

諫早湾調整池におけるホテイアオイの 流動予測に関する研究

NUMERICAL SIMULATION ON WATER HYACINTH
TRANSPORTATION IN ISAHAYA REGULATION POND

西田 渉¹・鈴木 誠二²・岡林 隆敏³

Wataru NISHIDA, Seiji SUZUKI and Takatoshi OKABAYASHI

¹正会員 博(工) 長崎大学准教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

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

³正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

Aquatic plants are one of the main factors compose water environment, and adequate conservation works are required to maintain their growth condition at water area. On the other hand, unintended overgrowth yields several kinds of problems to water management. In 2008, water hyacinth intensively thrived at Isahaya flood regulation pond. This plant is listed in one of the invasive alien species in Japan. To prevent expansion of its habitat at this pond, effective countermeasures must be taken as soon as possible. In this study, numerical simulation model was developed to predict transportation processes of water hyacinth in this regulation pond. In modelling on water hyacinth, each plant was treated as columnar floating element, and interacting forces caused by collision of each other were calculated using the distinct element method. Developed model was applied to Isahaya regulation pond, and transportation processes of free-floating plants under the flood event were simulated.

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

1. はじめに

水生植物は生物の生息環境を構成する重要な因子の一つであり、水辺において豊かな生態系を維持するために適正な保全と管理が必要である。ここで取り上げるホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*)は、ミズアオイ科の浮水性植物であり、ため池や沼等の水辺で目にする比較的身近な植物である。また、増殖力が強く、その生長過程において水中の栄養塩類を直接的に摂取することに着目して、水域の水質浄化への利用に関する検討がこれまでに進められてきている^{1), 2)}。一方で、ホテイアオイは南米を原産とする植物であり、その繁茂は水中の物質循環に影響を与え³⁾、植物プランクトン等にアレロパシー作用を有すること⁴⁾、から在来種の生息環境に影響を与えることが指摘されており、わが国の外来生物法の中で要注意外来生物の一種に上げられている⁵⁾。また、生育条件が揃うと大規模群落を形成することから、水域の水利用が物理的に阻害される。2008(平成20)年には、旧吉野川河口堰

付近においてホテイアオイ等が大量繁殖したとされる⁶⁾。同年、長崎県の本明川旧河口周辺でも大発生が起きており、諫早湾調整池の排水門操作に支障をきたす恐れがあることから国土交通省によって除去作業がなされた⁷⁾。原因は夏季に気温が高く、少雨であったためとみられている。本年(2009(平成21)年)には本明川旧河口部においてホテイアオイの繁殖は観察されなかったが、環境条件が整うと再び大発生することが予想されるため、今後も継続的な注意が必要とされる。

ホテイアオイは浮水性の植物であり、その生息位置は水域の流況に応じて変化するものと考えられる。諫早湾調整池においては、排水門操作と共に、堤外への流出による水産活動への影響を防止するために、貯流水の流動による浮遊範囲の変化を把握しておく必要がある。そこで本研究では、これまでに開発を試みてきているホテイアオイの相互作用の表現に個別要素法を適用した数値シミュレーションモデル⁸⁾を用いて、諫早湾調整池を対象に河川からの洪水の流入に伴う移動過程と流達範囲を予測・評価した。なお、ここでは、ホテイアオイの実体計

測・室内実験によって物理量の定量化に努めると共に、要素 - 流水間の相互作用を再構成することでモデル表現の妥当性向上を行っている。

2. 流動予測モデル

(1) ホテアオイの流動モデル

ホテアオイの運動の定式化にあたり、個体を仮想的に円柱状の浮体要素とし、簡単のために水平面内の並進と回転の各運動のみを取り上げる。ここでは、これまでのモデルに流水の加速ならびに水面勾配による作用力を付加することで、並進運動に関しては、中川ら⁹⁾が流木の流動解析に適用した運動方程式と同様の形式となる。ただし、ホテアオイの密生群落からの離脱や流送過程においては、以前に行った粒子追跡モデルとの比較結果から⁸⁾、個体同士の接触や接岸の際に生じる作用力を考慮する必要があると考えており、これらの作用力を各運動方程式に導入している。今回の解析に用いたホテアオイを表現する要素の運動方程式は、以下のとおりである。

