

湾内に流出した流木群の挙動解析

中川 一・高橋 保

要 旨

豪雨による斜面崩壊や洪水による河岸浸食などにより、多量の流木が河道内に供給され、洪水流とともに湾内に流出するといった現象がこれまで多くみられる。湾内に流出した流木群が港湾に滞留したり、湾内外に広く拡散することにより、港湾機能が麻痺したり船舶の航行に支障をきたしたりしている。このような障害を発生させないための根本は、湾内への流木の流出を未然に防ぐことにあるが、このような対策を全ての河川に対して施すことができていない現状にあっては、湾内に流出した流木群の拡散を予測し、流木による障害や危険性を回避したり対応策を事前に準備するなどの対策が重要となろう。本研究では、1990年に大分県大野川流域で多量の流木が生産され、これが別府湾に流出した時の流木群の拡散現象をとりあげ、流木群の挙動解析を行っている。

キーワード: 流木, 別府湾, 挙動解析, 大分県, 大野川, 1990年豪雨, 風速, 数値シミュレーション

1. 緒 言

平成2年6月4日に九州地方は梅雨入りしたものの太平洋高気圧の勢力が強く、梅雨前線は朝鮮半島に北上していたが、6月28日から徐々に南下し、台風6号くずれの低気圧の接近や太平洋高気圧周辺部からの暖かい湿った空気の流入によって梅雨前線の活動が活発となった。これによって九州北部で集中豪雨が発生した。

大分県竹田市にある県土木事務所の雨量記録によると、6月28日～7月3日の降水量は457mmであり、7月2日には日最大雨量289mm、1時間最大降雨強度51mm（河川情報センターの情報では日最大雨量307mm、1時間最大降雨強度54mm）と、未曾有の豪雨であった（大分県, 1991）。この豪雨により大野川の上流、大分県と熊本県との県境、阿蘇山に源を発する玉来川や稲葉川の流域で多数の山腹斜面が崩壊するとともに、著しい河岸侵食が発生した。この山腹斜面の崩壊や河岸侵食によって多量の樹木、特に植林されていた杉が河道内に流入し、これが洪水流とともに流下したことで橋梁や家屋が被災した。

大量の流木は大野川をさらに流下して別府湾に流出した。第六管区海上保安本部の調査によると流木は伊予灘、豊後水道、別府湾沖合に幅広く分布し、7月5日午前0時から航行警報を出して付近を航行する船舶に注意を呼びかけた。同日未明には流木群は潮流に乗って豊後水道を横切り、約30km離れた対岸の愛媛県佐多岬半島にまで達し、三崎町与修漁港では漁船約80隻が漁港内に閉じこめられる事態にもなった。（平成2年7月6日朝日新聞朝刊による）。

本研究は、著者らがこれまでに開発してきた流木群のラグランジュ的挙動追跡法と水流のオイラー的解析法とをカップリングさせたモデル（中川他, 1994）に、海面でのせん断応力や流木群に作用する流体力として風の影響を新たに考慮して別府湾内における流木群の挙動解析を行うものである。

2. 平成2年の豪雨災害と流出流木の概要

2.1 流域の概要

大野川はFig.1に示すように、阿蘇山と久住山の麓に源を発する玉来川や稲葉川などの支川が竹田市

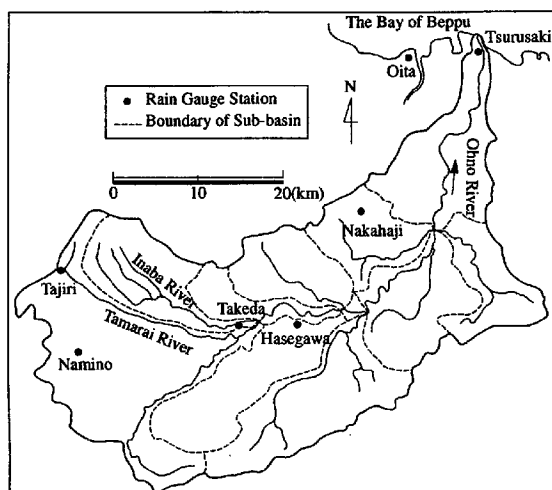


Fig.1 The Ohno River basin and rain gauge stations

付近で合流した後、さらに多くの支川と合流しながら別府湾に注ぐ、流域面積約1,465 km²、幹川流路延長約107 kmの一級河川である。竹田や久住などでは戦後の造林運動で自然林を伐採して植樹した20年～30年生の杉や檜が多く、火山灰土上でこれらは間伐されないまま細長く伸び、根の緊縛力が弱い状態であったと言われている。また、溪畔林や河畔林も多く、洪水による溪岸、河岸侵食により流出しやすい状態であった。

2.2 豪雨の概要

Fig.2は平成2年6月29日～7月2日にかけての5日間の積算雨量分布を示したものである(大分県, 1991)。大分県西部の豊肥地区、日田地区に降雨が集中し、大野川上流部で500 mmを超えていることがわかる。Fig.3は、河川情報センターからの情報をもとに大野川流域内の田尻、波野、竹田、長谷川、

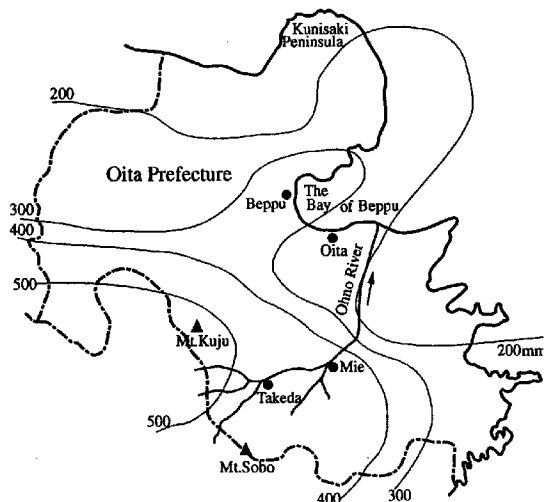


Fig.2 Distribution of cumulative rainfall (June 29 ~ July 2, 1990)

中土師および鶴崎の6地区における1時間降雨強度と積算雨量を示したものである。なお、積算雨量は6月29日からの降雨である(大分県, 1991)。阿蘇山麓の田尻や波野では積算雨量が500 mmかそれ以上であり、波野では2日の10時の降雨強度が73 mmに達するなど、大野川の上流域で多量の降雨が観測された。中流部の長谷川や中土師でも300 mmを超える豪雨であったが、下流の鶴崎では時間雨量の最大が14 mm、積算雨量も177 mmと、上中流部に比してかなり少ない降雨であった。

2.3 生産流木量の推定

流木の生産は主として斜面崩壊と河道の側岸侵食による。平成2年の水害では、熊本県の白川上流古恵川流域での生産流木量について詳細な調査が行われているが(林・梅村, 1991)、大野川流域では詳細な資料は整っていない。そこで、ここでは林・梅村の成果を援用して大野川流域における生産流木量の概算値を見積もることとする。彼らは推定発生流木本数 N と木本域推定生産土砂量 V_p とが次のような関係にあることを示している。

$$N = 0.2V_p \quad (1)$$

なお、流木の推定生産量は流木と土砂との発生場所が同じであると仮定し、木本域推定生産土砂量には側岸侵食による森林破壊面積と斜面崩壊による森林破壊面積とから推定される生産土砂量を用いている。

