

(5) 浮水性植物(ホテイアオイ)の流送 予測モデルの構築に関する研究

西田 渉^{1*}・鈴木 誠二²

¹長崎大学 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

²長崎大学 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

* E-mail: nisida@civil.nagasaki-u.ac.jp

水生植物には水質浄化等の水環境の改善効果が期待される一方で、過度な繁茂は環境管理に支障を生じる。長崎県東岸の諫早湾調整池では、2008(平成20)年に本明川の旧河口付近等において浮水性植物のホテイアオイが大繁茂した。外来種の一つであるこの植物の繁茂域の拡大は環境管理の面でも好ましくない。

本研究では、諫早湾調整池におけるホテイアオイの流送を予測するための数値モデルを構築した。ホテイアオイに関しては浮遊体要素として取り扱い、それらの相互作用の評価に個別要素法を適用した。続いて、構築した数値モデルを現地に適用し、洪水の発生前後におけるホテイアオイの移動過程と流達範囲を解析した。また他の手法との比較をとおして本手法の有効性について検討した。

Key Words : water hyacinth(*Eichhornia crassipes*), numerical simulation, distinct element method, Isahaya regulation pond

1. はじめに

水域の環境の管理において、水生植物には、魚介類をはじめとした生物の生息環境の創出、栄養塩類の吸収等による水質浄化作用、群落形成による護岸効果といった好ましい効果が期待され、積極的な利活用がなされている。一方で大規模な植物群落の形成は水辺の景観を損なうだけでなく、流水抵抗の増加や漁業活動への障害をもたらすおそれがあり、治水・利水・環境の各側面への影響に配慮した適正な管理も必要とされる。

ここで取り上げる諫早湾調整池は、2008(平成20)年に一級河川である本明川の延伸告示が出されたことで国土交通省によって管理されている。この水域では、本明川の旧河口周辺等において同年の夏から秋にかけて浮水性植物であるホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*)が大量繁茂した¹⁾。その総繁茂面積は2.4ha以上に達したとされ、同年11月初旬に国土交通省によって除去作業が行われた。写真-1は繁茂の一部を示したものである。この地点での個体はさほど大きくはないが、場所によっては草丈が1mを超す個体も存在していたとされる。ホテイアオイに関しては、栄養塩類や重金属の吸収能力が高いことに着目して水質の浄化や肥料等の産業資源に活用する取組み

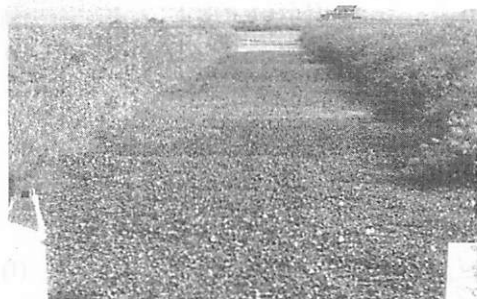


写真-1 沿岸部の繁茂状況(2008(平成20)年9月20日)

がこれまでになされてきているが^{2,3)}、身近に見られる植物ではあるものの、元々は南米を原産とした外来植物であり、その繁殖力の強さとアレロパシー作用による他の水生植物に与える影響から外来生物法において要注外来生物の一つに上げられている⁴⁾。ホテイアオイは熱帯植物であるために冬季にその多くは枯れるが、水温等の条件が揃うと越冬することが知られている。諫早湾調整池において株の残留等によって繁茂が繰り返される場合には、生態環境の変化や排水門からの堤外流出による水産活動への被害等が懸念される。

本研究では、ホテイアオイの流送モデルを構築し、洪水の流入や排水門操作等に伴う流れによる移動過程と流達範囲を予測することとした。ホテイアオイのモデル化にあたっては、その特性上、浮遊個体としての取り扱いが必要である。また、密生群落からの離脱時や流送時には接触した個体同士間に発生する作用力が無視できないと考え、この評価に個別要素法を適用することにした。ここに構築する流送モデルを著者らが開発してきている三次元流動評価モデルに導入、現地に適用し、洪水前後における浮水性植物の時空間分布予測を実施する。また、他の手法との比較をととしてモデル化の違いによる予測結果の変化について考察する。

