで漏水中の管路において通水中に下流末端バルブを急閉塞することで圧力波を発生（この現象を水撃作用と呼ぶ）させ，漏水による圧力変化を管内の圧力変動を観測し読み取ることで漏水を検知すること考えた。本研究では，分岐管内の圧力波の伝播特性を応用することで，観測点での水撃作用による圧力変動波形から漏水位置と漏水量を推定する方法を導出し，漏水を模擬した実験管水路において導出した推定方法の有効性を検証した。

2. 水撃作用による圧力波形からの漏水位置の推定方法

Fig.1 に漏水中の管路内の圧力波の伝播の様子，Fig.2 に観測点における圧力の時間変動を示す。$t = 0$ において下流端バルブを閉塞して，水撃作用による圧力波を発生させると，圧力波は上流端に向かって伝播していく。下流部バルブの直上流にある観測点に圧力波が最初，通過する時間を $t = t_1$ とするとこのとき観測点の圧力波は急上昇する。そして，圧力波が漏水部に達すると，漏水量に応じて圧力低下して上流端へ進み，またその圧力低下の波が漏水部を反射して下流端に向かって進む。そしてその漏水部からの反射波が観測点を通過すると観測点の圧力は低下し始め，さらに漏水部からの反射波

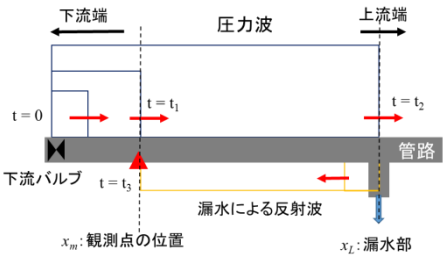


Fig.1　漏水中の管路内の圧力波の伝播
Propagation of pressure wave in pipeline with leak

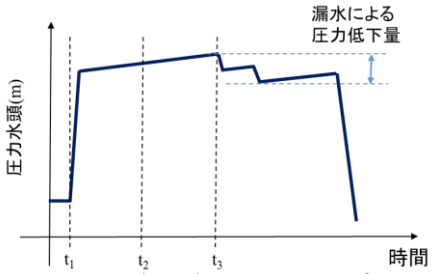


Fig.2　観測点における圧力変動
Pressure fluctuation at measurement point

*東京大学大学院農学生命科学研究科　Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
**農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門　Institute for Rural Engineering, NARO
キーワード：管路流れ，漏水検知, 水撃作用, 圧力波伝播特性，ストックマネジメント

が下流端を反射してもう一度観測点を通過することで観測点における圧力は再び低下する。ここで観測点の圧力が漏水によって最初に低下し始める時間を $t = t_3$ とおくと，観測点において圧力が水撃作用により急上昇し始めてから漏水により低下し始めるまでの時間 $t_3 - t_1$ は圧力波が観測点から漏水部を往復する時間に等しい。よって $t_3 - t_1$ を観測点の圧力波形から読み取ることで，観測点から漏水部までの距離$|x_L - x_m|$は管内の圧力伝播速度を c とおくと(1)式のように表すことができる。

$$|x_L - x_m| = c\frac{x_3 - x_1}{2} \tag{1}$$

3. 水撃作用による圧力波形からの漏水量の推定方法

水撃作用による圧力波に関する基礎方程式について摩擦を無視して解くと，以下のように圧力変化に関する(2)式と流量変化に関する(3)式が得られる。

$$\Delta H = F(t - \frac{x}{c}) + f(t + \frac{x}{c}) \tag{2}$$

$$\frac{c}{gA}\Delta Q = F(t - \frac{x}{c}) - f(t + \frac{x}{c}) \tag{3}$$

ここで g は重力加速度（m/s²），ΔH，ΔQ はそれぞれ管内の任意の点におけるピエゾ水頭変化と流量変化であり，F は圧力の進行波の大きさ，f は圧力の後退波の大きさである。(2)式から圧力変動 ΔH は進行波 F と後退波 f の重ね合わせであることがわかる。漏水部からの反射波の大きさと漏水量との関係を調べるため，Fig.3 のように漏水している管路を分岐管とみなして関係式を導出した。F_1 が水撃作用による圧力波の大きさ，f_1 が漏水部からの反射波の大きさ，F_2 が漏水部からの通過波の大きさを表している。本研究では，漏水部からの反射波が観測点に 2 回到達するまでを考えているので，観測点にまだ到達していない上流端からの反射波はないものとして説明を進める。また，漏水部の下流側の管路 1 の流量を Q_1，上流側の管路の流量を Q_2，漏水部の流量を Q_{leak}，管路の断面積を A，漏水孔の面積を a とおく．分岐点において，圧力変化と流量変化にはそれぞれ連続条件が成立するので以下の(4)，(5)式が成立する。