本研究では、生産流木本数を推定することが主とした目的ではないので、森林破壊面積を詳細に検討することはせず、森林被災面積に関する新聞報道の情報を用いる。大分合同新聞の平成2年7月11日の報道によると、玉来川流域では崩壊箇所が20箇所で面積が9.2 ha、稲葉川流域では崩壊箇所が77箇所で面積が11.9 haであった。この中に側岸侵食による森林破壊面積が含まれているかどうかは不明であるが、合計21.1 haが森林破壊面積であると考えられる。

同記事によると、この辺りは火山灰土壌であって崩壊地域は火山岩の岩盤の上に厚さ1 mから3 mの厚さの火山灰の表土があり、ここが滑ったものと推定されることから、滑りの厚さを約2 mとして式(1)より生産流木本数を推定すると $N = 84,400$ 本となる。流木の流出率については、水山・石川(1990)が検討しているが、谷の流域面積と流出率とはほとんど相関が無く、砂防施設などによる流木の補足が有るか無いかで流出率が強く影響される。側岸侵食による流木はそのまま本川河道に流入したものと考えられることから、崩壊による生産流木量の流出率と側岸侵食による流木流出率はおのずと異なり、ま

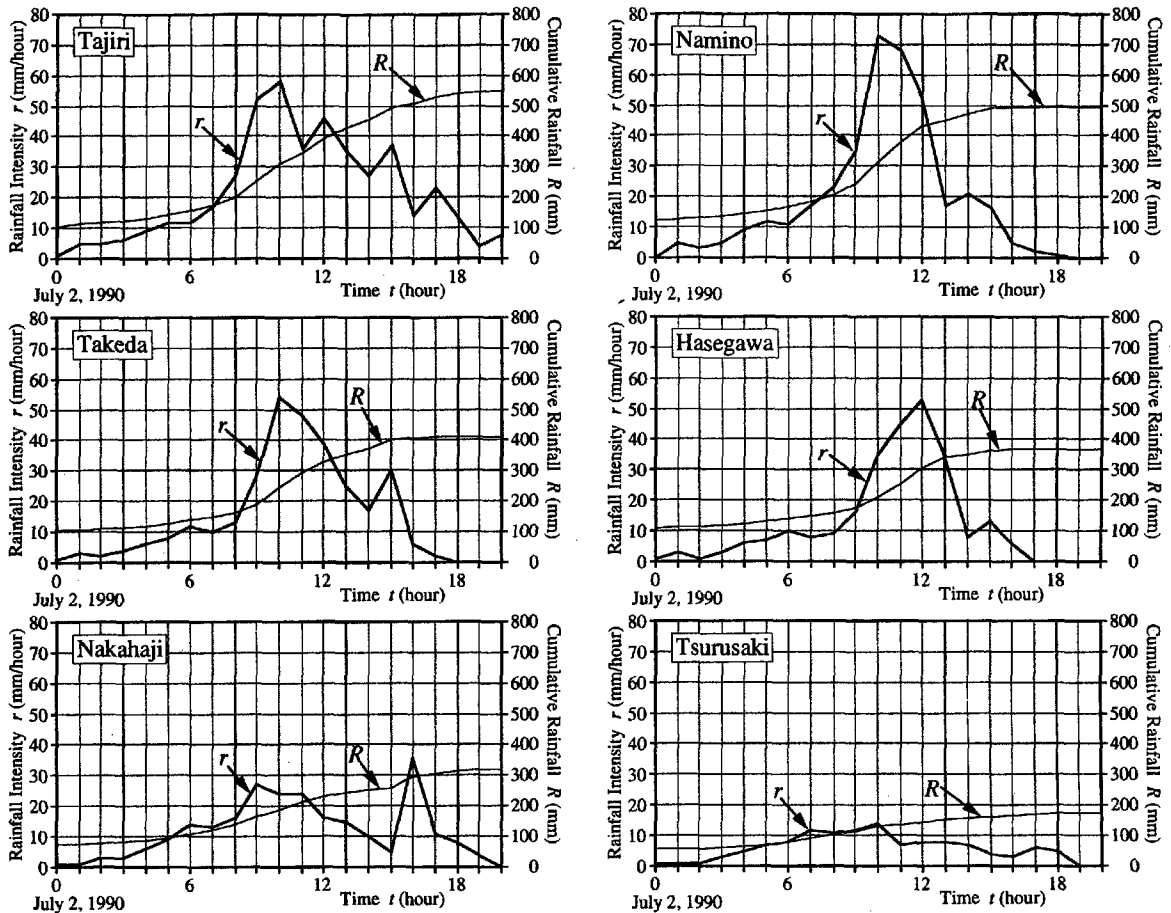


Fig.3 Rainfall intensity and cumulative rainfall at rain gauge stations
(cumulative rainfall: June 29~July 2, 1990)

た、本川へ流出してもそのまま別府湾へ流出したとは考えにくく、橋梁に引っ掛かったり氾濫・堆積したものも存在したと推察される。ここでは、先に示した推定流木本数には側岸侵食によるものが考慮されていない可能性があることから、若干高い流出率ではあるが約35% (約30,000本) が別府湾に流出したと考える。

2.4 別府湾内に流出した流木群の実態

別府湾内に流出した流木群の全体像はよく分かっていないが、当時の新聞記事からその実態はある程度伺い知ることができる。Fig.4は平成2年7月6日の朝刊に掲載された流木群の流動方向を示した図である。同図より、主たる流動方向は愛媛県の佐田岬半島に向いているが、この時の掲載記事には、「7月5日未明、愛媛県・佐田岬半島突端の周辺約20kmにわたって家の柱や根の付いたままの流木などが大量に漂着した」と記されており、同紙および他の新聞には周防灘や国東半島の突端および豊後水道を南下して

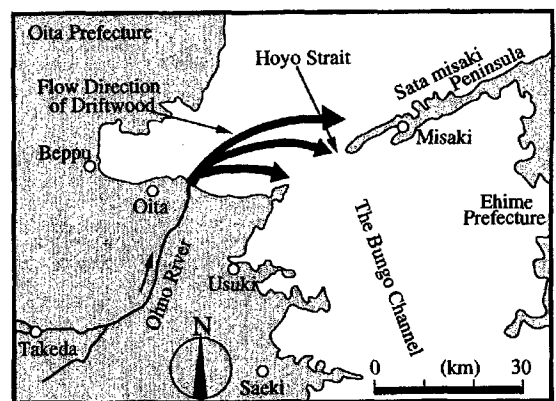


Fig.4 Flow direction of driftwood (data source is Asahi Shinbun published on July 6, 1990)

臼杵湾や佐伯湾にも流木の一部が、漂着したとも記されている (平成2年7月12日の西日本新聞、同年7月19日の毎日新聞、同年7月7日の読売新聞等)。ただし、周防灘や国東半島の突端にまで達した流木群が大野川から流出したものは不明である。

Photo 1は7月5日の正午頃に毎日新聞社のヘリ

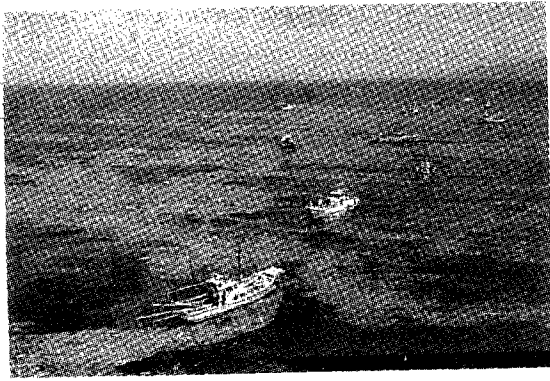


Photo 1 Driftwood belt and fishing boats withdrawing driftwood (photo courtesy of Mainichi Shinbun)