$$(m_p + m_f C_M) \frac{du_p}{dt} = m_f (I + C_M) \frac{du}{dt} - m_p g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_f \sqrt{(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2} (u - u_p) + \frac{1}{2} C_{Dw} \rho_a A_w \sqrt{(w_x - u_p)^2 + (w_y - v_p)^2} (w_x - u_p) + F_x \quad (1)$$

$$(m_p + m_f C_M) \frac{dv_p}{dt} = m_f (I + C_M) \frac{dv}{dt} - m_p g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_f \sqrt{(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2} (v - v_p) + \frac{1}{2} C_{Dw} \rho_a A_w \sqrt{(w_x - u_p)^2 + (w_y - v_p)^2} (w_y - v_p) + F_y \quad (2)$$

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

ここに、 m_p ：要素の質量、 m_f ：要素の排水体積に相当する水の質量、 ρ ：流水の密度、 ρ_a ：大気密度、 C_M ：付加質量係数、 V 、 V_f ：要素の全体積と水面下の体積、 u_p 、 v_p ：要素の x 、 y 軸方向の速さ、 g ：重力加速度、 H ：水位、 C_{Df} 、 C_{Dw} ：流水ならびに風による抗力係数、 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。回転運動に関しては、単独のホテ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したことを考慮して、要素の浸水面に生じる水と要素間に生じる回転に抗する力(T_{sf})を導入している。ここでは、

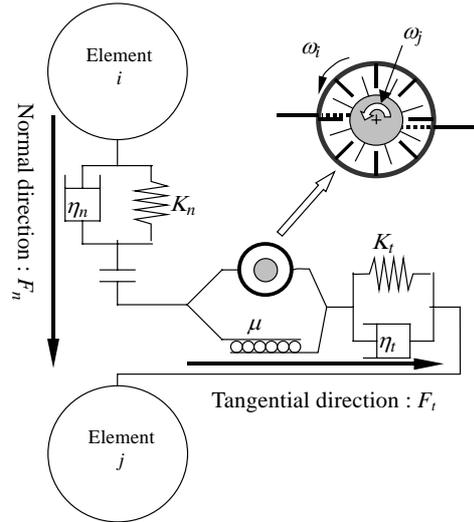


図-1 衝突要素間の作用力のモデル化

この応力を要素の角速度の関数として $f\alpha(r\omega_p)^2$ (f ：抵抗係数、 r ：回転軸からの距離)とおき、浸水面での積分値として評価している。

$$T_{sf} = 2\pi f \rho R^4 (h_f + \frac{1}{5}R) |\omega_p| \omega_p \quad (4)$$

ここに、 R ：要素の半径、 h_f ：水面から円柱下端までの深さ、である。要素の移動に関して、水深 h_f を移動限界水深とし、要素の位置する領域の水深がこれより浅くなった場合に要素が水底に着底したものとみなし、直ちに運動を停止するものとしている。

