

## 谷地形における強風の数値実験 —1991年台風19号による大分県における風倒木災害—

萩野 裕章\*・西川 敦\*\*・戎 信宏\*・小川 滋\*

The Simulation of Strong Wind on Two Valley Configurations  
The damage of forest areas in 1991 by typhoon No.19 in Oita Prefecture

Hiroaki HAGINO\*, Atsushi NISHIKAWA\*\*  
Nobuhiro EBISU\* and Shigeru OGAWA\*

**Summary :** In 1991, typhoon No.19 has brought damage in the northwestern part of Oita Prefecture. Many trees were felled by the strong wind of the typhoon. There were various shapes of fallen tree areas. Even in the same region, one area was unaffected while the other area was damaged.

The purpose of this study is to analyze the above phenomena by the fluidanalysis. Configurations data from two selected damaged regions were taken for the simulation. A two dimensional model of fluid analysis was developed in the simulation.

The simulations results, in general, show the streamline pattern of wind blowing. At certain parts, however, the windings and swirlings appeared especially during strong wind occured by difference in the surface configuration. The damaged area and the location of windings or swirlings in the model are well corresponding. The study shows that the effects of typhoons in certain regions can be predicted by the fluid analysis simulation.

**要 旨** 1991年の台風19号による風倒木発生地ではその被害地に様々な形態が見られた。同じように風が吹いたと思われるところであっても、被害林もあればすぐ隣が無被害の所もあり列状や帶状、塊状の風倒木地もあった。

このような一見予測が困難な現象を流体解析の手段（数値シミュレーション実験）を使つ

\* 流域・森林環境制御研究室 Laboratory of Geoccosystem and Watershed Management

\*\* 農業気象学研究室 Laboratory of Agricultural Meteorology

て解析することを目的とし、2つの災害地をモデルにして実験を行った。

実験の結果は風の流れを流線で描かせた。描かれた流線には蛇行や渦などがあり局所的に風速が大きくなつたことを示した。またそれらが発生した場所と実際の風倒木地と一致している割合が高かった。予測が困難と思われた現象も数値実験によりある程度は予測・説明が可能と判断した。

## 1.はじめに

1991年の台風19号によって大分県では大規模な風倒木災害が発生した。大分県の林業地帯にとっては史上最悪の激甚災害となり林業経営者の意欲減退、大雨による二次災害等が心配されている。

風倒木の発生は、樹木にその木が持つ耐風限界以上の風圧力がかかったためであるといえる。耐風限界を決定する要素には樹冠の大きさ、樹高、樹種・品種、土壌といったものが挙げられるが、これらを風倒木発生の素因とすると、誘因として風圧力を与える強風がある<sup>3)</sup>。基本的には耐風限界を決定する素因と誘因の力関係の差から被害の有無、規模、形態まで予測できると考えられる。ところが、現地での被害林分を見ると被害の大きかった南西斜面や南斜面の森林がすべて被害を受けていると言うことではなく、立地条件や林分条件が同じようであっても無被害林分も多い。また、同一の樹種、同一の立地環境を持つ林分でも列状や帶状または塊状に被害があり、その周辺の林分には被害が皆無という事例が数多い。つまり、素因は同じでも、誘因の条件が強く影響していると考えられる。従って風倒木発生の予測に対しては、林木の耐風力の限界を越えた暴風の動きの予測が重要である。そのためには台風のマクロ規模での暴風の強さと方向を再現し、さらにはその暴風が山地地形の影響を受けた場合のミクロ規模での変化や風速の收れん状況をモデル的に解析<sup>2)</sup>することが必要となる。そこで本報告では強風の数値実験により、被災地の風の流れを再現し、特に地形の変化が風に与える影響について解析した。