コプターから撮影された流木群の様子であり、別府湾の上空から豊後水道の方向をねらったものである。その時の模様を7月6日の毎日新聞朝刊は「大分県佐賀関町北西約10kmの豊予海峡では、半径約1kmにわたって枯れ草などが混じった大量の流木が帯状に漂流。約50隻の漁船が回収作業にあたった」と記している。

Fig.4やPhoto 1から、別府湾に流出した流木の多くは、5日未明には佐田岬半島に漂着し、5日正午頃にはまだ豊予海峡で1km程度の幅で帯状に漂流していたのではないかと推察される。

3. 別府湾に流出した流木群の挙動解析

3.1 洪水規模

流木群が河道から湾内へ流出する場合、河川洪水の影響を受けるであろう。ここでは、大野川の河口付近で流木群の境界条件を与えることを考えており、この地点における大野川の洪水ハイドログラフを求める必要がある。

大野川流域をFig.1に示したようなサブ流域に分割し、最寄りの降雨観測地点の1時間降雨強度を与えて、線形の貯留関数法を用いて洪水ハイドログラフを求めた。得られた結果のみを示すとFig.5のようになる。ここでは洪水ハイドログラフの正確な予測に焦点を絞った研究ではないので、得られた結果が妥当であるか確認していないが、オーダー的にはこのようであったものと推察される。

3.2 基礎方程式

著者らは以前に、堤内地に氾濫した流木群の挙動を表現し得るモデルの開発を行ってきた(Nakagawa et al, 1995)。本研究ではこのモデルに改良を加え、潮汐の影響と流木に作用する風の抗力とを評価している。湾内の流れおよび流木の流動解析には以下の

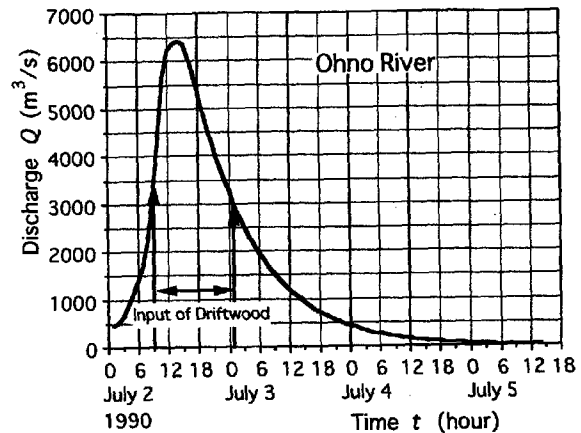


Fig.5 Hydrograph of the Ohno River at the downstream end, and duration of supplying driftwood

ような基礎式を用いている。

(1) 湾内の流れの解析

風による自由表面および海底面でのせん断応力の評価を、台風による高潮の計算に用いてきたものと同様に扱えると考え、静水圧近似を仮定した二次元平面流れの基礎式は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = f_c N - gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{2} f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ - \frac{k_a \tau_{wx}}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \left(2A_h \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h A_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + \frac{\tau_{wy}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -f_c M - gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{2} f v \sqrt{u^2 + v^2} \\ - \frac{k_a \tau_{wy}}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \left(2A_h \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h A_h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + \frac{\tau_{ux}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここに、 M, N ; $M = uh, N = vh$ なる流量フラックス、 u, v ; それぞれ、 x および y 方向流速、 h ; 水深、 f_c ; コリオリのパラメータで、 $f_c = 2\omega \sin \phi$, ω ; 地球の回転角速度、 ϕ ; 緯度、 H ; 水位で、 $H = h + z_b$, z_b ; 地盤標高、 g ; 重力加速度、 f ; 摩擦損失係数、 k_a ; 係数、 ν ; 動粘性係数、 A_h ; 水平渦動粘性係数、 k ; 乱流エネルギー、 ρ ; 海水の密度、 τ_{sx}, τ_{sy} ; それぞれ流木の存在を考慮した自由表面での x および y 方向のせん断応力、 τ_{wx}, τ_{wy} ; それぞれ風による自由表面での x および y 方

向のせん断応力, t ; 時間, x, y ; それぞれ水平方向の座標である。 A_h および k に関しては, 細田・木村(1993)の方法に従い, それぞれ $A_h = \alpha h u_*$, $k = 2.07 u_*^2$ とした。ここに, u_* は摩擦速度, α は 0.3 とした。摩擦損失係数に関しては, Re 数に応じて次のような層流抵抗則と滑面乱流の抵抗則(遷移領域もこれに含めた)を使い分けた。

$$\left. \begin{aligned} f &= 6/Re & (Re < 400) \\ \sqrt{2/f} &= 3.0 + 5.75 \log Re \sqrt{f/2} & (Re \geq 400) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

風による自由表面でのせん断応力は風速の2乗に比例すると考えられており, ここでは次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{wx} &= \rho_a f_s W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{wy} &= \rho_a f_s W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに, ρ_a ; 空気の密度, f_s ; 自由表面上での抵抗係数, W_x, W_y ; それぞれ自由表面上(実際には海上10mの高さ)での x, y 方向の風速である。

(2) 流木群の挙動解析

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, 個々の流木の重心の運動方程式は以下のように表せよう。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。

$$\begin{aligned} (m_k + mC_M) \frac{du_k}{dt} &= m(1 + C_M) \frac{dU_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho_a C_{Dx} \tilde{W}_k (u_k - W_{kx}) \tilde{A}_{kx} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (m_k + mC_M) \frac{dv_k}{dt} &= m(1 + C_M) \frac{dV_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial y} \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho_a C_{Dy} \tilde{W}_k (v_k - W_{ky}) \tilde{A}_{ky} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに, u_k, v_k はそれぞれ第 k 番目の流木の x および y 方向流速で,

$$dX_k/dt = u_k, \quad dY_k/dt = v_k \quad (9)$$

により流木位置と関係付けられる。また,

$$W_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} \quad (10)$$

$$\tilde{W}_k = \sqrt{(W_{kx} - u_k)^2 + (W_{ky} - v_k)^2} \quad (11)$$

m_k ; 流木の質量, X_k, Y_k ; 流木の重心の位置, U_k, V_k, H_k ; それぞれ流木 k が位置している地点での x, y 方向の局所流速成分および水位, W_{kx}, W_{ky} ; それぞれ流木 k が位置している地点での x, y 方向の局所風速成分, A_{kx}, A_{ky} ; それぞれ自由水面下にある流木部分の x, y 方向の投影面積, $\tilde{A}_{kx}, \tilde{A}_{ky}$; それぞれ自由水面上にある流木部分の x, y 方向の投影面積, C_{Dx}, C_{Dy} ; 流木に対する x および y 方向の抗力係数, C_M ; 仮想

質量係数, m は流木体積部分の流体の質量である。

流木 k の重心を通る軸まわりの回転運動は, 流木に作用する流体力のモーメント N_0 を評価することで求まる。並進運動の場合と同様に表面摩擦による作用力は無視できるとし, 回転運動に伴う仮想質量力も無視し得るとする。Fig.6 に示すように流木の重心 c で流木を仮に2等分し, その各々の重心 a, b に風および水流による流体力の合力が作用するとして回転運動の方程式を記述すれば以下のように表わせるであろう。