(2) 要素の衝突による作用力

ホテアオイの個体同士の衝突や接岸の際に生じる作用力に個別要素法^{10),11)}を適用し、粘弾性体モデルとして評価する。なお、粘弾性体モデルには幾つかの表現形式があるが¹²⁾、後述の解析では水の流れや風による外力で生じる衝突であり、離散後の個体に永久変形は残らないものとする。そこで、衝突面における法線方向成分(F_n)と接線方向成分(F_t)の作用力を図-1に示すVoigt型モデルで表現する。接線方向の作用力に関しては、この種のモデルで一般に導入されているように、スライダーを配して滑り限界を与える。ただし、ホテアオイを円柱要素とみなすが、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し、拡大図に示すように、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、個別要素の計算時間間隔(Δt_d)内に衝突要素のいずれかの凸部が他者のそれを追いつき越す場合に滑りを生じないものとしている。要素の衝突開始位置の評価については、後藤らの手法¹³⁾を参考に、要素は Δt_d 時間内に直線的に移動するものとして接触位置を求め、衝突からの法線・接線方向の相対変位の増分を算定した。河岸には回転しない固定要素を連続的に配置し、接岸時の河岸からの作用力を先述の方法と同様の方法で処理している。運動方程式は予測子・修正子法で離散化している。

今回のシミュレーションでは、第3章に記すように、2万個を超える要素を解析対象としており、個別要素の中心間距離に基づく接触判定と作用力の算出にかなりの計算負荷がかかっており、流れの計算のみの計算時間の約187倍となる。そのため、これらの処理に関して、接触判定用に水平差分間隔の1/10サイズの格子を設定することで粗視スケールでの接触判定スクリーニング手法を従来の計算フローに導入すると共に、3ノードのPCクラスを新たに構成、並列計算を行わせることで計算時間を短縮させている。

(3) 流れの評価モデル

諫早湾調整池の流れの解析について、今回の計算は短期的な流動予測であり、水の流動には洪水流の影響が強いと思われる。一方で、洪水低減時や排水門操作後には、風による流れの形成も少なからず影響をするものとする。そこで、著者がこれまで構築してきた三次元レベルモデルを用いる^{14),15)}。

このモデルの基礎方程式は連続方程式と運動方程式であり、また、流体の密度を水温の関数としていることから、熱量の収支式も基礎式として取り上げられている。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、顕熱と潜熱による熱輸送を考慮し、Kimらの式¹⁶⁾で評価する。短波放射量は表層での一部吸収と、Lambert-Beer則に従う各層への供給とする。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を考慮する。水底面の摩擦応力の評価にはManning則を適用する。水表面では風による摩擦応力と、ホテイアオイが存在する場所ではこの影響を考慮する。今回のモデルでは、中川らの流木群の解析手法と同様に浮体への流体力の反作用力として流水に作用するものとしている。流体運動の各基礎方程式は陽形式の有限差分法を適用して離散化している。

3. ホテイアオイの計測と計算条件

(1) ホテイアオイの測定

ホテイアオイの計算に必要な基礎データを得るために、2009(平成21)年8月28日に長崎県内の農業用水路で採取した個体を対象に計測を行った。

まず、形状計測の個体数は、全採取数17個の内、浮器や葉柄の欠如のない15個体とした。個体の状況に関しては、6個体のみが匍枝を有しており、水平方向成長の初期段階の株を取り上げたと判断している。計測された湿潤重量と実体積から算定された平均密度は 0.421g/cm^3 (最大: 0.852g/cm^3 , 最小: 0.140g/cm^3)であった。図-2,3は、湿潤重量と水平投影面積ならびに換算半径との関係を示したものである。投影面積は、実験水槽で浮水状態の個体