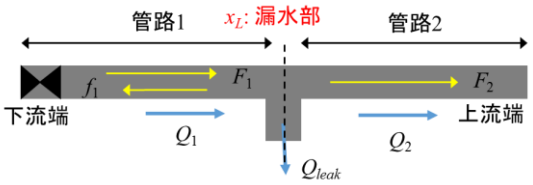


Fig.3　水撃作用による圧力波の大きさと漏水量との関係

Relation between piezometric head of pressure wave and leakage quantity

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 \tag{4}$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + \Delta Q_{leak} \tag{5}$$

ΔH_1，ΔH_2 はそれぞれ管路 1 と管路 2 における圧力変化である。(2)式，(3)式を(4)式，(5)式にそれぞれ代入すると以下の(6)式，(7)式が成立する。

$$F_1 + f_1 = F_2 \tag{6}$$

$$A(F_1 - f_1) = AF_2 + \frac{c}{g}\Delta Q_{leak} \tag{7}$$

(6)式と(7)式を連立させることで，漏水部からの反射波の大きさと漏水量との関係式は(8)式のように表すことができる。

$$f_1 = -\frac{c}{2Ag}\Delta Q_{leak} = -\frac{c}{2Ag}(Q_{leak}(t) - Q_{leak}(0)) \tag{8}$$

$Q_{leak}(0)$は漏水量の初期値，$Q_{leak}(t)$は圧力波が漏水部に通過した時の漏水量である。ここで，流出係数を C_d，漏水部の圧力の初期値を h_0，水撃作用による圧力上昇量を h_u，漏水による圧力低下量を $h_d = -f_1$ とおくと，$Q_{leak}(0)$，$Q_{leak}(t)$はそれぞれ(9)，(10)式のように表すことができる。

$$Q_{leak}(0) = aC_d\sqrt{2gh_0} \quad (9) \qquad Q_{leak}(t) = aC_d\sqrt{2g(h_0 + h_u - h_d)} \quad (10)$$

(9)，(10)式を(8)式に代入すると aC_d は(11)式のように表せる。

$$aC_d = \frac{2gA}{c}\frac{h_d}{\sqrt{2g(h_0 + h_u - h_d)} - \sqrt{2gh_0}} \quad (11)$$

(11)式を(9)式に代入して整理することで漏水量は(12)式ように表すことができる。

$$Q_{leak}(0) = \frac{2gA}{c}\frac{h_d\sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + h_u - h_d} - \sqrt{h_0}} \quad (12)$$

4. 実験による推定方法の検証

(1) 実験装置

Fig.4 に実験圧力管水路の概略図を示す。上流端に圧力タンクがあり，圧力タンクから全長 900.43 m, 管外径 27.2 mm, 管厚 1.5 mm のステンレス製の圧力管が延びており，下流端の水槽に続いている。管内の圧力伝播速度は実測と理論式から約 1,310 m/s であることがわかっている。漏水を模した漏水孔を上流端から 150.34 m，450.33 m，750.34 m 離れた場所に設置し，実験を行うごとに 1 箇所ずつ漏水をさせた。また漏水量が調節できるように漏水孔にバルブを取り付け，漏水量が測定できるようにバルブにチューブを取り付けた。漏水量はバケツとストップウォッチを使って計測した。管内の圧力は上流端から 898.66 m 離れた場所に設置された圧力センサー（PGT3-50，（株）東京計測）と圧力ロガー（WAVE LOGGER PRO，KEYENCE）を用いて計測し，管路内の流量は下流側の流量計により計測した。