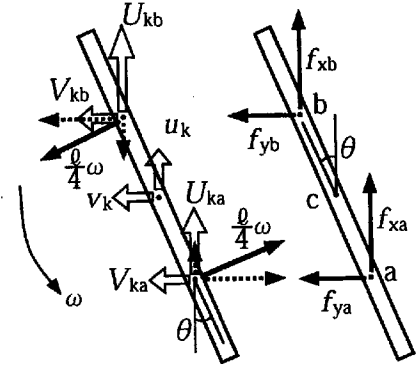


Fig.6 Definition sketch of the rotational angle and hydrodynamic forces of pieces of driftwood

$$I d^2 \theta_k / dt^2 = \sum N_0 = (\ell/4) \{ (f_{xa} - f_{xb}) \sin \theta_k - (f_{ya} - f_{yb}) \cos \theta_k \} \quad (12)$$

ここに,

$$\begin{aligned} f_{xa} &= (1/2) \rho C_{Dx} W_{ka} (U_{ka} - u_k - u_{rka}) (\tilde{A}_{kx}/2) \\ &\quad + (1/2) \rho_a C_{Dx} \tilde{W}_{ka} (W_{kxa} - u_k - u_{rka}) (\tilde{A}_{kx}/2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_{ya} &= (1/2) \rho C_{Dy} W_{ka} (V_{ka} - v_k - v_{rka}) (\tilde{A}_{ky}/2) \\ &\quad + (1/2) \rho_a C_{Dy} \tilde{W}_{ka} (W_{kya} - v_k - v_{rka}) (\tilde{A}_{ky}/2) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f_{xb} &= (1/2) \rho C_{Dx} W_{kb} (U_{kb} - u_k - u_{rkb}) (\tilde{A}_{kx}/2) \\ &\quad + (1/2) \rho_a C_{Dx} \tilde{W}_{kb} (W_{kxb} - u_k - u_{rkb}) (\tilde{A}_{kx}/2) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} f_{yb} &= (1/2) \rho C_{Dy} W_{kb} (V_{kb} - v_k - v_{rkb}) (\tilde{A}_{ky}/2) \\ &\quad + (1/2) \rho_a C_{Dy} \tilde{W}_{kb} (W_{kyb} - v_k - v_{rkb}) (\tilde{A}_{ky}/2) \end{aligned} \quad (16)$$

$$u_{rka} = (\ell/4) (d\theta_k/dt) \sin \theta_k \quad (17)$$

$$v_{rka} = -(\ell/4) (d\theta_k/dt) \cos \theta_k \quad (18)$$

$$u_{rkb} = -(\ell/4) (d\theta_k/dt) \sin \theta_k \quad (19)$$

$$v_{rkb} = (\ell/4) (d\theta_k/dt) \cos \theta_k \quad (20)$$

$$W_{ka} = \{ (U_{ka} - u_k - u_{rka})^2 + (V_{ka} - v_k - v_{rka})^2 \}^{1/2} \quad (21)$$

$$W_{kb} = \{ (U_{kb} - u_k - u_{rkb})^2 + (V_{kb} - v_k - v_{rkb})^2 \}^{1/2} \quad (22)$$

$$\tilde{W}_{ka} = \{ (W_{kxa} - u_k - u_{rka})^2 + (W_{kya} - v_k - v_{rka})^2 \}^{1/2} \quad (23)$$

$$\tilde{W}_{kb} = \{ (W_{kxb} - u_k - u_{rkb})^2 + (W_{kyb} - v_k - v_{rkb})^2 \}^{1/2} \quad (24)$$

θ_k ; 流木の回転角, I ; 流木の慣性モーメントであり, 流木を半径 r , 長さ ℓ の円柱と仮定すると $I = m_k(r^2/4 + \ell^2/12)$ である。なお, 添字 a, b は a 点および b 点における水理量を表わす。

水表面におけるせん断応力 τ_{sx}, τ_{sy} は, 流木に作用する抗力の反作用として流水に作用すると考え,

$$\tau_{sx} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \right\} \quad (25)$$

$$\tau_{sy} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \quad (26)$$

で評価する。ここに, A は水表面積で, $A = \Delta x \Delta y$ ($\Delta x, \Delta y$ は x および y 方向の空間差分間隔) であり, N_t は格子内 $\Delta x \Delta y$ に存在する流木の総本数である。

流木運動は水表面近傍での現象であるから, たとえば $Re \geq 400$ の場合には, 対数則が成り立つと仮定して次式によって断面平均流速を水表面での流速に変換する。

$$U_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_k \quad (27)$$

$$V_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_k \quad (28)$$

上記方程式系を解析的に解くことは困難なので, 差分近似して数値解析を実行することにする。

(3) 流木群の拡散変動量および変動角速度

$dX_k/dt = u_k$ および $dY_k/dt = v_k$ から求まる流木の決定論的な位置 (X_k, Y_k) からの拡散による変動値 $\Delta X_k, \Delta Y_k$ を, 従来のように Dukowicz (1980) の研究を参考にして次式で評価した。

$$\Delta X_k = \sqrt{4K_x \Delta t} \text{erf}^{-1}(\xi) \quad (29)$$

$$\Delta Y_k = \sqrt{4K_y \Delta t} \text{erf}^{-1}(\zeta) \quad (30)$$

ここに, ξ, ζ はそれぞれ x および y 座標に関する $[0, 1]$ のランダム変数で, $\text{erf}^{-1}(s)$ は次式より評価する。

$$\text{erf}(s) = \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-\eta^2) d\eta$$

$$\Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad (31)$$

拡散係数 K_x, K_y については, 実験で得た $K_x/u_* h = 0.629$, $K_y/u_* h = 0.208$ を用いることにする (中川他, 1992, 中川他, 1993)。結局, 流木位置は決定論的に求まる位置と拡散による変動量との和として次式で評価される。

$$X_k^{n+1} = X_k^n + u_k^n \Delta t + \Delta X_k$$

$$= X_k^n + u_k^n \Delta t + \sqrt{4K_x \Delta t} \text{erf}^{-1}(\xi) \quad (32)$$

$$Y_k^{n+1} = Y_k^n + v_k^n \Delta t + \Delta Y_k$$

$$= Y_k^n + v_k^n \Delta t + \sqrt{4K_y \Delta t} \text{erf}^{-1}(\zeta) \quad (33)$$

式(12)を時間積分することで流木の回転角速度お

よび回転角度は決定論的に求まるが, 流れの変動により回転角も変動するものと推察される。実際, 一様流場においては, 実験で用いた流木模型では平均角速度 $\bar{\omega} \approx 0$, 角速度の標準偏差 $\sigma_\omega = 81.6 Fr$ (Fr はフルード数) で回転しながら流下することが確認され, 回転角の変動特性を角速度の変動で議論できることが示唆された (中川他, 1992)。そこで, ここでは流木の回転角 θ_k の時間微分 (角速度) を, 決定論的に求まる角速度 ω_d と確率論的に求めた変動角速度 ω_p との和 $\omega = \omega_d + \omega_p$ で与えるものとする。すなわち,

$$d\theta_k/dt = \omega_d + \omega_p \quad (34)$$

ここに, ω_d は式(12)で決定論的に求まる流木の回転角速度, ω_p は変動角速度であって, 角速度の確率密度関数 ϕ は正規分布で記述され, その分布関数 Φ は

$$\Phi\left(\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad (35)$$

で与えられるので, Φ の値を $[0, 1]$ の区間のランダム変数として与えることで, 分布関数の逆関数より $\gamma = (\omega_p - \bar{\omega})/\sigma_\omega$ を求め, $\omega_p = \gamma\sigma + \bar{\omega}$ で評価できる。ただし, $\bar{\omega} = 0$ とした。