## 2. 大分県における森林被害の概況

### 2-1 台風の経緯

1991年9月16日09時マーシャル諸島の西（北緯14度50分、東經158度40分）で弱い熱帯低気圧が発達して台風19号（中心気圧1000hPa、中心付近最大風速18メートル／秒）となった。台風はその後、21日頃まで西進を続けフィリピンの東海上に達した。22日フィリピンの東で北西に向きを変え、26日には宮古島の東約40キロメートルの海上を通過し、進行方向を次第に北、さらには北東に変えながら27日16時過ぎに長崎県佐世保市の南に上陸した。台風は、フィリピンの東にあった23日15時から24日15時にかけて中心気圧が最も低く925hPa、中心付近の最大風速は50メートル／秒の非常に強い勢力であった。また九州上陸時にも図-1<sup>1)</sup>に示すように大型で非常に強い勢力を保ち中心気圧は940hPa、中心付近の最大風速は50メートル／秒、暴風（25メートル／秒以上）半径が300キロメートル、強風（15メートル／秒以上）半径が600キロメートルであった。940hPa以下の中心気圧で上陸（島嶼を除く）した台風は1971年の台風23号以来20年ぶりであり、台風19号の2週間前に同様のコースを通過した台風17号と比較してもかなり大きかった。また北海道に再上陸した時点でも955hPa、最大風速は40メートル／秒で強い勢力であった<sup>3)</sup>。

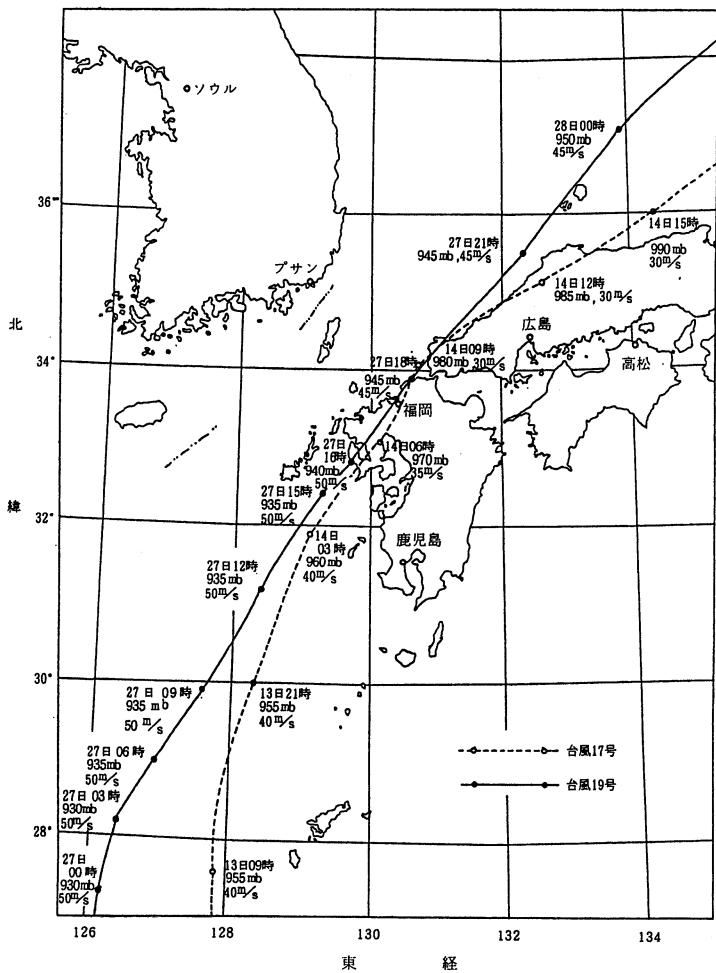


図-1 台風17号および台風19号の経路図  
(風速は最大瞬間風速を示す)

## 2-2 森林被害の概況

台風19号は極めて大型で強い勢力をもつた台風であったため立木の折損、倒伏等の森林被害（民有林）については30都道府県において、被害区域面積は約6万ha、被害金額は1,240億円となっている（1991年12月24日現在）。その中でも大分県の被害は極めて大きく被害面積、被害額がそれぞれ22,000ha、496億円とともに全国一の災禍を被った。被害地を図-2<sup>1)</sup>に示すが、県北西部に集中していながらその地域にあたる日田、玖珠九重、および中津下毛での被害率はいずれも20%を超えた。なお大分県下における被害率（被害面積／森林面積）は、人工林面積の10.1%となつた<sup>1)</sup>。