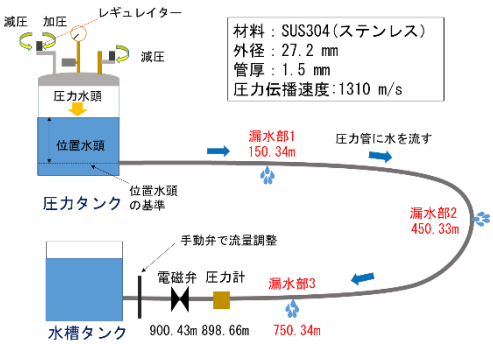


Fig.4 実験で使用した圧力管水路
Experimental Pipeline

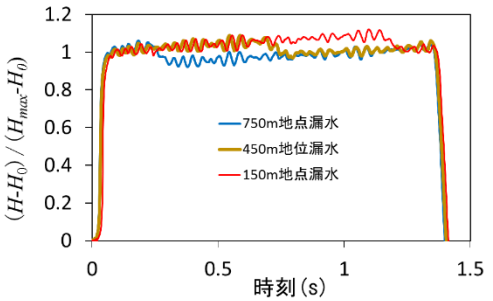


Fig.5 観測した圧力波形
Measured pressure fluctuation

(2) 実験手順

下流側の弁を開いて水を圧力管に圧送して，下流側にある手動弁によって流量を調整する。同時に漏水バルブを開き漏水を発生させておく。流量，圧力が安定した後に，電磁弁を急閉塞し，下流側にある圧力センサーで圧力変動を計測した，以上の作業を 3 箇所ある漏水部を 1 箇所ずつ漏水させて行った。

(3) 実験結果

観測点で観測した管内の圧力波形の一例を Fig.5 に示し，Table1 に実験条件と Fig.5 の圧力波形から 2 章，3 章で述べた方法により，漏水位置と漏水量を推定した結果を示す。各地点で漏水が起こっている場合それぞれにおける圧力波形を比較するため，Fig.5 の縦軸はピエゾ水

Table1 実験条件と推定結果
Experimental cases and estimation results

漏水位置(m)	750.34	450.33	150.34
上流タンク圧(m)	24.85	20.92	26.30
幹線流量(L/s)	0.1081	0.0887	0.1171
漏水量（L/s）	0.0187	0.0130	0.0250
推定した漏水位置（m）	750.11	456.67	154.78
漏水位置の誤差(%)	0.03	0.71	0.49
推定した漏水量（L/s）	0.020	0.013	0.021
漏水量の誤差(%)	9.62	2.95	17.52

頭を H（m），初期のピエゾ水頭を H_0（m），水撃作用による最初の最大圧力を H_{max}（m）とした場合の無次元化圧力$(H-H_0)/(H_{max}-H_0)$で表示している。推定結果から漏水位置については，全ての条件で調査区間に対して 1%以下の良い精度で推定することができた。漏水量については，推定精度が実測値に対して 3%～20%とばらつきが大きい結果となったが，おおよその漏水量は見積もることができたといえる。

5. 漏水検知の検出限界を決める要因について

4 章では，漏水が検知できた結果だけを示したが，実際には小さな漏水の場合だと圧力波形から漏水を検知できないケースも数多く存在する。圧力波形から漏水が検知しやすい場合とは，漏水による圧力低下量 h_d が大きい場合である。ここで(11)式の両辺を A で割ると，(13)式が得られる。

$$\frac{aC_d}{A}=\frac{2g}{c}\frac{h_d}{\sqrt{2g(h_0+h_u-h_d)}-\sqrt{2gh_0}} \tag{13}$$

(13)式の左辺は管の断面積に対する漏水孔の大きさの割合を示し，圧力低下量 h_d に比例することを示している。また，(13)式の右辺に着目すると，波が通過したことによる圧力上昇量 h_u が大きいほど，圧力低下量 h_d が大きくなることがわかる。以上より，管の断面積に対する漏水の規模が大きく，また圧力上昇量 h_u が大きいほど，本手法は漏水検知に有効であることが理論的に示された。さらに本実験では，h_d が約 0.5 m の場合が漏水検知の限界であることが明らかになり，さらに小さな漏水を検知する場合には，前述のとおり，水撃作用による圧力上昇量 h_u を大きくする方法がある。しかしながら，圧力上昇量 h_u が大きすぎると管内が負圧になり水中分離を起こす可能性があり，この場合，管内の圧力波形は通常の水撃作用による圧力波形とは異なり，漏水位置，漏水量の特定自体が困難になる。よって，管内の圧力自体を高圧にするなど，管内が負圧にならないように圧力上昇量 h_u を大きくすることが必要である。