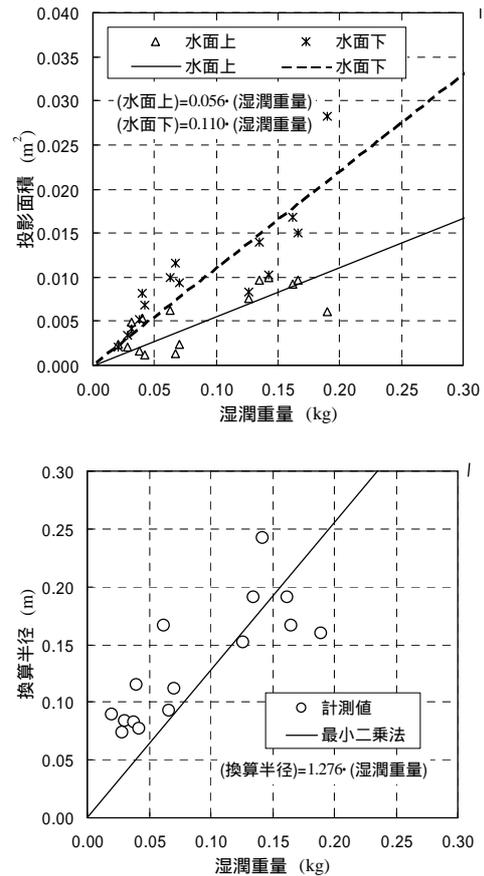


図-2 湿潤重量と投影面積，換算半径の計測結果

を側面から撮影した写真を画像処理して植物体の占める画素数を求め、写真の画素数と実際の撮影面積との関係から算定している。また、換算半径は、上面から撮影した個体形状を楕円形とみなし、長径と短径を計測して面積を求め、これと等価な面積の円として半径を算出している。この計測結果から、湿潤重量が増すにつれて水面上・下の投影面積は増加する。換算半径についても同様である。ここで、投影面積に関しては、水面下の面積の割合が高い個体が多かった。ホテイアオイは水面上の密生の度合いが高いと採光のために葉柄が立ち上がる傾向にあるが、今回の個体は、現地で密生していなかったこと、また、8月末に採取した個体であったが花茎が伸びていなかったこと等が影響したものと考えられる。

つぎに、抵抗係数の計測については、室内直線水路において流速の異なる定常状態での実験を行い、ホテイアオイの流下速度や流速等の計測値から並進運動の運動方程式を用いて算定した。なお、測定時のRe数(=Ud/v: 流下速度と流水との速度差, d: 水面下の投影面積の1/2乗値)は1,340~6,610の範囲である。求められた抵抗係数の平均値は0.247 (最大:0.571, 最小:0.12)であった。上記のRe数の範囲において、例えば球体のような典型的な定型の物体では、ほぼ一定値となることが知られているが¹⁷⁾、今回の測定結果には、ばらつきが現れており、ホテイアオイの流下時に水面下の根毛がなびくように変形

し、結果的に各実験条件下において投影面積が変化したことが影響したと考えている。現段階では、この定量化には至っておらず、今後の課題として残されている。

(2) モデル設定

a) 流れの計算条件

計算対象水域である諫早湾調整池の概要は図-3のとおりである。計算では、この領域を水平方向に一定の差分間隔 $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ で分割している。鉛直方向には、とくに排水時の水門付近における水位低下を考慮して、表層をT.P.-1.5m以下(管理水位T.P.-1mで層厚0.5m)とし、それ以下の層厚を $\Delta z = 0.25\text{m}$ とした。調整池内の潜堤や細長いマウンドは不透水性の薄壁として取り扱っている。時間差分間隔について、流れの計算では $\Delta t = 1.0\text{s}$ とした。個別要素の計算は $\Delta t_d = \Delta t / 40\text{s}$ とし、流れの計算と並行して計算させている。なお、流動モデルのモデルパラメータは、流速の実測値が得られなかったことから、短期開門調査の報告値を対象にANNを援用したACCOによる最適化手法を用いて推定された値¹⁵⁾を用いた。気象条件は2009(平成21)年6月10日零時から12日零時までの気象庁による報告値¹⁸⁾とし、全天日射量と気温、湿度は長崎観測所、降雨は諫早観測所、風向風速は数値予報値による時間変化を与えた。この期間の降雨の流出については、短期開門調査の報告値を使って同定した流出関数法を用いて総流出流量の時間変化を評価し、13本の河川の河口に相当する格子に流域面積に応じて流量を配分した。調整池からの雨水排水は降雨終了から2時間後に始まるものと仮定し、排水時間は、短期開門調査結果を参考に2時間かけて行われるものとした。