2. モデルの概要

(1) 浮水植物のモデル化

浮水植物の流送は個別要素法^{5,6}を用いて次のとおりに表現する。

まず、個々の浮水植物を円柱型の個別要素として取り扱うこととし、また簡単のために水表面付近を水平方向に運動する物体として捉える。この要素に作用する外力として、流水ならびに風による抗力、要素の衝突によって生じる作用力を取り上げる。ただし回転運動に関しては、単独のホテイアオイにトルクを与えた実験において短時間の内に回転が停止する結果が得られたことを考慮して、要素の浸水面に生じる回転に抗する力(T_{ω})を導入している。今回の解析に用いた単一要素の並進運動と水平面内の回転運動に関する方程式は、以下のとおりである。

$$(\rho_p + \rho C_M) V_p \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_f \sqrt{(u-u_p)^2 + (v-v_p)^2} (u-u_p) + \frac{1}{2} C_{Dw} \rho A_w \sqrt{(w_x-u_p)^2 + (w_y-v_p)^2} (w_x-u_p) + F_x \quad (1)$$

$$(\rho_p + \rho C_M) V_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_f \sqrt{(u-u_p)^2 + (v-v_p)^2} (v-v_p) + \frac{1}{2} C_{Dw} \rho A_w \sqrt{(w_x-u_p)^2 + (w_y-v_p)^2} (w_y-v_p) + F_y \quad (2)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = T - T_{\omega} \quad (3)$$

ここに、 ρ : 流水ならびに浮水植物、大気密度、 C_M : 付加質量係数、 V_p : 要素の体積、 u_p, v_p : 要素のx, y軸方向の速さ、 C_{Df}, C_{Dw} : 流水ならびに風に対する抗力

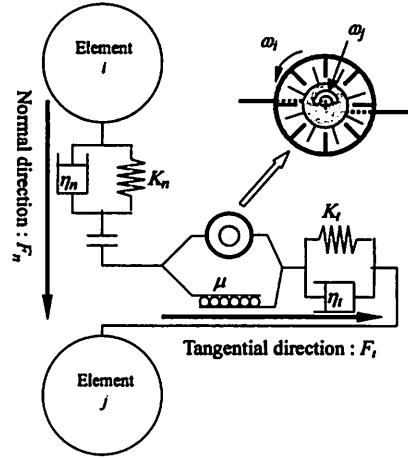


図-1 衝突要素間の作用力のモデル化

係数、 A_f, A_w : 要素の水面下ならびに水面上の水平投影面積、 u, v : 水表面付近におけるx, y軸方向の流速、 w_x, w_y : x, y軸方向の風速、 I_p, ω_p : 要素の慣性モーメントと角速度、 F_x, F_y, T : 要素の衝突によって生じるx, y軸方向の作用力とトルク、である。個々の要素の浸水面と水の間に生じる回転に抗する力について、ここでは発生する応力を要素の回転速度の関数として表現することとし、この応力を $f\rho(r\omega_p)^2$ (r : 回転軸からの距離) において浸水面での積分値として次のとおりに評価した。

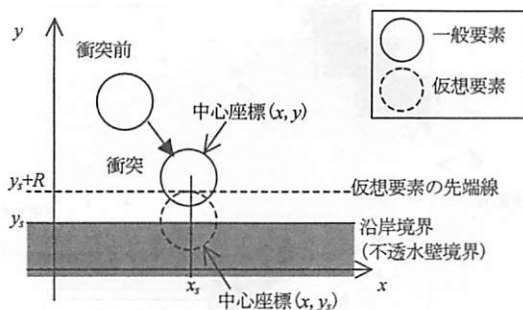
$$T_{\omega} = 2\pi f \rho R^4 (h_f + 0.2 \cdot R) |\omega_p| \omega_p \quad (4)$$

ここに、 f : 抵抗係数、 R : 要素の半径、 h_f : 水面から円柱下端までの深さ、である。要素の移動については、水深が h_f 以下の領域への移動は許さないものとする。また、流況の変化によって要素の位置する領域の水深が h_f 以下となった場合、水底に着底したものと同みなし、移動と回転が直ちに停止する条件を課した。要素に作用する風の影響について、河岸付近では河岸に繁茂するヨシ等によって遮蔽されるものとした。遮蔽の範囲は河岸からの距離(L_l)までとし、河岸に対して法線方向の風速を零とする。なお、 L_l は段落部における流速の分布を参考⁷に水面から遮蔽物の高さの6倍とした。