3.3 計算条件

数値解析を行うに当たり, 運動量式(2),(3)の時間積分にはアダムス・バシフオース法を, 移流項には QUICK スキームを用いる。ただし, 境界格子とその1つ内側の格子には1次の風上差分法を用いる。流水の連続式, 流木群の並進および回転の運動方程式の時間積分には前進差分を用い, 運動量式の粘性項の空間積分には中央差分を, その他の空間積分には前進差分を用いる。

Fig.7 中の点線で囲まれた部分を計算対象領域とし, 東を x の正方向として180メッシュとり, 北を y の正方向として150メッシュとって, 空間差分間隔 $\Delta x = 303.571 \text{ m}$, $\Delta y = 362.502 \text{ m}$, 時間差分間隔 $\Delta t = 5.0 \text{ sec}$ とした。計算に用いた諸量は以下のようである。 $f_c = 7.992284 \times 10^{-5} (1/s)$, $\rho = 1030 (\text{kg/m}^3)$, $\rho_a = 1.293 (\text{kg/m}^3)$, $f_s = 0.0026$, $k_a = 0.25$, $\ell = 10 (\text{m})$, $r = 0.3 (\text{m})$, 流木の密度 $\rho_r = 830 (\text{kg/m}^3)$, $C_{Dx} = C_{Dy} = 2.0$, $C_M = 1.0$ 。

(1) 風速および潮位条件

Fig.7 に示した国見, 中津など, 14 地点の気象観測所における毎時の風向風速データを用いて, 計算領域内の各メッシュ地点での風向風速を内挿により評価した。内挿は同図に示すような3箇所の観測所からなる17個の三角形要素を構成して, その内部の格子点における風向風速を面積比により配分して行った。なお, 風速値は海上10mの値に較正した値を用

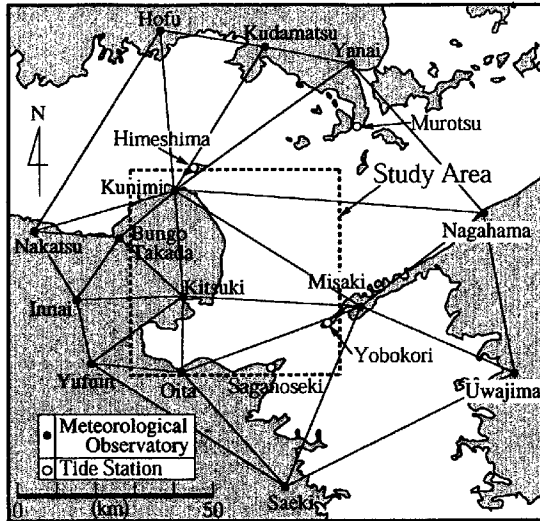


Fig.7 Sites of meteorological observation and tide stations. A square enclosed by dotted line is a study area

いている。

流木群の流動に対する風速の影響を調べるため、実測風を用いた場合と $W_x = W_y = 10 \text{ m/s}$ の風向風速を与えた場合の二通りについて計算を行う。

開境界条件として、姫島（30分潮）、室津（12分潮）、佐賀関（22分潮）、与修（22分潮）の天文潮を内挿補間して与える。

(2) 流木の供給条件

流木がいつ、どれだけ別府湾に流出したのか、時系列的なデータは全く無いので、ここでは、Fig.5に示したように7月2日午前9時から翌日の午前1時までの16時間に30,000本の流木が流出すると仮定した。すなわち、河口付近での大野川の流量が約 $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える時刻から流木が流出し始め、これを下回ると流木の流出が無くなると仮定し、大野川の河口直上流において、河道の横断方向に等間隔に10本流木を配置する操作を16時間に3,000回行い、これを流木の供給条件とした。なお、流木を配置するに当たり、流木の移動速度および回転角度はゼロとした。

4. 計算結果の考察

Fig.8は実測風を用いて別府湾内に流出した流木群の拡がりの状況を7月2日16時～7月5日10時まで6時間毎に示した計算結果である。7月2日16時には大野川の流れの影響を受けて流木群が噴流的に別府湾内へ流出している。22時には反時計回りの潮流の影響を受けて東方に向きを変え、3日4時には大野川の洪水の影響が無くなって河口付近から東方に向きながら10時には佐賀関の沖合にまで流木の渦を造りながら達している。16時には帯状に連なる流木群と

なって豊予海峡を一気に横断し、佐田岬半島の先端にまで達している。佐賀関沖西方沖では大量の流木が渦をなしながら滞留している。22時には佐田岬半島の南北両岸に流木群が回り込み、計算領域から一部の流木が流出し、滞留していた佐賀関沖西方の流木群が佐賀関の沿岸に渦をなしながら達している。

4日4時にはこの佐賀関沿岸の大量の流木が佐田岬半島北岸に到達している。大野川河口から佐賀関沖、豊予海峡にかけては帯状に流木群が連なっている。10時から5日10時にかけてこの帯状の流木群は別府湾の南岸にへばりつくように流動しながら佐賀関の先から剥離するように豊予海峡を横断し、5日10時にはこの海峡で渦を巻きながら流動している。この時間帯と近い時刻に撮影されたPhoto 1にも同様の様子がみてとれる。

計算結果はFig.4に示したような流木群の流動方向となっており、また、Photo 1にみられるように、豊予海峡で帯状に渦を巻きながら流動している様子をかなりよく再現しているものと考えられる。しかしながら、流木群の流動方向が計算ではほとんど佐田岬半島の両岸に限られているのに対し、新聞記事の情報では豊予海峡を南下して臼杵湾や佐伯湾に達したり、別府湾を北上して国東半島先端にまで達したのもあるとのことから、速吸瀬戸と呼ばれている豊予海峡での潮流の再現性に問題が残されていると考えられる。これは、開境界条件の設定方法の問題であり、これについてさらに検討が必要である。

また、佐田岬半島の与修漁港には5日未明に流木群が漂着しており、計算では3日の16時には一部の流木が佐田岬半島に到達し、4日の4時には多量の流木群が到達するなど、佐田岬半島に流木が達する時刻が実際よりかなり早くなっている。モデルの妥当性以外に、流木群がどの時間帯にどれだけ湾内に流出したか不明であったので、これをFig.5に示したように与えたことが、違いを生じた最大の原因であると考えられる。

この問題を解決するには、斜面崩壊や側岸侵食によって多量の流木が河道内に供給され、この流木が河道内を流下する過程を含めて計算する必要がある。これについては、今後の検討課題としたい。

Fig.9は流木群の流動に風がどのように影響するのかを見るために、 x 方向（東方向が正）に $W_x = 10 \text{ m/s}$ 、 y 方向（北方向が正）に $W_y = 10 \text{ m/s}$ の風速を定常的に与え続けた場合の計算結果を示したものである。なお、7月4日4時以降は流木群がほとんど全て（大野川河口に一部滞留）計算領域外に流出してしまうので7月3日22時までの結果を示している。