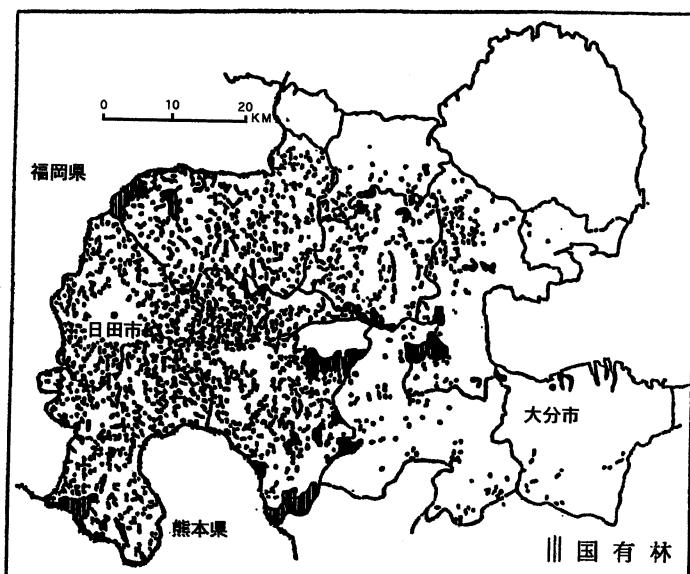


図-2 台風19号による大分県北西部の被害状況

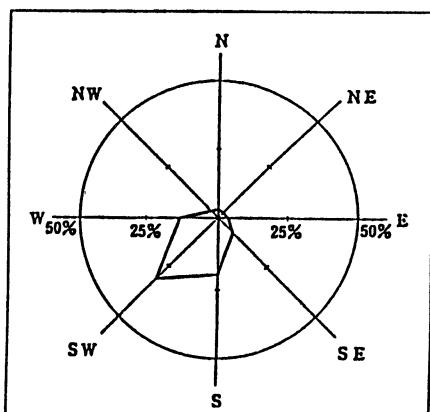


図-3 台風被害地の斜面と方位

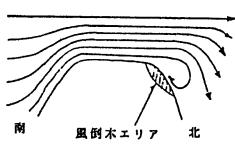


図-4 北および北東斜面における風倒木エリア

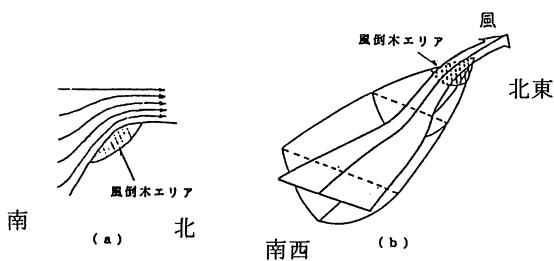


図-5 微地形における風倒木エリア

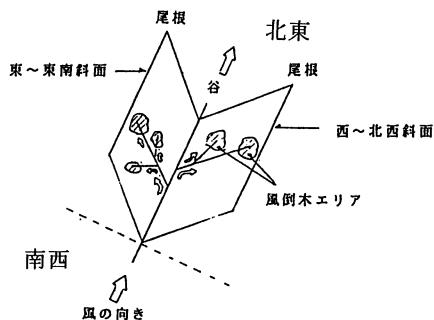


図-6 北東～南西方向の谷における風の向き

## 2-3 風倒木の発生条件

風倒木の発生を物理的な視点から見れば、発生場の条件（素因）に対してある限界以上の外力（誘因）が加わることによって風倒木は発生するものであるといえる。樹木が風圧を受けた場合の力学的モデルを図-7<sup>2)</sup>に示す。風倒木発生の素因としては、樹木そのものの大きさや分布する地域の地質条件等が考えられる。まず樹木の大きさに関しては、樹齢が数年程度の樹木はほとんど倒木を起こし

また被害規模が5～25haの被害地の斜面と方位との関係を図-3<sup>2)</sup>に示す。図-3によると南西斜面(34.0%)、南斜面(22.5%)に被害が集中していることがわかる。これは日田、大分での瞬間最大風速時の風向と一致している。さらに根返り等の被害木の倒伏方向も南西から北東方向や南から北方向が多くみられ、暴風の主風方向を推定する根拠となる。

