

海岸に漂着する流木群の挙動解析

目黒邦夫¹・佐藤慎司²・鯉淵幸生³

台風などの大雨の際に、土砂災害等が原因で大量の流木群が発生し、河川を経由して海岸に漂着するといった災害が増加している。この被害としては地方自治体の財政圧迫、港湾施設の機能低下、船舶の破壊、漁場や養殖場への悪影響などがあり、早急な対策が望まれているが、システム的な対応がとられていないため、現状では全体的な被害状況さえ把握することが困難である。そこで本研究では、台風 0421 号により伊勢湾に大量の流木群が漂着した問題を取り上げ、まずは現地調査により全体的な被害状況の把握を行なった。そして、その結果を基に数値計算による流木群の挙動再現を行ない、数値実験により流木群の漂着要因を明らかにした。

1. はじめに

近年、山林の荒廃が急速に進んでおり、台風などの大雨の際に、土砂災害等が頻繁に起こるようになった。それに伴い発生した流木群が河川に流れ、海岸にまで漂着するといった被害も増加している。国土交通省に処理対策申請があっただけでも、2004 年は 4 件、2005 年は 2 件の大規模な被害報告があった。この被害としては、地方自治体の財政圧迫、港湾施設の機能低下、船舶の破壊、漁場や養殖場への悪影響などがあり、早急な対策が望まれている。しかし、海岸や港湾施設は様々な管轄に別れており、被害調査も各地方自治体によって断片的に行われているためシステム的な対応がとられていない。そのため、現状では全体的な被害状況さえ把握することが困難である。

そこで本研究では、2004 年の台風 21 号により伊勢湾に大量の流木群が漂着した問題を取り上げ、まずは現地調査により全体的な被害状況の把握を行なった。その結果を基にモデルを構築し、数値計算による流木群の挙動の解明を目的とした。

2. 現地調査の概要

2004 年台風 21 号の影響により三重県では多くの土砂災害が発生し、それに伴い大量の流木群が河川に流れ込み、伊勢湾に流出した。流出した流木群は、三重県海岸だけでなく、愛知県海岸にも漂着し、特に愛知県美浜町、南知多町では過去最大級の流木群が漂着したとされる新聞報道もあった。また、この流木群の漂着が原因で、名産のノリの養殖への悪影響や、港湾や船舶の使用が不可能になるなどの被害があった。しかし、この流木群はいつ、どこから、どのように漂着したかという被害の全体

的な構造は分かっていない。

そこで現地調査では、まず各地方自治体の協力を得ながら情報を集め、流木群がどこに、どれだけ漂着したのか等の被害状況を整理した。そして、これにより分かった図-1 に示す特に被害の大きかった三重県伊勢市、鳥羽市、三雲町、香良洲町と宮川河岸、愛知県知多半島的美浜町、南知多町の海岸を実際に調査し、さらには各地方自治体に電子メール・電話によるヒアリングを行い、流木群の特徴を調査することで、その流木群の発生源を推定した。ちなみに、漂着量の計測は各地方自治体が写真-1 のような計測を実施し、その体積を算定している。



図-1 調査地域

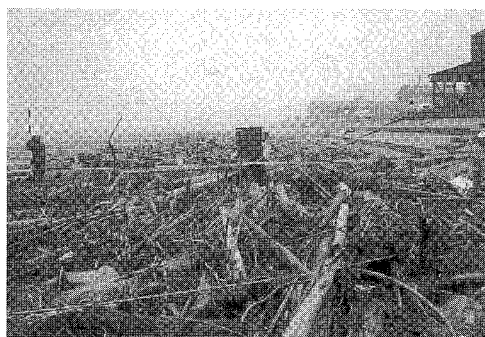


写真-1 計測の様子(美浜町,国土交通省河川局海岸室 提供)

1 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻
2 フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
3 正会員 工博 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

3. 現地調査の結果及び考察

(1) 愛知県海岸における漂着量

愛知県海岸における漂着量を表-1に示す。漂着量は、知多半島の美浜町には合計で $15,000 \text{ m}^3$ 以上と最も多く、他にも南知多町、篠島、渥美半島などで被害が大きかった。写真-2は内海地区（南知多町）の被害状況を示した写真である。特徴は根付きの原木の割合が非常に大きいことであった。国土交通省の資料（2004）には、処分する流木は重量ベースで幹部分40％、根部分40％、木片小枝等20％という記述もある。漂着時間は新聞報道、ヒアリングから9月30日の日中には、知多半島に漂着していたものと考えられる。また、流木以外に三重県から漂着したと思われるゴミ（宮川村の杭、松阪市内のホテルのカゴ、宮川河川敷にある少年野球チームのネーム付きの倉庫扉、三重県内事務所の看板）も確認された。