風の影響を受けて流木群の移動速度は実風速の

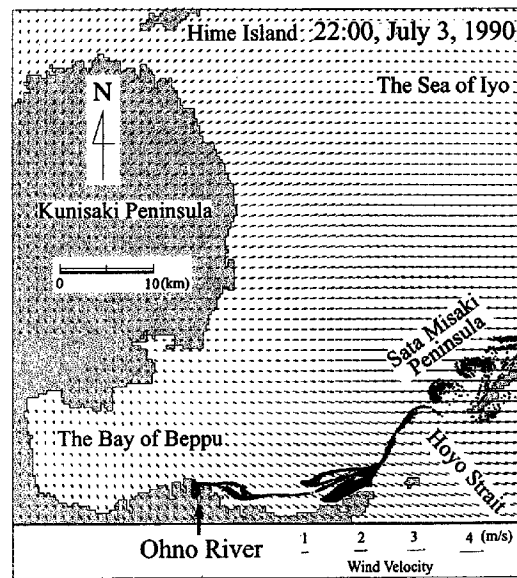
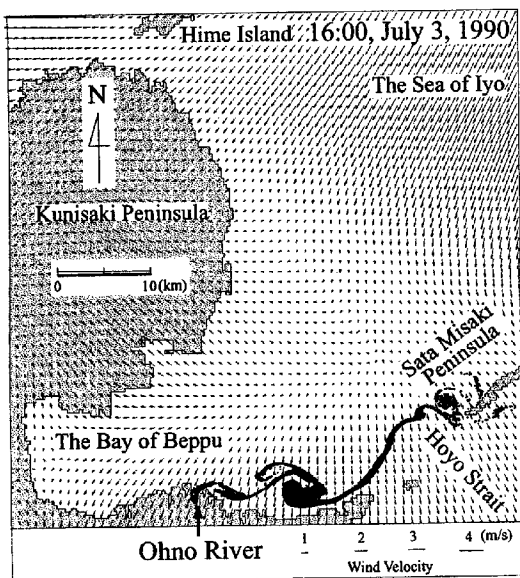
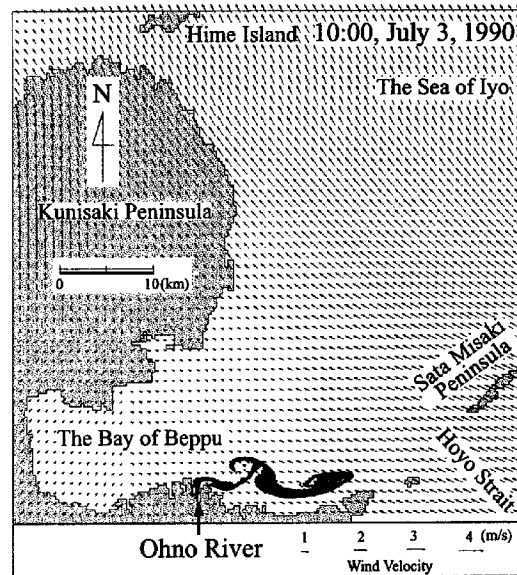
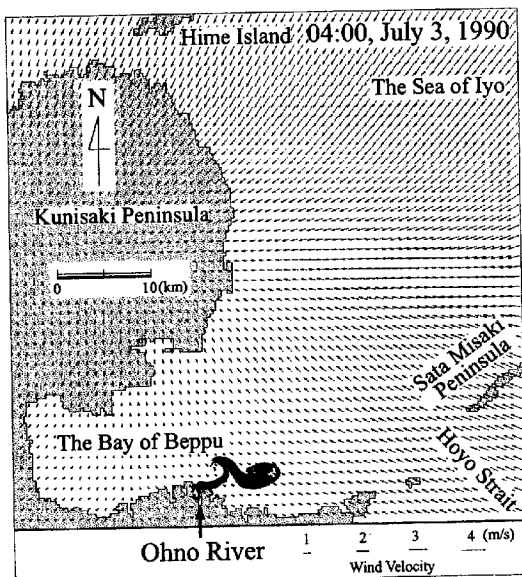
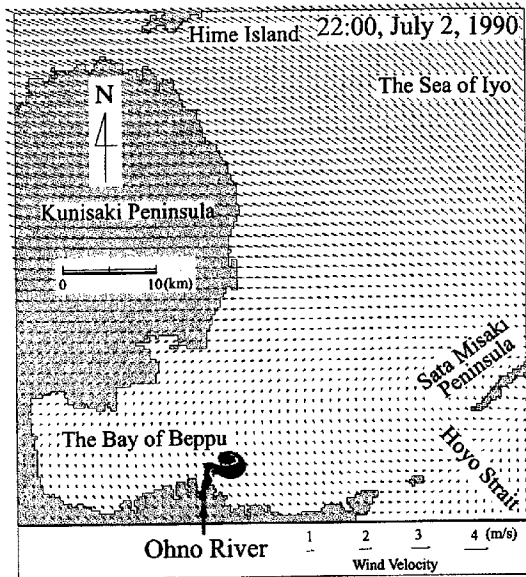
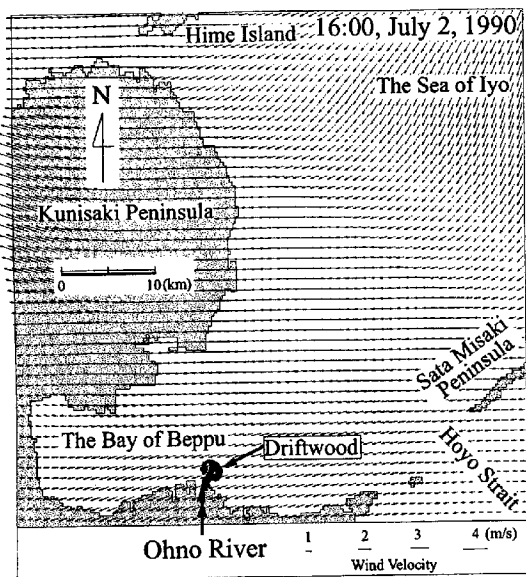