b) ホテイアオイの設定条件

ホテイアオイ要素の大きさについて、本明川旧河口部で大繁殖した際には草丈が1mを超す個体も存在していたとされ、比較的大きく生長した状態で密生していたようである。本シミュレーションでは、この状況を考慮して要素の半径を $R = 0.40\text{m}$ とした。水平投影面積等については、植物体の部位の組成割合が生長に応じて変化することが示されており¹⁹⁾、今回の場合、大型の個体に関するデータ不足が指摘されるが、ここでは、図-2に併記した回帰式を拡張利用して設定半径に対する各値を算定した。要素は、当時、現地での密生が確認された本明川旧河口から伸びた滞筋と側岸部に24,867個を静止状態で千鳥状に配した。具体的な設定位置は図-5(a)のとおりであり、同図の領域(A)-1,2には、1計算格子あたり61行62列で配置することを基本的とし、それぞれ18,695個、3,692個を配置した。領域(b)では、北岸に沿って帯状に分布しているものとして(幅4.4m、長さ398.8m)、2,480個の要素を配置した。要素位置における流速は、流れのモデルの計算値を双一次内挿し、評価している。

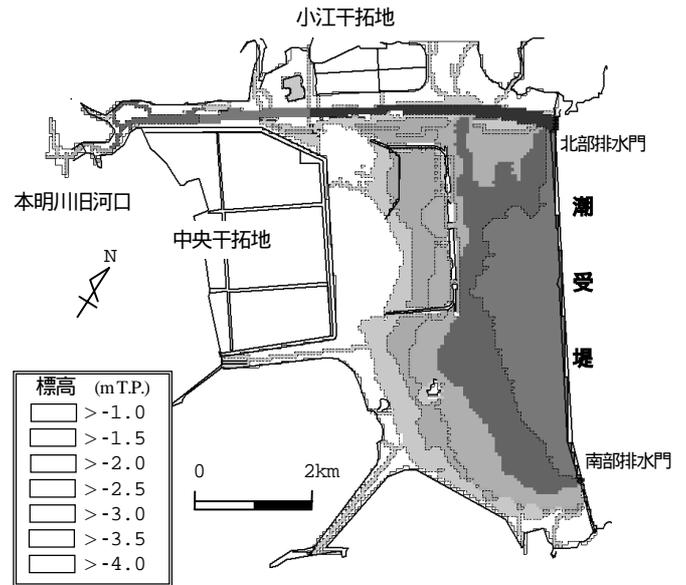


図-3 諫早湾調整池の概要図

4. 流動予測結果

(1) 流速ベクトルの空間分布

先述の計算条件から求められた諫早調整池内の表層における流速ベクトルの空間分布を先に示しておく。

図-4(a)は、洪水の流入時間中の結果であり、この時刻までに46mmの降雨が観測されている。洪水の流入によって各河川の河口部付近で速い流れが現れる。北部水域では、流域面積の最も広い本明川からの流入に影響を受けた流速ベクトルの分布となっており、本明川からの河川水は北部捷水路を0.3~0.45m/s程度の流速で流下する。計算結果によると、この流れは小江干拓地から潮受堤までの区間において、北岸にある別の河川からの洪水流によって流向を変えており、調整池の中央部へ向うようになる。南部沿岸でも河川からの流入水によって強い流れが発生するが、調整池に達した河川水は沿岸部を反時計回りに流れ、潮受堤へ達するようである。この後の継続的な洪水の流入に伴う水位の上昇によって、沿岸の一部が水面下に没しており、その最大面積は1.275km²と算定された。