(2) 三重県海岸における漂着量

三重県海岸における漂着量を表-2に示す。漂着量は愛知県と比べて小さいが、河芸町、津市、香良洲町、三雲町、伊勢市、答志島を中心に $2,000 \text{ m}^3$ から $3,000 \text{ m}^3$ 程度漂着した。特徴は葦などの小枝類の割合が大きく、根付きの原木の割合は小さいことであった。漂着時間は新聞の報道等から香良洲町、三雲町には9月30日、答志島には9月30日から10月1日にかけて漂着したものと考えられる。

(3) 河岸に漂着した流木群による発生源の予測

今回の台風では、三重県宮川村などで甚大な土砂災害が起きたことから、三重県河川から流木群が流れ出た可能性が高いと考え、宮川、櫛田川、雲出川、鈴鹿川の河岸も調査対象とした。各河岸における漂着量を表-3に示す。これより、宮川の河岸に $24,900 \text{ m}^3$ と最も多くの流木群が漂着したことが分かる。また、特徴としては宮川における流木群は愛知県海岸と同様に根付きの原木の割合が大きかった。一方、他の河岸では、三重県海岸と同様に、

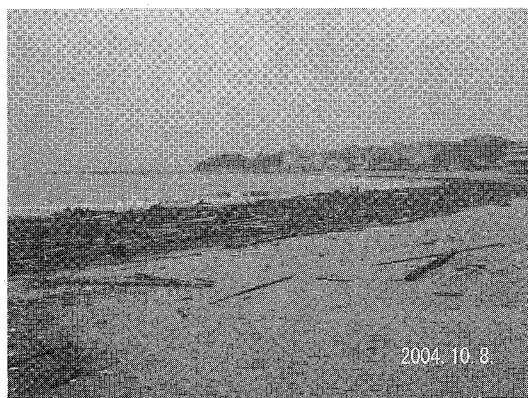


写真-2 内海地区(南知多町)の被害状況

表-1 愛知県海岸における漂着量

地区名	市町村名	漂着量(m^3)
野間・奥田地区	美浜町	12,800
富良崎港	美浜町	2,820
小野浦・内海地区	美浜町	660
小野浦・内海地区	南知多町	1,000
内海・山海地区	南知多町	240
内海港	南知多町	3,600
山海・豊浜地区	南知多町	390
東山地区	篠島	800
中山・西山地区	渥美町	4,900
	(合計)	27,210

表-2 三重県海岸における漂着量

地区名	市町村名	漂着量(m^3)
高松地区	川越町	40
磯津地区	四日市市	100
吉崎地区	桶町	100
南五味塚地区	桶町	40
南長太地区	鈴鹿市	120
下箕田地区	鈴鹿市	28
北若松地区	鈴鹿市	24
千代崎地区	鈴鹿市	180
白子地区	鈴鹿市	160
磯山地区	鈴鹿市	288
千里地区	河芸町	700
上野地区	河芸町	2,100
白塚地区	河芸町・津市	550
栗真地区	津市	1,050
河芸地区	津市	900
中河原・乙部地区	津市	700
阿漕・藤枝・米津地区	津市	400
香良洲地区	香良洲町	3,200
鵠地区	三雲町	2,000
鵜飼地区	松阪市	20
西黒部地区	松阪市	90
吹井の浦地区	松阪市	50
川尻地区	明和町	10
北藤原地区	明和町	100
浜田地区	明和町	40
大淀地区	明和町	500
大湊地区	伊勢市	1,800
今一色地区	二見町	200
桃取東地先海岸	鳥羽市	420
桃取漁港	鳥羽市答志島	2,000
	(合計)	17,910

表-3 各河岸における漂着量

河川名	漂着量(m^3)
鈴鹿川	4,500
雲出川	2,680
櫛田川	1,720
宮川	24,900
(合計)	33,800

葦などの小枝類の割合が大きかった。ちなみに、愛知県河岸には、大量の流木が漂着したという報告は無かった。

(4) 全体的な被害状況の把握

以上の被害状況をまとめると、図-2 のようになる。これから分かるとおり、愛知県の海岸・港湾に漂着した流木群は、漂着量や流木群の特徴、漂着ゴミなどを考え、宮川から流出した可能性が高いことが分かった。