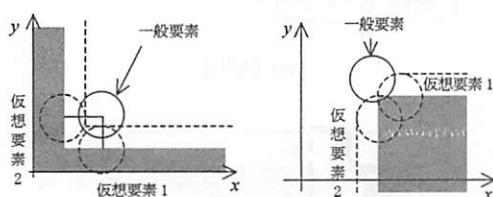
つぎに、要素の衝突判定と衝突要素間の作用力(F_x, F_y)については以下のとおりに評価する。要素iと他の要素jとの衝突は両要素の中心間距離に基づいて次式によって判定する。

$$L_{ij} \leq R_i + R_j \quad (5)$$

ここに、 R_i, R_j : 要素i, jの半径、 L_{ij} : 要素間の中心間距離、である。衝突状態にある要素iと要素jの間に発生する作用力は図-1に示すとおりに取り扱う。すなわち、要



(a) 座標軸に垂直な境界への衝突



(b) 角への衝突

図-2 河岸を表現する仮想要素の配置

素間の衝突における法線方向の作用力 (F_n) と接線方向の作用力 (F_t) をとりあげ、これらをそれぞれ一個の弾性スプリングと粘性ダッシュポットを並列結合したVoigt型の粘弾性体モデルとして表現する。これにより各作用力はHookeの法則ならびにNewtonの粘性則に従う抗力の和として表現される。ただし、接線方向の作用力に関しては、一般の粒状体の解析でなされるようにスライダーを配して滑り限界を与えるが、本研究では浮水植物を円柱要素としてモデル化するもの実際には放射状に伸びた匍枝の絡み合いが滑りに抗するものと想定し、滑りの停止条件を導入した。具体的には図-1の拡大図のように、衝突要素の匍枝の絡み合いを n 個の凸部を有するクラッチ機構として表し、計算時間間隔 (Δt_d) 内に要素 i と要素 j の回転軸のいずれかの凸部が他者のそれを追い越す場合には滑りが発生しないものとしている。

流水中を運動する要素は Δt_d 時間に非衝突態と衝突状態への変化を繰り返しており、スプリングとダッシュポットに発生する抗力の算定にあつては、それらの過大評価を防ぐために接触開始位置の適切な評価が不可欠である。ここでは後藤らの手法⁹⁾を採用し、 Δt_d 時間内の要素の移動は直線的であるものとして衝突開始位置を求め、衝突の法線方向と接線方向の相対変位増分を算定した。風の吹き寄せ等による河岸への衝突は図-2に示すとおりに河岸の接触位置に回転しない仮想要素を配置した上で、式(5)を用いて衝突を判定する。衝突が発生した場合には、要素間作用力を先述の評価方法と同一の手続きで処理した。なお、沿岸の角への衝突に関しては、図-2(b)のとおり二個の仮想要素との衝突として処理

する。要素の運動の計算にあたって、式(1)～(3)の運動方程式に予測・修正子法を適用し、離散方程式を誘導した。

(2) 流動予測モデル

浮水植物の流送予測では表層付近の流れの空間分布を適切に評価する必要がある。計算対象水域の諫早湾調整池は管理水位時の最大水深が3m程度の比較的浅い水域であるが、排水門操作時の底層部からの排水や風による鉛直循環流の形成が無視できないものと考えられるため、流れの解析手法として、著者らがこれまでに構築してきた三次元レベルモデルを用いることにした^{9,10)}。

本モデルにおいて流体運動の基礎方程式は連続方程式と運動方程式である。また、この計算では流体の密度を水温の関数として評価していることから、熱量の収支式も併せて取り上げた。ここで、表層での熱収支として短波放射、大気・水面からの長波放射、顕熱ならびに潜熱による熱輸送を考慮し、各々をKimらの式¹¹⁾を用いて評価している。なお、短波放射量に関しては、一部が表層で吸収され、残りが全層に対してLambert-Beer則に従って熱供給される。運動方程式中の渦動粘性係数は、Prandtlの混合距離モデルの形で評価するが、鉛直方向成分はMunk-Anderson型の評価式を導入し、成層の強さに応じた渦動粘性の抑制効果を考慮する。水底面での摩擦応力の評価にはManning則を適用する。各基礎方程式の離散化には陽形式の有限差分法を採用した。すなわち、時間軸方向の差分にはLeap-Frog法を適用し、また、空間方向の差分に関しては、差分格子にStaggered格子系を採用した上で移流項にDoner Cell法を、粘性項・拡散項に中央差分を適用している。