6. 圧力波形の減衰率と漏水位置との関係について

今までは，圧力波形の最初の波に着目して漏水位置と漏水量の推定を行ったが，本章では圧力波形の減衰と漏水位置との関係について述べる。Fig.6 に漏水がない場合と Fig.5 で示した漏水位置が上流端から 750.34m の位置にある場合と 150.34m の位置にある場合の圧力波形を示している。縦軸は Fig.5 と同様，無次元化圧力$(H-H_0)/(H_{max}-H_0)$で表示している。(8)式より，漏水部からの反射波 f_1 が観測点に到達することによって，漏水がある場合の方が漏水がない場合に比べて圧力波形の減衰が早く進む。実際に 750m 地点に漏水がある場合の圧力波形の方が漏水がない場合に比べて圧力波形の減衰が早いことが Fig.6 からわかる。しかしながら，漏水部が 150m 地点の場合の圧力波形は漏水部が 750m 地点の場合の圧力波形と比較して，実験条件における漏水の規模 aC_d/A，圧力低下量 h_d がほとんど同じであるにも関わらず，漏水がない場合の圧力波形と減衰が概ね同じであり，これは 150m 地点の漏水部が上流端から近いことが原因である

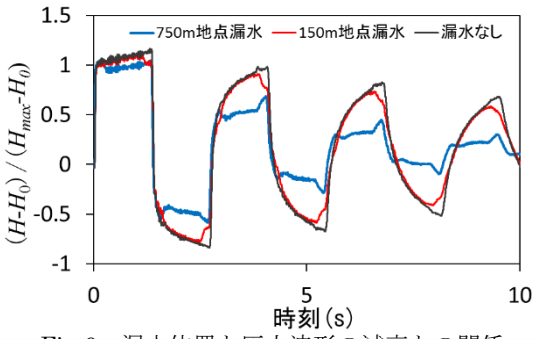


Fig.6 漏水位置と圧力波形の減衰との関係
Relationship between leakage location and pressure damping

と考えられる。Fig.6 の観測点での圧力波形からもわかるように，水撃作用が発生した直後では一瞬で圧力変化が完了するが，時間が経過するにつれて摩擦の影響により圧力変化が完了するまでの時間は長くなる。すなわち，漏水部が上流端に近い場合，上流端に向かう圧力波が漏水部に到達すると漏水部で圧力の変化が始まるが，圧力変化が完了しないうちに上流端からの逆の位相の反射波が漏水部に到達するので結果的に漏水部での圧力変化は小さくなる。圧力変化量が小さいと(9)式，(10)式より漏水量変化 ΔQ_{leak} も小さくなるので，(8)式より漏水部からの反射の大きさ f_1 も小さくなる。以上から，漏水部が上流端から 150.34m と近い場合，圧力波形の減衰は漏水部が中下流側にある場合よりも小さくなるということが示された。以上から，圧力波形の減衰を観測することによって漏水部のおおよその位置が判断できる場合があることが示唆されたが，漏水部の特定にまでは至っておらず，現段階で漏水部位置の特定を行う方法としては圧力波形の形で判断するのが有効であると思われる。一方で，観測点の圧力波形は漏水部からの反射波 f_1 が観測点を通過するたびに減衰するので，圧力波の管内の挙動を詳細に追うことで圧力波形の減衰から漏水量を推定することは可能である。具体的には数値計算シミュレーションにおいて，実測値と圧力波形の減衰が一番よく合うように逆解析をおこない漏水量を推定する方法が挙げられる。

7. 結論

本研究では，分岐を含む管水路内の圧力波の伝播特性に着目して，水撃作用による圧力波形から漏水位置，漏水量を推定する方法を導出し，実験により導出した推定手法の有効性が示された。また，本手法は漏水量ではなく，管断面積に対する漏水規模の大きさによって漏水検出の可否が決まり，より小さな漏水を検出する場合は流量を大きくして圧力上昇量 $\underline{h}_u$ を大きくする必要があることが理論的に示された。最後に圧力波形の減衰と漏水位置との関係について調査したところ，漏水部が上流端に近い場合は上流端からの反射波の影響により，圧力波形の減衰は漏水部が中下流側にある場合よりも小さくなることが明らかになった。以上を踏まえ，今後は漏水位置を最初の波以降の圧力波形の形から推定し，漏水量については数値計算シミュレーションを用いた逆解析によって推定していく予定である。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：JST）の一部として実施された。