ここで、被害が多く発生した地形の代表的な例<sup>3)</sup>を図-4、5、6に示す。図-4は東西方向に伸びた山の南と北側斜面を示す。これは風が山頂に達し尾根部を通過する際に逆流が生じ、強いせん断力が働くため北側斜面に風倒木が発生したと考えられる。図-5(a)では東西方向へ絶壁状に伸びる南斜面を示している。強風の直撃を避けられる北及び北東の斜面以外の場所では、尾根部・谷部に關係なくいたるところに風倒木の発生が見られた。図-5(b)は南に開けた谷の曲がり角の凸部斜面を示す。南及び南西向きの斜面では南南西の風が谷部から尾根に向かって上る際に加速され、尾根部で風倒木が発生したと考えられる。図-6は全面が開けた南から北方向または南西から北東方向の起伏量の大きな谷筋を示す。南西から北東に発達する谷に接している斜面の場合は谷の方向に沿って風の流れがあり、この流れに沿い風倒木が発生している。

ておらず、30~40年生に倒木が集中している。このことは、樹径が太くかつ樹高が高い樹木は投影面積が広く作用モーメントが大きくなるために倒木が発生しやすいことを意味している。また樹木が分布する地域の土質条件としては、もろくて不安定な箇所で風倒木が発生しやすいと言える。土壤に関しては、褐色森林土や黒ボク土の分布する地域は風倒木が発生しやすい条件にあると言われている<sup>3)</sup>。

次に風倒木発生の誘因としては台風時の強風が挙げられる。

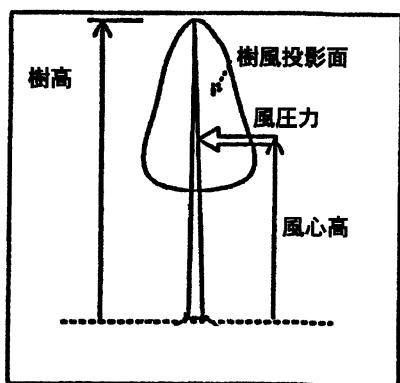


図-7 風圧を受けた樹幹及び力学的なモデル

が福岡県地方を通過している頃には渦の東あるいは南東部に入り風向きは南風から西南風に変わっている。これは大分地方気象台、その他県内の各測候所の風向記録により分かる<sup>3)</sup>。台風中心が福岡県地方を通過したあと、すなわち風向が南よりになった頃から台風自身の進行速度分が渦巻回転分に加わり結果として風速が急に大きくなつた。台風19号の場合この進行速度が非常に速く中心が日本海に入った頃には時速100キロメートル近くにもなっていた。午後8時を過ぎた頃には強風もおさまっている。表-1<sup>1)</sup>に大分地方気象台と日田測候所の最大風速と日最大瞬間風速を示す。日田地方では17時50分に10分間平均風速が16.7メートルで日最大となり17時58分に瞬間最大風速44.4メートルを記録している。このときの風向はいずれも南南西であった<sup>1)</sup>。

台風の瞬間最大風速時の風による作用モーメントが樹木の持つ抵抗モーメントを越えなければ風倒木は発生しない。しかし地形等の影響で局的に瞬間最大風速が増加した場合、風による作用モーメントが増加し風倒木が発生しやすくなると言える。地形の具体例は前節で述べた通りである。

#### 2-4 大分県の当日の風の状況

台風19号の中心が県北西部に一番接近したのは、9月27日18時頃であり福岡県内を北東方向に進んだ。図-8に日田地方における台風の位置と風向の変化<sup>3)</sup>を示す。最接近の直前には日田地方は台風の北側にあり、風は東よりであった。台風の中心

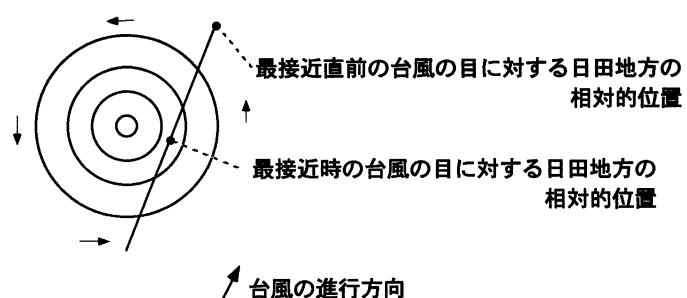


図-8 台風の位置と日田地方における風向の変化

表-1 気象官署極値表

台風名	官署名	最大風速 (m/s)			日最大瞬間風速 (m/s)		
		観測値	起 時	観測値	起 時	従来の極値	
17号	大 分	SSW14.7	14日09時40分	SSE28.8	14日07時47分	33.9	
	日 田	S 15.0	14日07時30分	S 34.3	14日07時26分	30.1	
19号	大 分	SSW18.3	27日18時50分	SSW38.3	27日17時14分	33.9	
	日 田	SSW16.7	27日17時50分	SSW44.4	27日17時58分	34.3	