3. 計算条件

諫早湾調整池の概要は図-3のとおりである。空間差分間隔は水平方向に $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ である。鉛直方向については、基準面をT.P. -1.5mとした上で、それ以深を一様の層厚 ($\Delta z = 0.25\text{m}$) に分割した。中央干拓地前面に設置された潜堤の一部や北部承水路に点在するマウンドは不透水性のThin damとして計算条件に反映させている。時間差分間隔に関しては、流れの計算では計算結果の安定性を考慮して $\Delta t = 1.0\text{sec}$ とし、個別要素の計算においては $\Delta t_d = \Delta t / 20\text{sec}$ とした。流入河川として本明川をはじめとした13本の河川を取り上げ、各河川の河口に相当する格子に流量を横流入成分として与える。流動予測モデルに含まれるモデルパラメータに関しては、水平・鉛直方向の混合長に関する係数とManningの粗度係数を決定変数として大域的最適化手法により推定した。具体的には、

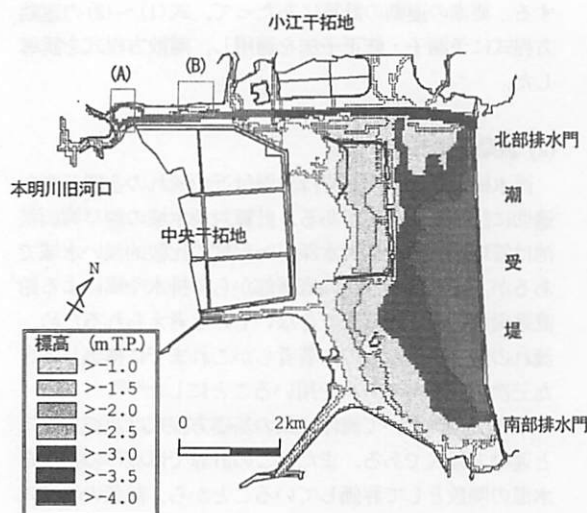


図-3 諫早湾調整池の概要図

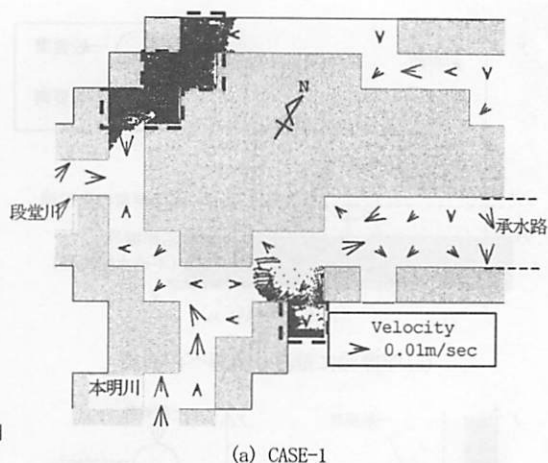
2002(平成14)年に実施された短期開門調査の報告値を検定データとし、ANNを援用したACCO手法¹⁰⁾を用いてパラメータ値の推定を行った。ただし、一回の流動シミュレーションに50分程度を要することから、この推定計算では水平方向の差分間隔を100mとしている。鉛直方向の計算設定条件は先と同じである。

つぎに浮水植物の流送予測の計算条件を述べる。計算対象期間は2008(平成21)年9月13日零時から16日19時までである。この期間の気象条件は気象庁による報告値とし¹¹⁾、全日射量、気温、湿度、風向風速等の時間変化を与えた。ここで、先述の計算期間には調整池流域で数回の降雨が観測されているため、短期開門調査結果を使って同定された流出関数法を用いて流出流量の時間変化を評価、各河川に流域面積に応じて配分している。また、調整池に流入した雨水は降雨終了から2時間後に排水門操作がなされ排水されるものとした。累積降雨が50mmを超える場合には排水を二度に分けている。浮水植物については、半径を1.5mとし、現地での密生が確認されている本明川の旧河道と承水路の側岸の一部(図-3の領域(A)(B))に静止状態で千鳥状に総数は7,001個を配置した。次章では本研究で提案する手法以外に水粒子追跡計算も実施し、浮水植物の取り扱いの違いによる影響を比較、検討する。なお、前者の計算をCASE-1とし、後者によるものをCASE-2と記す。