三重県の海岸・港湾に漂着した流木は、どこから流出したとは言及しにくい、宮川以外の複数の河川から流出した流木群が複合的に影響しあったものと考えられる。

また、流木はどの海岸・港湾にもほぼ同じような時刻に漂着したと考えられる。三重県宮川村で9月29日の8:40-9:40の間に最大降水量(それ以降は計測不能)を記録したことを考えると、29日の正午前後に各河口から流出した流木群は、その後1日程度の期間で各海岸・港湾に漂着したものと考えられる。

4. 数値計算の概要

ここでは、河川から流出した流木群の影響を量る指標として、流木群の挙動を再現・予測をするモデルを開発する。モデルを構築し、さまざまな状況を再現、予測し、現地調査結果と比較、検証することは、洪水時における流木被害の解明につながる。さらには、改善策の効果を定量的に予測することが可能になる。

(1) 流速場の基礎式

洪水時に、河川から海へ流れてくる流木群の挙動を再現・予測するに当たり、まずは洪水時における湾の流況を再現する必要がある。流木群の運動は海面での2次元運動と考えられるが、洪水時には海面の流況は、河川から大量の淡水が流れ出し、塩水の上を伝わる様にして流れるといった複雑な流れになると考えられる。従って、この淡水と塩水の関係性を考慮しなければ、より正確な湾の流況を再現できないものと考え、Navier-Stokes 方程式と連続方程式を用いた3次元の流動モデルを使用することにした。使用したモデルは、鯉淵ら(2001)により開発された三次元流動モデルである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

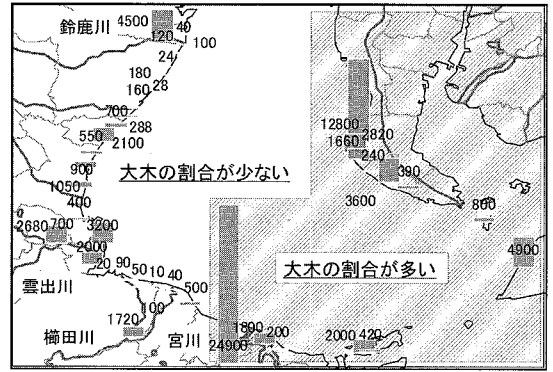


図-2 流木群の漂着量 (m³) と特徴

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速, f はコリオリ係数, p は圧力, ρ は密度, g は重力加速度, A_x, A_y, A_z はそれぞれ x, y, z 方向の渦動粘性係数である。

(2) 流木群の挙動解析のための基礎式

流木同士の衝突の影響や流木が付着して流動したりすることが無いと仮定すれば、個々の流木の重心における運動方程式は以下のように表せる。ただし、風および水流による抗力が卓越すると考え、表面摩擦による外力は考えていない。水位差による圧力勾配も微小であると仮定し、考えていない。また、中川・高橋(2001)によって開発されたモデルでは波による質量移送が考慮されていないため、流木群が海岸に打寄せる力が十分に反映されていない。そこで、本研究ではSWANを用いて波の有義波高、有義波周期、波向きを求め、Stoke-Driftにより算定した。基礎方程式は以下の通りである。

$$(m_k + m_{Cm}) \frac{dU_k}{dt} = m(1 + C_m) \frac{dU_k}{dt} \quad (5)$$

$$-\frac{1}{2} \rho C_{dwx} I_k (u_k - U_k) A_{kx} - \frac{1}{2} \rho a C_{daz} \bar{I}_k (u_k - W_{kx}) \bar{A}_{kx}$$

$$(m_k + m_{Cm}) \frac{dV_k}{dt} = m(1 + C_m) \frac{dV_k}{dt} \quad (6)$$

$$-\frac{1}{2} \rho C_{dwy} I_k (v_k - V_k) A_{ky} - \frac{1}{2} \rho a C_{day} \bar{I}_k (v_k - W_{ky}) \bar{A}_{ky}$$

$$\frac{dX_k}{dt} = u_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = v_k \quad (7)$$

u_k, v_k はそれぞれ第 k 番目の流木の x, y 方向の流速である。また、以下の様に相対速度を設定する。

$$I_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{I}_k = \sqrt{(W_{kx} - u_k)^2 + (W_{ky} - v_k)^2} \dots\dots\dots (9)$$

m_k は流木 k の質量, X_k, Y_k は流木 k の重心の位置, U_k, V_k は流木 k が位置している地点での x, y 方向の局所流速成分, W_{kx}, W_{ky} は流木 k が位置している地点での x, y 方向の局所風速成分, C_m は付加質量係数, C_{dwx}, C_{dwy} は流木に対する水の抗力係数, C_{dax}, C_{day} は流木に対する風の抗力係数, m は流体体積部分の流体の質量, A_{kx}, A_{ky} は自由水面下にある流木部分の x, y 方向の投影面積, $\bar{A}_{kx}, \bar{A}_{ky}$ は自由水面上にある流木部分の x, y 方向の投影面積である。