Fig.8 Calculated positions of the driftwood in case of using actual wind data

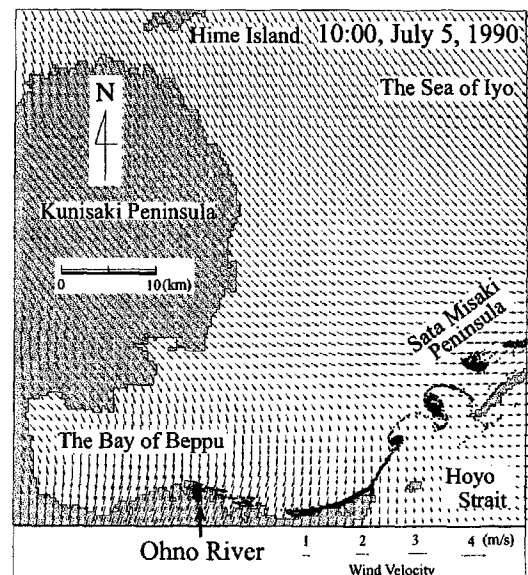
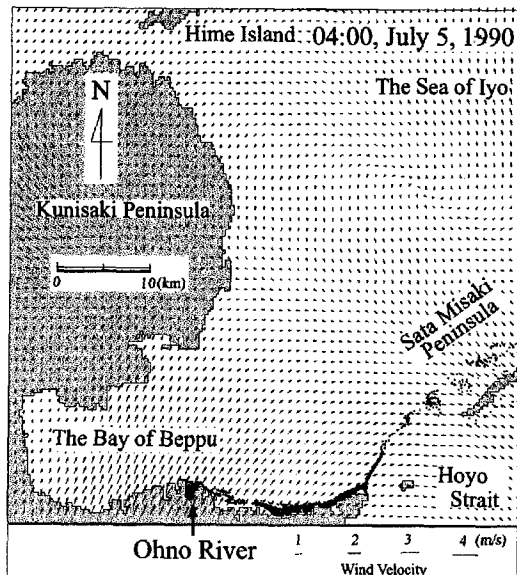
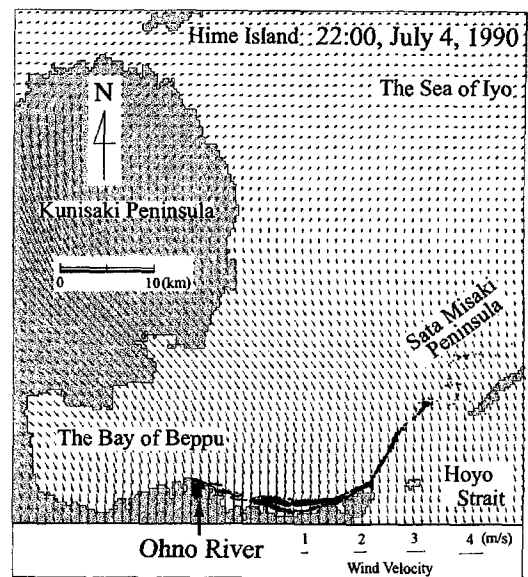
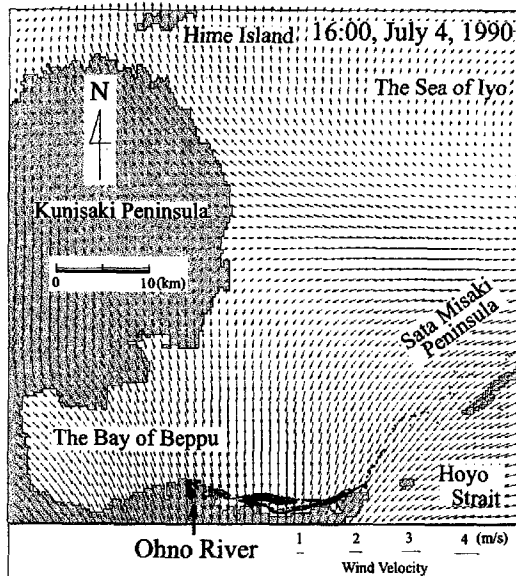
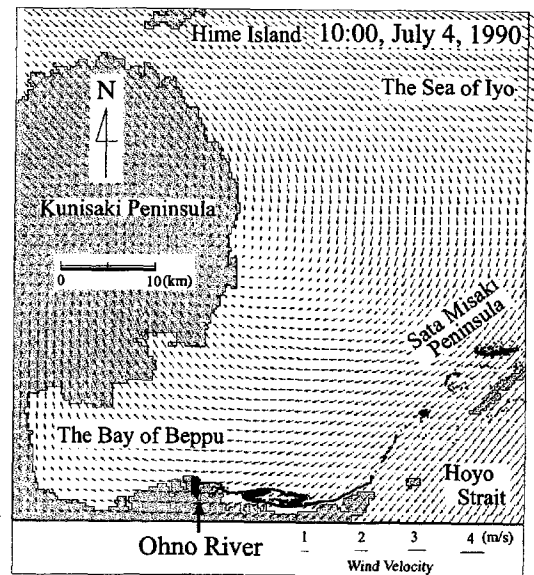
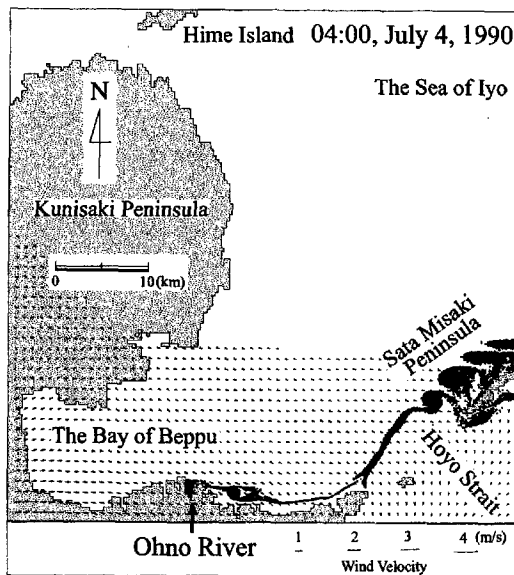


Fig.8 (Continued)

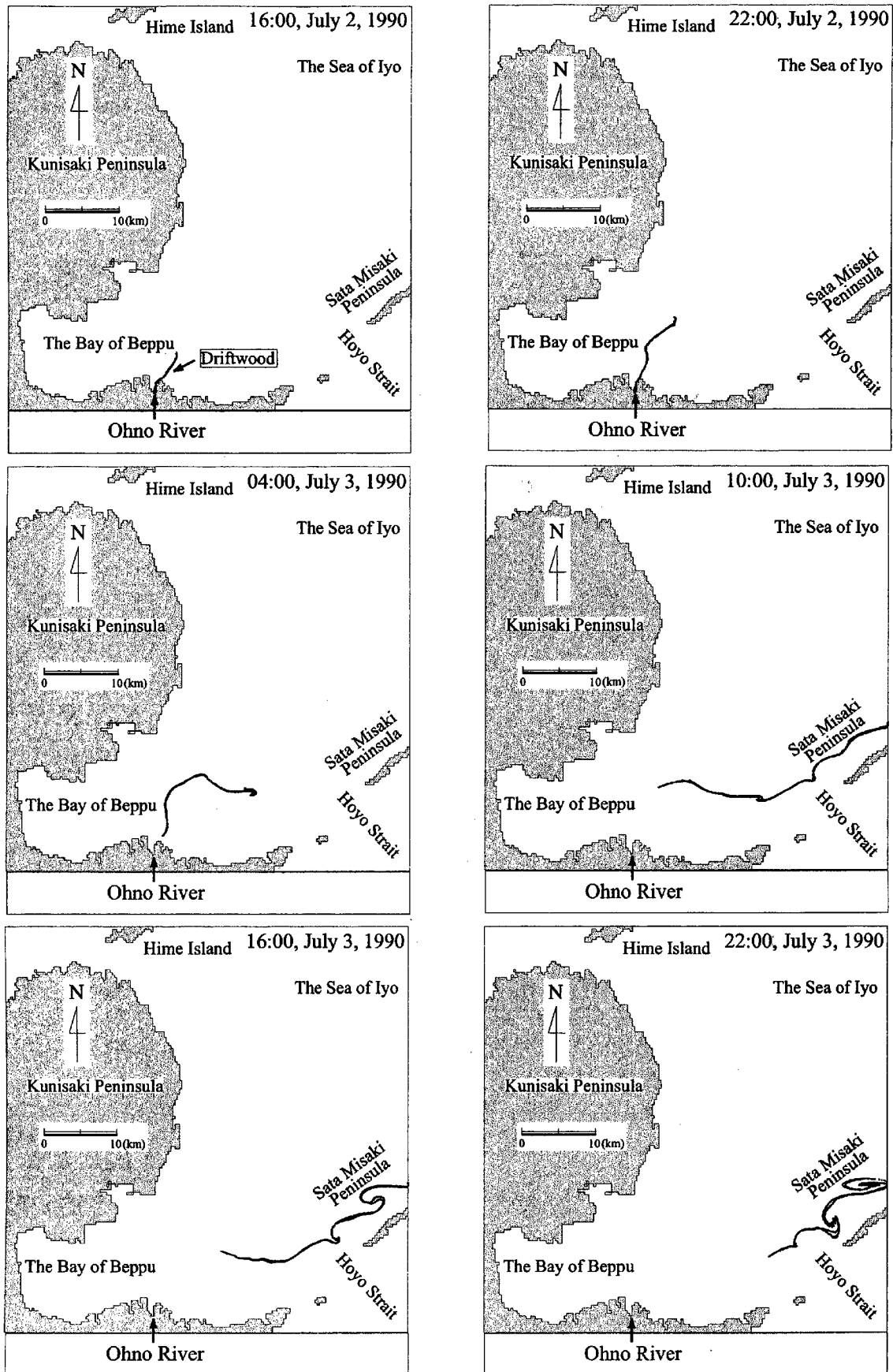


Fig.9 Calculated positions of the driftwood in case of using imaginary wind data ($W_x = W_y = 10 \text{ m/s}$)