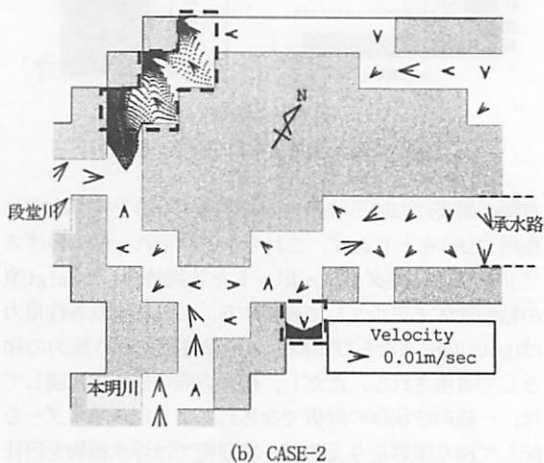
4. 流送予測計算の結果と考察

(1) 計算初期の移動分布

計算開始から6時間後の表層における流速ベクトルと要素の空間分布を示すと図-4のとおりである。図に示さ



(a) CASE-1



(b) CASE-2

図-4 本明川旧河口付近の流速ベクトルと要素の空間分布(破線部は計算初期の配置領域を示す)

れた領域は本明川の旧河口付近(図-3の領域(A))に相当する。この領域では二本の河川からの流入水による流れが発生するが、それまでの期間に降雨がなく各々の流量は基底流量程度であったことから流速は数cm/sec程である。流向は、河川からの流入水に加えて、水面上を吹く風の影響を受けた複雑な分布となっている。要素の分布に関しては、風が北北東から東南東の方角から吹いた風の作用力等によって初期の配置位置よりも西側の河岸に移動する傾向にある。ただし、二つの結果を比較すると、CASE-1では衝突した要素間に反発力が発生することで要素の移動が抑制されるのに対し、CASE-2では比較的速やかに移動を始めており、流向に応じて岸边付近に集積するように分布する。図の中央下部の初期配置領域ではその傾向が顕著であり、CASE-1においては東南東からの風等によって一部がこの領域外に移動し広がるように分布するが、CASE-2では全てが南東の岸边に集積する結果となる。