### 3. 強風の数値実験

#### 3-1 モデル地形

シミュレーションに用いたモデル地形は、災害の著しかった大分県北西部松原ダム堰堤下流側の谷地形と日田市近郊小野地区の標高400メートル前後の山地尾根上部分とした。松原ダム下流の谷地形では谷の両斜面沿いに風倒木地が現れていて谷の中を強風が吹き抜けたと予測でき、谷の両斜面を解析領域に入れるため水平2次元とした。また日田市近郊の山地尾根上部分では山頂の風下側に風倒木が現れていて強いせん断力が働いたと予測できるので鉛直2次元の解析をした。

2次元の解析とした理由は以下の3点による。

- 1) 3次元の流れを支配している方程式を取り扱うことはかなり複雑であり方程式をプログラム化する時点で高度な技術を必要とする。
- 2) 水平2次元ではモデルの横幅(約750メートル)が十分広く、上下方向の風の挙動が水平方向に対して一桁以上小さいオーダーとなることから水平2次元モデルにおいても十分解析が行えると考えられる。
- 3) 鉛直2次元では地形の鉛直方向変化の影響が見られる。

#### 3-2 解析方法

##### 1) 有限要素法について

解析方法としては、現地の地形を忠実に表現するため複雑な地形を扱える有限要素法を用いた。有限要素法は、領域を要素と呼ばれる有限の大きさを持つ図形の集まりで置き換えて微分方程式の近似解を得る数値計算法の一種である。2次元領域なら有限の大きさの三角形要素で領域を置き換える。個々の要素内では区分多項式によって解の近似が行われる。各要素内での近似が完成すれば、個々の要素をつなぎ合わせて全体の近似モデルを作成する。この近似モデルは、連立代数方程式になっており、これを解くことによって微分方程式で与えられた境界値問題の近似解が得られる。図-9に水平2次元モデルの解析領域を要素分割した図を示した<sup>6)</sup>。