一方で、排水門からの貯留水の排水がなされている時間中の流速ベクトルの空間分布は図-4(b)のとおりである。計算では、排水量を北部・南部排水門の排水門全長に応じて配分し、それぞれの底層部(短期開門調査時の実績を参考に第8層以深の4層)から排水するものと設定しているが、表層においても排水操作に影響を受けた流れが現れることが示されている。計算では、排水門幅の長い北部排水門から総排水量の8割を排水させている。そのため、北部水域での流速が比較的速く、また、調整池の中央部以北での流れは、潜堤の内側域を除いて北部排水門方向へ向うように分布している。この分布図は、

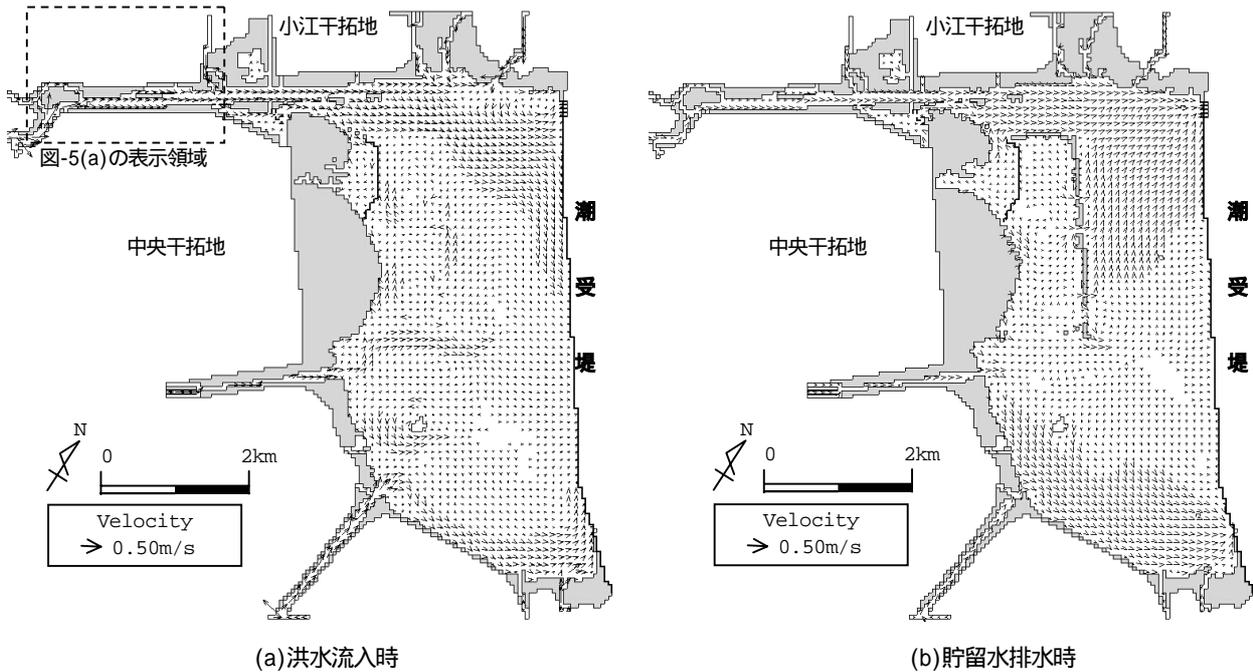


図-4 諫早湾調整池の表層における流速ベクトルの空間分布

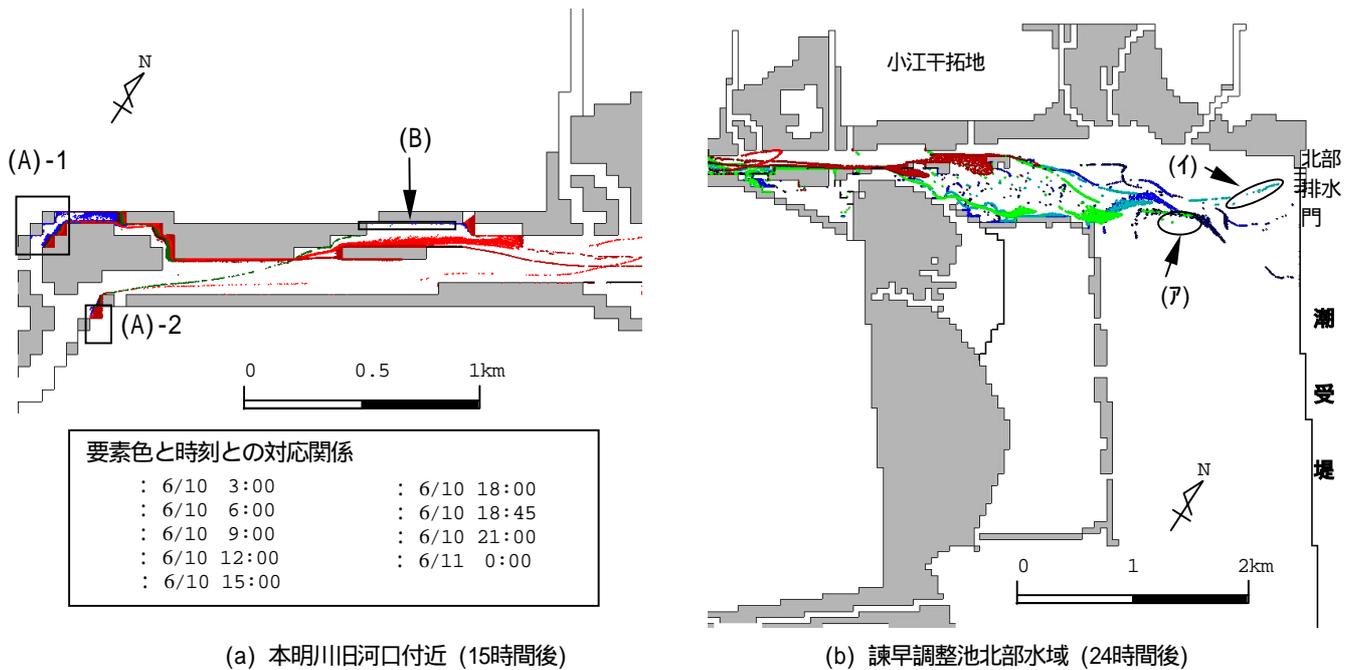


図-5 要素の時空間分布

貯留水の排水開始から1時間後の計算結果であるが、同時点において、中央干拓地前面の潜堤や沿岸の一部が干出し始めていることが分かる。排水操作の終了時には、水位が管理水位まで下げられたことで、洪水の流入以前と同等の内水面面積に戻っている。

(2) 要素の移動分布

要素の空間分布について、計算開始以降の移動状況を示すと図-5(a)(b)のとおりであり、それぞれ15時間後ならびに24時間経過後の要素の位置を表示している。なお、図において灰色で着色された領域は、各表示時刻におけ

る干出地の範囲を表している。

シミュレーション結果によると、要素は計算開始後に比較的速やかに移動し始めるものの、本明川旧河口付近の図に示されるように、それらの多くは、洪水流等による作用力を受けて、一度、河岸に集積する。その後、これら集積域を離脱した要素が断続的に北部捷水路に流出し、個々の要素が帯状に分布しながら、下流側へと流送されるようである。今回の条件では、計算開始から12時間後には小江干拓地の前面付近に到達してきている。

さらに潮受堤方向に流下した要素は、図-4(a)に示された流れに影響されながら調整池の中央部側へと移動し

続け、排水門の操作直前には、一部の要素が潮受堤から887.6mの地点まで達している。排水時間中には、北部排水門へ向う発達した流れが現れるために、多くの要素が同排水門方向に移動することになる。その内、計算開始から18時間後に図-5(b)の領域(ア)に分布していた29個の要素は、排水中に同図の領域(イ)に流送され、最終的に北部排水門へと到達している。排水操作の終了以降に関しては、排水門に直接到達する要素はなかったが、潮受堤に沿って南下する流れが継続的に現れていたこともあって、計算終了までに、さらに11個の要素が潮受堤に到達する結果となった。