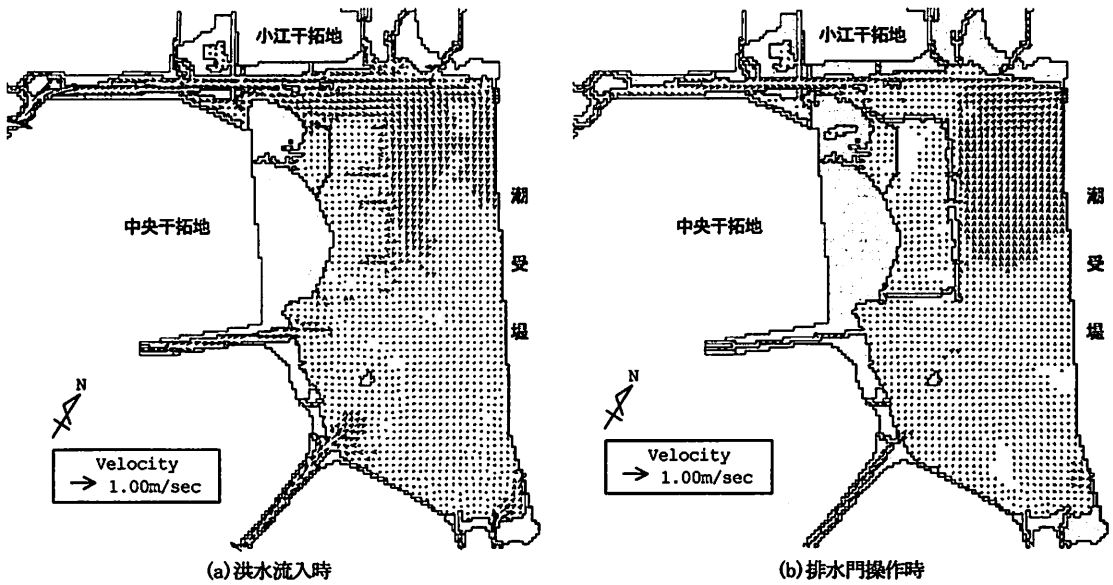


図-5 諫早湾調整池内の流速ベクトルの空間分布

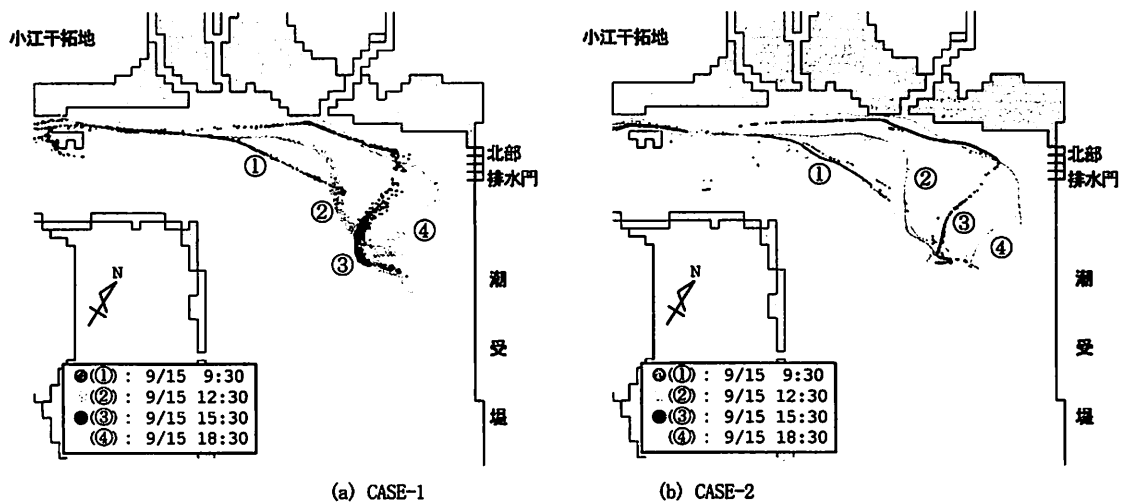


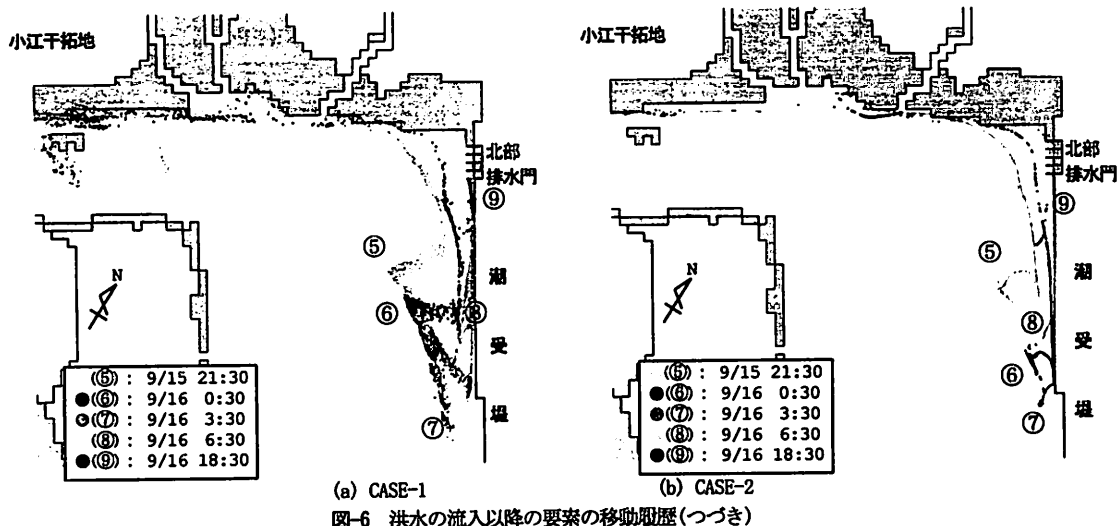
図-6 洪水の流入以降の要素の移動履歴

(2) 洪水流入に伴う流れと要素の分布

計算期間の9月15日には累積降雨量74mmがあり、この雨水の流出によって要素が大きく移動した。そこで、まず洪水の流入時ならびに排水門からの排水時における流れの様子を示しておく。