参考文献

1) 農村振興局:「農業水利施設の機能保全の手引き」ーパイプライン編ーの策定について, pp.8-9, 2009.
2) 秋元徳三：水撃作用と圧力脈動〔改訂版〕，第 1 編「基礎式および諸定数」，pp.34-35，(財)電力中央研究所，2004.

ウルトラファインバブルによる赤土粒子の凝集・沈降の鈍化現象

Cohesion and sedimentation of red soil particles inactivated using ultrafine bubbles

○内藤和樹*・仲村渠将*・酒井一人*
○Kazuki NAITO*, Tamotsu NAKANDAKARI*, Kazuhito SAKAI*

1　はじめに

気泡界面には物質を吸着する性質がある。その性質は工学的に応用されて、液中に浮遊・溶解する鉱物粒子の回収、洗剤の回収およびタンパク質の精製などの操作で実用化されている。この場合、処理性能を高めるための界面活性物質の添加が不可欠である。下水や農地排水のように粘土粒子や不特定多様な無機溶存物質などで汚濁した水の浄化にはこの操作は不向きであることが知られているが、カゼインのようなタンパク質を有効成分とする界面活性物質を用いると処理性能が高まることが報告されている(鈴木・丸山、2002)。

このような浮上分離操作に使う浮力源としては気泡や油などが代表的であり、気泡を使う場合を特に泡沫分離操作という。本研究ではこの泡沫分離操作を土台とした赤土流出防止対策技術の開発を目標にして、まず初めにその基礎となる気泡と赤土粒子との相互作用を明らかにすることに取り組んでいる。赤土流出防止対策は天然の水環境に近いところで実施されるため、環境負荷低減の観点から界面活性物質を利用しないようにして泡沫分離操作を導入することが実用化に向けた要件となる。そこで本研究ではナノサイズの気泡であるウルトラファインバブルの性質に着目し、ウルトラファインバブルが浮力源になり得るかどうかについて試行錯誤的な実験を繰り返している。その結果、ウルトラファインバブルによって赤土粒子の凝集・沈降の進行が鈍化する現象が認められた。本発表ではこの現象を報告する。

2　材料および方法

2.1 赤土懸濁液の作成

材料は沖縄県うるま市の土取場（畑ではなく山の斜面）で採取した赤土（国頭マージ）である。この赤土を 75μm ふるいを用いて水中篩別（水道水を使用）し、その通過分に約6%の過酸化水素水を適量加え、110℃に調節した恒温乾燥炉の中に約 1 時間静置し、有機物を加熱分解させた。室温に戻した後、25μm ふるいを用いて水中篩別（純水を使用）し、その通過分を実験・観察に供試する赤土懸濁液とした。

2.2 沈降に伴う上澄み液の濁り変化と沈殿物の状態確認

300mL の有栓メスシリンダーを 2 本準備し、一方に純水 250mL、他方に空気のウルトラファインバブル水（以下「UFB 水」と略記、（株）ナノクス製）250mL を入れた。それぞれ（純水区と UFB 区）に赤土懸濁液を 2mL 注入し、ゆっくり反転振とうして赤土粒子を一様に拡散させた。それぞれを同時に静置し、1、5、10、15、30 分および 1～3 時間経過後に上澄み液の濁りと沈殿物の状態を目視で確認した後、デジタルカメラで静止画を撮影した。UFB 水のウルトラファインバブルの分布は出荷時に平均径 114.3nm、密度 2.32 億個/mL である.