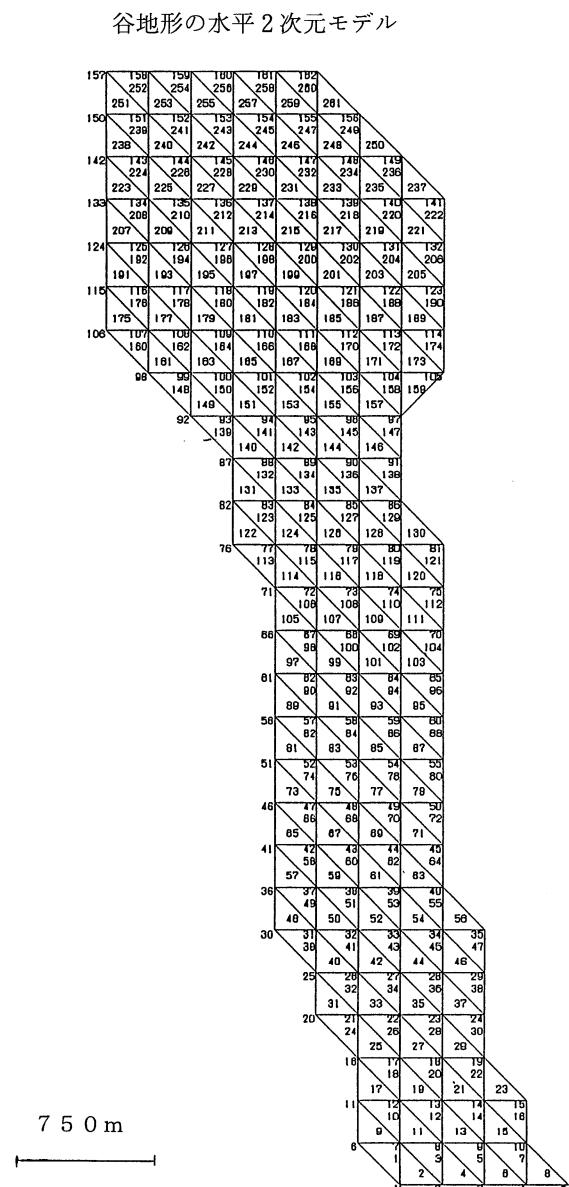


図-9 要素分割図

## 2) 定式化

流れを粘性非圧縮流とし、ナビア・ストークスの方程式を基に重み付き残差法の一つであるガラーキン法により定式化を行った。

2次元の非圧縮流れは、流れ関数  $\psi(x, y, t)$  として知られている数学的手段の導入 ( $x, y$  は2次元直角座標  $t$  は時間を表す) により、うまく取り扱うことができる。この場合運動方程式は一つの高次方程式にまとめられるが、その場合関数およびその微係数の連続性が必要となる。高次の流れ関数を用いないようにするために、流れ関数  $\psi$  の他に渦度  $\omega$  を用いる。この方法では  $\psi$  と  $\omega$  は要素間で連続でなければならないが、その微係数が連続である必要がなくなる<sup>6)</sup>。

2次元非圧縮性流れに対し、連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

のようになる。非圧縮2次元流れの場合次のように流れ関数  $\psi$  を定義することができ

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2)$$

これは  $\psi$  を恒等的に満足する。

$u, v$  はそれぞれ  $y, x$  方向の流速を表す。

渦度は、流体粒子の鉛直方向の角速度として定義される。

$$\omega = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3)$$

これより運動方程式を次のように書くことができる。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \omega \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial v}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$\nu$  は動粘性係数を表す。

$\nu$  =一定の2次元流れに対して、流れ関数による定式化を用いると、連続および運動量の方程式を結合した関係を次のように表示することができる。

$$\nu \nabla^2 \omega = \frac{D \omega}{D t} \quad (5)$$

$$\omega = -\frac{\nabla^2 \psi}{2} \quad (6)$$

$$\text{ただし } \frac{D}{D t} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla$$

式(5)および式(6)に対する自然境界条件は次のようになる。

$$S_{\omega} \text{上で} \quad \nu \frac{\partial \omega}{\partial n} = g_{\omega} \quad (7)$$

$$S_{\phi} \text{上で} \quad \frac{1}{2} \frac{\partial \phi}{\partial n} = g_{\phi} \quad (8)$$

$S_{\omega}$ は $\omega$ の境界条件を与える領域の値,  $S_{\phi}$ は $\phi$ の境界条件を与える領域の値  
 $n$ は計算領域での法線ベクトル,  $g_{\omega}$ ,  $g_{\phi}$ は境界上の渦度, 流れ関数の値を表す。  
式(5)～(8)はガラーキン法により次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \iint \left\{ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \nu \nabla^2 \omega \right\} \delta \omega dxdy \\ = \int_S \left( g_{\omega} - \nu \frac{\partial \omega}{\partial n} \right) \delta \omega ds \end{aligned} \quad (9)$$

$$\iint \left\{ \frac{1}{2} \nabla^2 \phi + \omega \right\} \delta \phi dxdy = \int_S \left( \frac{1}{2} \frac{\partial \phi}{\partial n} g_{\phi} \right) \delta \phi ds \quad (10)$$

$\delta$ は変分を表す。

$\nabla^2$ の項を部分積分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \iint \left\{ \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \delta \omega \right. \\ \left. + \nu \left( \frac{\partial \delta \omega}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \delta \omega}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right\} dxdy = \int_S g_{\omega} \delta \omega ds \end{aligned} \quad (11)$$

$$\iint \left\{ -\frac{1}{2} \frac{\partial \delta \phi}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial \delta \phi}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \omega \delta \phi \right\} dxdy = \int_S g_{\phi} \delta \phi ds \quad (12)$$