図-5(a)は洪水の流入時間中の計算結果である。図に示めされた時刻までの3時間に37mmの降雨が観測されている。調整池内では南部沿岸に流入する河川からの流出水によって生じる強い流れも見られるが、北部水域では主に流域面積の最も広い本明川からの雨水の流入に影響を受けた流れの分布となっており、河川水は中央干拓地前面に建設された潜堤を回りこむようにして中央部へと

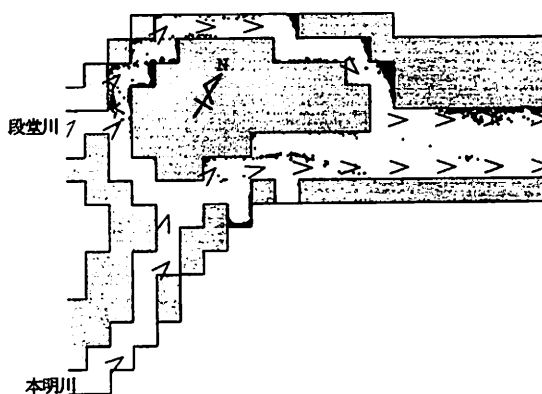
流入することが示されている。流速は本明川旧河口部で1m/sec以上、北部承水路の一部においても0.5m/sec以上となる。河川の流量が低減し始めると、北部水域の表層には時計回りの、南部にはそれとは逆向きの弱い水平環流が形成されるようになる。調整池の水位に関しては図に示された時刻にT.P.-0.88mまで上昇している。その後断続的な降雨があったために、水位上昇に伴って潜堤や沿岸の一部が水面下に没している。一方で、図-5(b)は排水門操作時における流速ベクトルの空間分布を示している。貯留水は北部排水門と南部排水門の底層から排水(計算モデルでは第8層から第11層)されるが、表層においてもこの排水操作によって両排水門方向へ向かう流れが発生することが分かる。流速は排水門幅の長い北部



排水路からの排水量が南部に比べて多いために、北部水域から北部排水路にかけて0.1～0.3m/secになることが示されている。この排水によって調整池の水位が管理水位まで下げられたことで、小江干拓地付近をはじめとする沿岸の一部が再度干出している。

つぎに、要素の空間分布について、洪水の流入開始以後の計算結果を示すと図-6のとおりである。図はこの領域に要素が流送され始めてから3時間毎の分布と計算終了時の分布を示している。灰色で着色された領域は計算終了時の干出地である。なお、計算結果によると、上流側に位置していた要素は降雨の流出開始から4時間半後に図の領域に到達し始めている。いずれの結果においても要素は各時刻に帯状に分布しており、洪水の流入によって発生した流れの時空間変化等に影響されながら潮受堤付近へ移動する。その後、図-5(b)に示された排水時に生じる流れに従って北部排水門付近へと流達し、同排水門の南端から潮受堤に沿って集積する。一方で、それぞれの時刻における分布帯の幅には二つの結果に差異があり、CASE-1の方がCASE-2よりも広い結果となっている。表示された期間には北東から北北東の風が吹いていたことから、CASE-1では要素衝突時の反発力と共に、風の直接的な作用力を受けて南西方向に広がったものと考えられる。CASE-2にはそうした力が考慮されていないことが理由の一つといえる。加えて、図-4に示されたように要素は洪水の流入までの間に極めて狭い間隔で汀線に沿って集積し、これらが洪水時に順次流し出される傾向にあったことも図の様な結果につながっている。

先述のとおり沿岸には降雨の流入によって一時的に浸水する領域があり、要素の一部は水位上昇時にそうした領域へ流送される。CASE-1の要素の中には、その移動速度に比べて排水による水位低下が速く、結果的に水底に