5. 数値計算による再現結果

(1) 計算条件

地形データは日本海洋データセンターの水深データを用いた。格子サイズは $2,000\text{ m}$ とし、 63×58 メッシュとした。流木の形状は非常に複雑であるが、今回は相互に干渉せず、回転運動もしないと仮定し、半径が 0.3 m の球体として計算を行った。また、 $C_m = 1.6$, $C_{dwx}, C_{dwy} = 1.2$, $C_{dax}, C_{day} = 0.6$, 計算時間間隔は 5 s とした。

(2) 自然条件

気象条件は津・名古屋地方気象台における観測値を用いた。また風は一様に吹いていると仮定し、津気象台における毎時の風向風速値を用いた。風速値は、海上 10 m 値に較正した。潮位は気象庁（鳥羽市）の潮位を、河川流量は宮川、櫛田川、雲出川、鈴鹿川、木曽川、庄内川、矢作川、豊川の伊勢湾に一番近い観測所の流量を用いた。

(3) 流木群の流出条件

図-3 は宮川の基準点である岩出と櫛田川の基準点である櫛田橋における 2004 年 9 月 29 日 1 時から 30 日 24 時までのハイドログラフである。流木群の流出時間は洪水の発生時間に連動すると考え、急増した時刻（29 日 10 時から 10 時間）を流木群の流出時とし、5 分ごとに仮想した流木群を河口から流出させた。ちなみに、流木群が流出時、湾内は上げ潮に移行する時間帯であった。

(4) 再現結果

以上の条件をもとに流木群の運動方程式を数値積分し、再現計算を行った。図-4 は、宮川から流木群が流出したと仮定した場合の計算結果であり、宮川から流出した流木群が愛知県知多半島や渥美半島の海岸に漂着することを再現することができた。なお矢印は表層の流速ベクトルを示している。図-5 は櫛田川から流木群が流出したと仮定した場合の計算結果であり、三重県海岸に漂着することを再現することができた。また、どちらの計算結果も現地調査結果とほぼ同じ漂着時間であった。

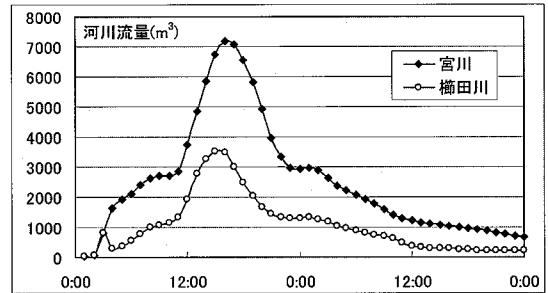


図-3 9月29-30日のハイドログラフ

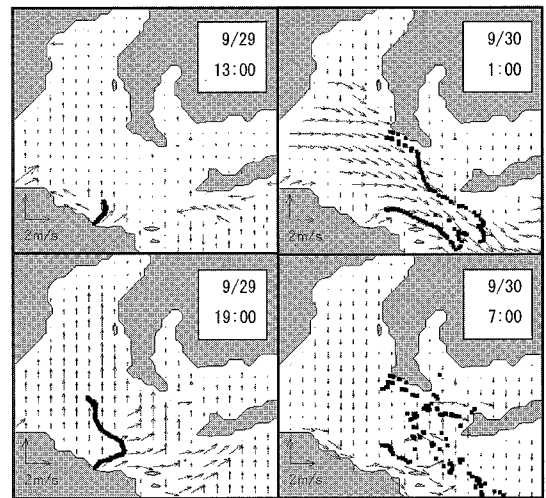


図-4 宮川から流出した場合の再現結果

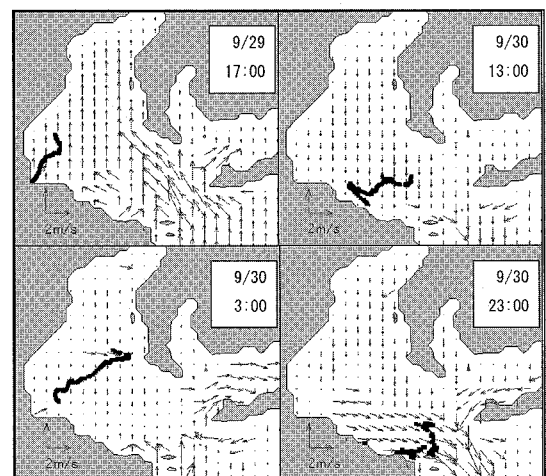


図-5 櫛田川から流出した場合の再現結果

6. 数値計算モデルに基づく数値実験

湾内における波による質量輸送、潮流、河川流出水、風といったそれぞれの要因が流木群の挙動に与える影響について感度分析を実施した。

(1) 潮流条件を変更

図-6は流木群の流出時に下げ潮であったと仮定し、宮川から流木群を流出させた場合の挙動である。現実では、上げ潮であり流木群が湾内の方へ向かうのだが、下げ潮の影響で湾外の方へ向かって流れていく様子が分かる。これより、流木群の挙動要因として、潮流を考慮する必要があることが確かめられた。