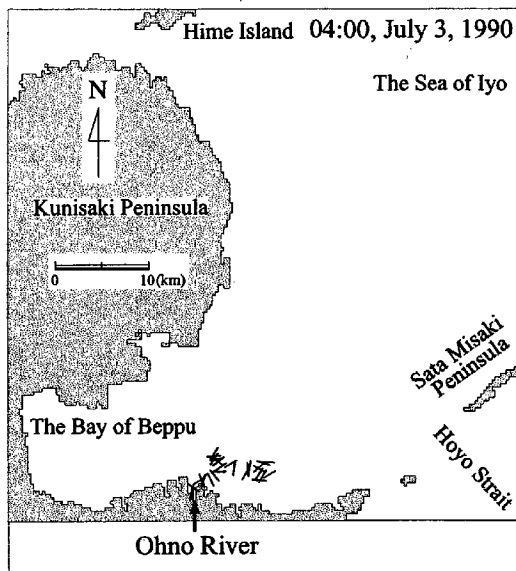


Fig.10 Driftwood position and rotational angle in case of using actual wind data (100pieces of drift wood are selected)

場合に比して極めて速くなっている。これには風による自由水面でのせん断力の増加で潮流自身も速くなることが影響しているものと考えられる。また、帯の幅も細くなっているのが特徴である。Fig.10は30,000本の流木群のうちから100本を任意に抜き出して流木の向きがわかるように流木を拡大表示したものである（実風速を使用，7月3日4時）。Fig.11は同一時刻で $W_x = W_y = 10 \text{ m/s}$ の場合である。これらの図より，強風が作用すると潮流が速くなるためか，流木群は流木の流動方向（潮流の方向であろう）に対して流体力の作用面積が最小になるように向き（外力と抵抗とが安定したバランスをとるように角度を変化させる），その結果，ある地点の流木に作用する流体力はその流木の近傍に存在する流木群と同様の向きと大きさの流体力を受け，お互いに同様の流動形態（移動速度，移動方向，回転速度等）をとるため，幅の狭い帯状に流動するのではないかと推察される。なお，このように流れが速くなると流木は外力と抵抗力とのバランスをとるように偏走角（主流方向と流木の長径とがなす角度）を最小にすることはこれまでも確認されている（中川他，1994）。

5. 結 語

平成2年7月2日の豪雨により発生した多量の流木が大野川の河口から別府湾に流出し，これが潮流と風の影響を受けて別府湾内を流動・拡散した事例を取り上げ，著者らがこれまで開発してきた流木のラグランジュ的挙動追跡法と流水のオイラー的流動解

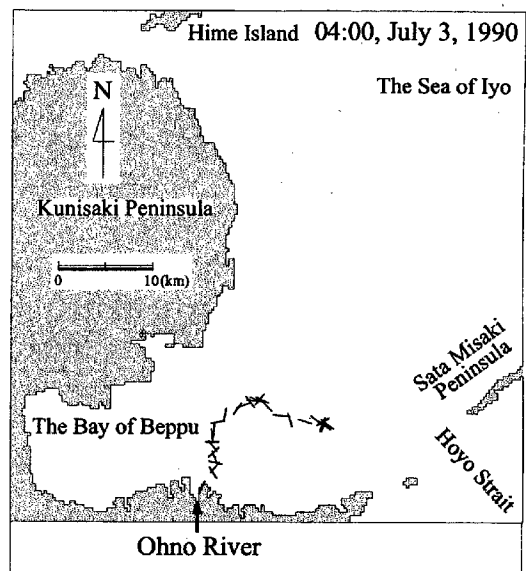


Fig.11 Driftwood position and rotational angle in case of using imaginary wind data ($W_x = W_y = 10 \text{ m/s}$; 100 pieces of drift wood are selected)

析法とのカップリングモデルに修正を加え，風や潮汐の影響を評価できるモデルにして，この事例の再現計算を行った。流木群の拡散状況が本モデルである程度再現でき，風の影響も本モデルで評価可能であることがわかった。しかしながら計算結果は実際よりも流木が速く流動している可能性があること，実際には豊予海峡を南下したり国東半島まで北上した流木も存在していたが，計算ではほとんどの流木が佐田岬半島方面へ流れること等，実際とは異なった結果も現れた。その主たる原因は，開境界となる豊予海峡で高速の潮流がうまく再現できていないことによると考えられる。開境界条件を改善して潮流の再現性を検討する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，大分合同新聞社調査部長の本田孝洋氏には災害当時の新聞報道記事をご提供いただいた。また，毎日新聞社西部本社写真部副部長の田鍋公也氏には別府湾に流出した流木群の写真をご提供いただいた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 大分県 (1991)：豪雨災害誌 —平成2年7月2日豪雨による—，大分県土木建築部河川課発行。
- 中川 一・高橋 保・池口正晃 (1992)：流木群の流動に関する研究，京大防災研年報，第35号B-2，pp.249-266。
- 中川 一・井上和也・池口正晃・坪野考樹 (1993)：流木群の流動に関する研究(2) —流木群の堰止め—，

- 京大防災研年報, 第36号B-2, pp.487-498.
- 中川 一・井上和也・池口正晃 (1994) : 流木群の流動に関する研究(3) -流木の回転運動を考慮した解析-, 京大防災研年報, 第37号B-2, pp.459-473.
- 林 重徳・梅村 順 (1991) : 古恵川流域における土砂と流木の発生, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果報告「1990年7月九州中北部豪雨による災害の調査研究 (研究代表者 平野宗夫)」, pp.95-108.
- 細田 尚・木村一郎 (1993) : 開水路急拡部の流れにおける渦の発生・発達に関する二, 三の検討, 水工学論文集, 第37巻, pp.463-468.
- 水山高久・石川芳治 (1990) : 土石流に伴って流出する流木量, 文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果, 「土石流の発生及び規模の予測に関する研究 (研究代表者 片岡順)」, pp.88-100.
- Nakagawa, H., Inoue, K., Ikeguchi, M. and Tsubono, T. (1995) : Behavior of Driftwood and the Process of Its Damming up, Jour. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.13, No.2, pp.55-67.
- Dukowicz, J.K. (1980) : A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, Jour. Comp. Physics, Vol.35, pp.229-253.

Analysis of Driftwood Behavior Debouched into the Bay

Hajime NAKAGAWA and Tamotsu TAKAHASHI

Synopsis

A large amount of driftwood debouched into the Bay of Beppu due to a great flood of the Ohno River which was caused by a heavy rainfall on July 2, 1990. The driftwood was generated by many landslides and river bank erosion. The driftwood debouched into the bay spreaded and arrived at several fishery harbors. A large amount of floating timber in the Bay of Beppu hindered the navigation of ships and damaged the fishery industries. In this study, the driftwood behavior debouched into the bay of Beppu is investigated by way of numerical simulation method. The effect of wind force on the driftwood motion is newly considered in the model.

Keywords: driftwood, analysis of driftwood behavior, the Bay of Beppu, Oita Prefecture, the Ohno River, heavy rainfall in 1990, wind velocity, numerical simulation