以上のとおり多くの要素は、洪水の流入と排水門操作によって生じた流れや風による作用力を受けて、潮受堤方向へと流送される。その一方で、計算終了時においても本明川旧河口付近に初期配置総数の一割程度に相当する2,881個の要素が残留している。これは、洪水流入時の河岸への集積によって要素の移動が相互に阻害されたために、主たる流水部である北部捷水路への流出が遅れたこと、また、洪水低減期以降には、排水時においても同領域での流れが洪水流入期ほどには発達しなかったことが主な理由として上げられる。

5. おわりに

本研究では、諫早湾調整池におけるホテイアオイの流動予測手法の構築を目指して、浮水性植物を個別要素とした流動モデルを再構成すると共に、実体計測と室内実験の結果等を用いて、当該水域への洪水の流入から排水終了までの間の移動過程と流達範囲を予測・評価した。

今回適用した計算条件下では、洪水の流入に伴って多数の要素が下流側に流下し、続いてなされた排水門操作等による流れによって、北部排水門や潮受堤にその一部が到達することが予測された。その一方で、計算の終了時においても本明川旧河口付近に残留する要素もあり、調整池の北部水域の広い範囲にわたって分布することが示された。また、再構成された個別要素法による流動モデルを用いたことで、集積域からの離脱や再集積の範囲の評価がより妥当な形式で予測されたものと考えている。

今後は、ホテイアオイの物理的性状や流水抵抗等に関する室内実験をさらに進めると共に、流送過程の現地実験と計算結果との比較をとおして、モデル化の妥当性について検討を重ねたい。ホテイアオイの水環境に与える影響は、その生長サイクルに対応した長期的予測手法が必要である。現段階では、そうした期間には対応されおらず、長期予測手法の検討も併せて行いたい。

謝辞：研究の遂行するにあたり、ホテイアオイの採取、室内実験等にご協力頂いた長崎大学工学部技術職員の一

ノ瀬和雄氏、また、学部4年生の濱野太徳氏、溝口博紀氏をはじめとする本学河川工学研究室の皆様様に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岡本智伸, 桜田聖孝, 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.
- 2) 石井猛: ホテイアオイは地球を救う, 内田老鶴圃, p.126, 1996.
- 3) Wittenberg,R. and Cock,M.J.W.: Invasive alien species, Toolkit of best prevention and management practices,GISP,IUCN, p.228. 2001.
- 4) 楠本勝子, 久場隆広, 楠田哲也: ホテイアオイ及びシロコガヤツリの持つ*Microcystis aeruginosa* に対するアレロパシー的増殖抑制効果の検証, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, VII-207, pp.413-414, 2002.
- 5) 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意外来生物リスト: 環境省自然保護局ホームページ資料(<http://www.env.go.jp/nature/intro/index.html>)
- 6) 朝日新聞 2008年10月20日
- 7) 朝日新聞 2008年11月8日
- 8) 西田渉, 鈴木誠二: 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, 環境工学研究論文集, 第46巻, pp.39-45, 2009.
- 9) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹: 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp.543-550, 1994.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 土質工学会: 岩の工学的性質と設計・施工への応用土質工学会, pp.208-219, 1974.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Kim, K.S, and Chapra, S.C.: Temperature model for highly transient shallow streams, *J. of Hyd., ASCE*, Vol.23, No.1, pp.30-40, 1997.
- 17) 椿東一郎: 水理学, 森北出版, pp.52-58, 1985.
- 18) 気象庁ホームページ資料(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 19) 岡本智伸, 桜田聖孝: 阿蘇地方におけるホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*)の個体群生長および化学成分組成, 水環境学会誌, 第24巻, 第10号, pp.673-679, 2001.

(2009.9.30受付)