(2) 河川流量の条件を変更

図-7は宮川の河川流量が半分であったと仮定し、宮川から流木群を流出させた場合の挙動である。現実では河口から流木がより強い流れに乗って湾の内側に侵入し、潮流の影響で知多半島に広く漂着するのだが、この条件では湾の内側に侵入する前に潮流の影響を受けるため、知多半島の南側にしか漂着しない。これより、流木群の挙動要因として、河川流量を考慮する必要があることが確かめられた。

7. ま と め

本研究は現地調査と数値計算により、流木群の全体的な被害状況の把握と挙動の機構を明らかにすることを目的として行なった。主要な結論は、以下の通りである。

- (1) 現地調査から、愛知県知多半島に漂着した大量の流木群は、宮川から流出した可能性が高いことが分かった。
- (2) 流木群の挙動解析モデルを構築し、実際の被害状況を再現することができた。
- (3) モデルの構築において、湾内における波による質量輸送、潮流、河川流出水、風といった要因を考慮する必要があることが確かめられた。
- (4) 感度分析により、知多半島に流木群が漂着した要因を解明することができ、今後の漂着ゴミ対策の支援ツールを構築できた。

謝辞：流木群漂着量等のデータは国土交通省中部地方整備局三重河川国道事務所、三重県県土整備部、三重県建設部、愛知県農林水産部、愛知県建設部より提供して頂いた。現地調査は三重県津地方県民局に協力して頂いた。また、本研究の一部は、平成17年度河川整備基金研究助成によるものである。ここに記して深甚な謝意を表する。

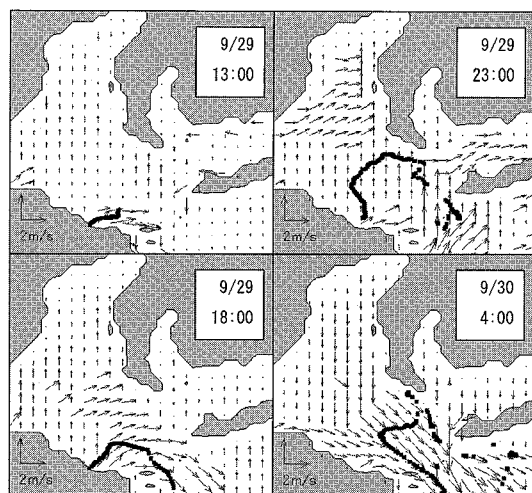


図-6 下げ潮時を仮定し、宮川から流出させた場合の計算結果

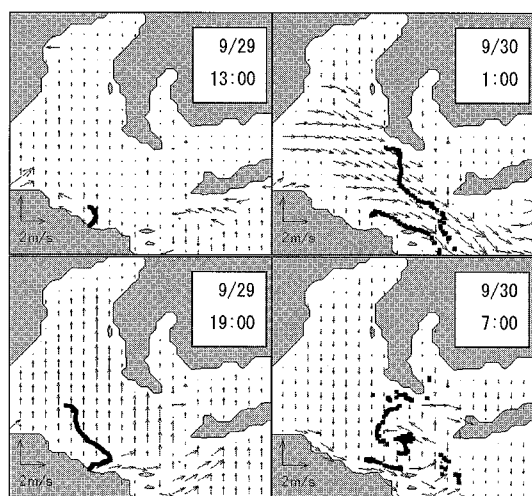


図-7 河川流量を調整し、宮川から流出させた場合の計算結果

参 考 文 献

- 国土交通省提供資料(2004)：災害関連緊急大規模漂着流木等処理事業対策事業、愛知県・三重県。
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2001)：東京湾における窒素・りんに着目した物質循環機構、海岸工学論文集、第48巻、pp. 1076-1080。
- 中川一・高橋保(2001)：大野川から別府湾に流出した流木群の挙動解析、水工学論文集、第45巻、pp. 931-926。
- Delft University of Technology: SWAN Cycle version 40.41, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>, 参照 2006-03-03