着底し、移動を停止するものが存在しており、今回の計算条件の場合、343個の要素が小江干拓地付近の干出部に残留する結果となった。CASE-2では計算終了までに要素の全てが小江干拓地から東側水域へと流下するが、CASE-1では図-7に示されるように本明川の旧河口周辺に留まるものがあり、この領域に2,482個が残っている。多くの要素は河川からの洪水の流入時に排水路に流送されるものの、その間の強い流れによって下流側格子の集積密度が高くなり、要素の移動を相互に阻害したことが理由と考えられる。当該地点付近では11月初旬においてもホテイアオイの大群落が観察されたことから、相当回数の洪水の流入があっても全ての個体が流出していたわけではないといえる。本モデルによって、こうした株の残留現象が表現されたものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、個別要素法を併用した浮水植物の流送モデルを構築し、これを陳早湾調整池におけるホテイアオイの流送予測に適用した。

対象とする植物を個別要素として取り扱ったことで、接触・衝突時の相互作用や沿岸への集積をより妥当な状態で表現することが可能になったものと考えられる。今回実施した二種類の計算結果から、流水や風による要素の移動が要素間作用力等によって制限されることが示されており、これによって洪水流入後の要素の移動範囲も変化することが明らかになった。また、排水時には水位の低下が比較的速いために、浅水域に位置していた要素の一部が干出部に取り残されることも示された。今後は、モデル化の妥当性の検討と予測精度の向上のためにホテイアオイの物性値や流水抵抗等に関する測定・室内実験を進めると共に、流送過程の現地実験との比較を行いたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、気象庁のホームページから公開されている気象観測データを利用させて頂いた。ここに記して深謝申し上げます。また、計算のとりまとめ等にご協力頂いた本学河川工学研究室の皆様感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝日新聞, 2008年11月9日
- 2) 岡本智伸, 柿田聖孝, 清水正元, 菊地正武: ホテイアオイの栽培と利用に関する研究, 九州東海大学紀要9, pp.45-52, 1990.
- 3) 石井猛: ホテイアオイは地球を救う, 内田老鶴圃, p.126, 1996.
- 4) 特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律に関わる要注外来生物リスト: 環境省自然保護局ホームページ資料
(URL <http://www.env.go.jp/nature/intro/index.html>)
- 5) 粒状体力学に関する国内委員会: 粒状体の力学, 土質工学会, pp.283-286, 1993.
- 6) 後藤仁志, 酒井哲郎: 表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.101-112, 1995.
- 7) 椿東一郎: 水理学 I, 森北出版, p.103-105, 1990.
- 8) 後藤仁志, 辻本哲郎, 中川博次: 掃流粒子群の流動過程に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.75-83, 1994.
- 9) 西田渉, 野口正人, Dimitri P. Solomatine: 気象予報情報の潮流予測への適用に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.1279-1284, 2005.
- 10) 西田渉, Dimitri P. Solomatine, 野口正人, 鈴木誠二: ANNを誤差評価手法としたACCOによる数値モデルのパラメータ推定に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.1411-1416, 2008.
- 11) Kim, K.S. and Chapra, S.C.: Temperature model for highly transient shallow streams, *J. of Hyd. Engg. ASCE*, pp.30-40, 1997.
- 12) 気象庁ホームページ資料
(URL <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

(2009. 5. 22受付)

Development and Application of Free-Floating Plant (Water Hyacinth) Transportation Model

Wataru NISHIDA¹, and Seiji SUZUKI¹

¹Dept. of Civil Engineering, Nagasaki University

Aquatic plants are being utilized for purposes of water quality purification, re-creation of natural habitat, and so on. On the other hand, the unintended overgrowth yields several kinds of problems to water environment management. In 2008, water hyacinth flourished at Isahaya regulation pond. This plant is listed in one of the invasive alien species in Japan and is strongly influential to native aquatic ecosystem. Thus, effective countermeasures must be taken a shape to prevent expansion of its habitat.

In this study, firstly, numerical simulation model using the distinct element method was developed to predict transportation of water hyacinth. Following, developed model was applied to Isahaya regulation pond, and transportation processes of free-floating plants under the flood event were simulated. Furthermore, applicability of proposed model was discussed through comparing the results obtained from other modeling method.