* 琉球大学農学部　Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus

2.3 濁りの吸光度測定

上澄み液の濁りの経時変化を定量的に把握するため紫外可視分光光度計(日本分光株式会社 V-660)と積分球ユニット(同じく V-600-DS ISV-722)を用いて吸光度を測定した。三角フラスコを用いて 2.2 と同様の手順で 50.4mL のサンプルを作成し、ガラスセルに注入して静置させてから 1、10、20、30、40、50 および 60 分経過後に吸光度を測定した。

2.4 顕微鏡観察

2.3 の吸光度測定を終えた後、ガラスセルの中から上澄み液と沈殿を別々のガラス薄板に垂らして赤土粒子の状態を観察した。観察にはデジタルマイクロスコープ（株式会社キーエンス VHX-1000）を用い、100～1000 倍で観察した。

3　結果および考察

有栓メスシリンダーによる状態確認の結果、純水区よりも UFB 水区の方が上澄み液の濁りが強かった。また、純水区の沈殿は UFB 水区のそれよりも凝集が進行しており、フロックのサイズが大きかった。吸光度測定の結果を図 1 に示した。純水区、UFB 区ともにサンプル数 n=6 である。純水区、UFB 区ともに時間経過に伴い吸光度が減少することがわかる。赤土粒子が沈降することによって上澄み液の濁りが小さくなるためである。純水区と UFB 区の吸光度を経過時間別に比較すると、UFB 区のほうが大きいことがわかる。UFB 区のサンプルにはウルトラファインバブルが含まれており、その陰荷電とブラウン運動によって赤土粒子は沈降を妨げられたと考えられる。また、有栓メスシリンダーによる状態確認の結果を考慮すると、UFB 水区ではウルトラファインバブルが赤土粒子の凝集を抑制してフロックの成長が鈍くなったことで沈降速度が大きくならず、懸濁が長期化したと考えられる。さらに、赤土粒子表面の陽荷電部位に陰荷電を帯びたウルトラファインバブルが吸着して浮力が作用したために沈降しにくくなった可能性も考えられる。顕微鏡観察ではこれらの現象を支持する有意な結果は得られなかった。

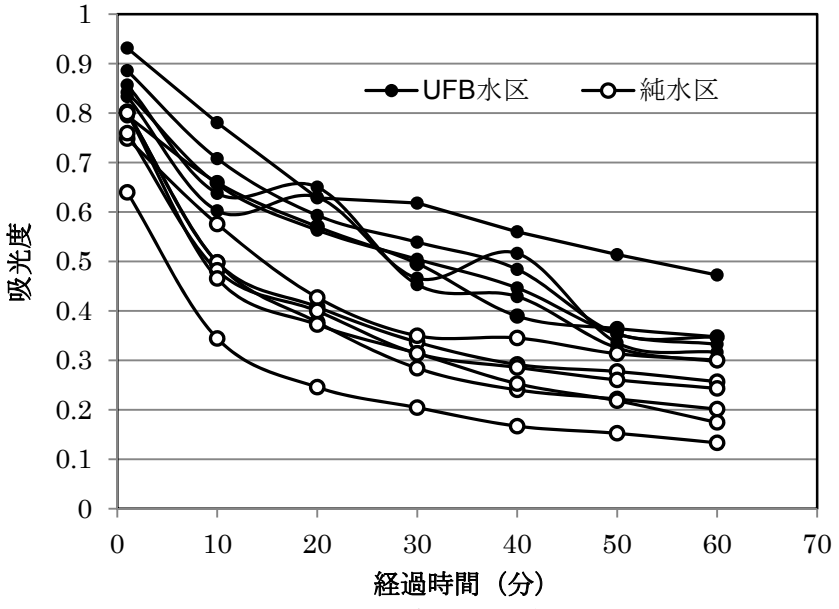


図 1：吸光度の経時変化

4　おわりに

ウルトラファインバブルが存在することで赤土粒子の凝集と沈降が進行しにくくなることが認められた。浮力の作用があったかどうかを明らかにするには顕微鏡の類を用いた観察が必須であり、今後の課題として各種の顕微鏡を網羅的に試す。

参考文献：カゼインと数種類の界面活性剤を用いた場合における凝集・泡沫分離法の処理性比較、鈴木祥広、丸山俊朗、水環境学会誌 25(8):477-483、2002.

公益法人農業農村工学会　応用水理研究部会

本研究部会は，応用水理に関する学理と応用についての科学的研究を推進し，農業農村工学分野の学術・技術の振興と社会の発展に寄与することを目的としています.

http://www.jsidre.or.jp/ouyousuiri/

事務局：岐阜市柳戸1-1
岐阜大学応用生物科学部水資源環境学研究室気付
応用水理研究部会事務局（部会長：平松　研）