次に領域を要素に分割し各要素に対して $\omega$ と $\phi$ を次式のように近似する。

$$\omega = \phi^T \omega^n \quad \phi = \phi^T \psi^n \quad (13)$$

$\phi$ は補間関数であり,  $\phi^T$ は $\phi$ の転置行列,  $\omega^n$ と $\psi^n$ は節点での渦度と流れ関数のベクトル値である。

式(13)を式(11), (12)に代入すると次式を得る。

$$\delta \omega^n \cdot {}^T \{ M \omega^n + A \omega^n + \nu K \omega^n - B_{\omega} \} = 0 \quad (14)$$

$$\delta \phi^n \cdot {}^T \{ \frac{1}{2} K \phi^n - B_{\phi} - M \omega^n \} = 0 \quad (15)$$

このとき

$$M = \iint \phi \phi^T dxdy \quad (16)$$

$$A = \iint \phi \{ \phi, {}_y^T \phi^n \phi, {}_x^T - \phi, {}_x^T \psi^n \phi, {}_y^T \} dxdy \quad (17)$$

$$K = \iint \{ \phi, {}_x \phi, {}_x^T + \phi, {}_y \phi, {}_y^T \} dxdy \quad (18)$$

$$B_{\omega} = \int_{\omega} \phi_s g_{\omega} ds \quad B_{\phi} = \int_{\phi} \phi_s g_{\phi} ds \quad (19)$$

$M$ は流れに関するマトリックス

$A$ は移流のマトリックス

$K$ は拡散に関するマトリックス

$B_{\omega}$ は境界での渦度のベクトル  $B_{\phi}$ は境界での流れ関数のベクトル

$\phi_s$ は境界での $\phi$ の値をそれぞれ表す。

式(14), (15)は任意の $\delta \omega$ ,  $\delta \phi$ に対して成り立つ。したがって一つの要素に対して次式を得る。

$$\dot{M}\omega^n + A\omega^n + \nu K\omega^n = B_{\omega} \quad (20)$$

$$\frac{1}{2}K\phi^n = B_{\phi} + M\omega^n \quad (21)$$

これをすべての要素について重ね合わせると、全領域について次式が得られる。

$$\dot{M}\Omega + A\Omega + \nu K\Omega = B_{\omega} \quad (22)$$

$$K\Psi = B_{\phi} + M\Omega \quad (23)$$

注) ここでの $\Omega$ は $\omega$ の全領域での和,  $\dot{\omega}$ と $\dot{\Omega}$ は時間微分を表す。

境界上での $B_{\omega}$ の値は次式で求める。 $\Psi_w$ と $\Omega_w$ は壁面での値,  $\Psi$ と $\Omega$ は壁から $\ell$ だけ離れた位置での内部点の値である。

$$\Omega_w = - \left[ \frac{3(\Psi_w - \Psi)}{2\ell^2} + \frac{\Omega}{2} \right] \quad (24)$$

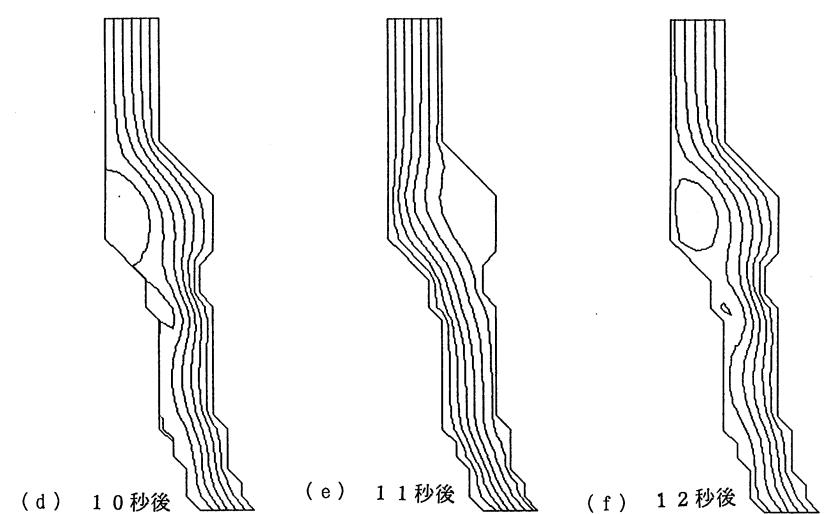
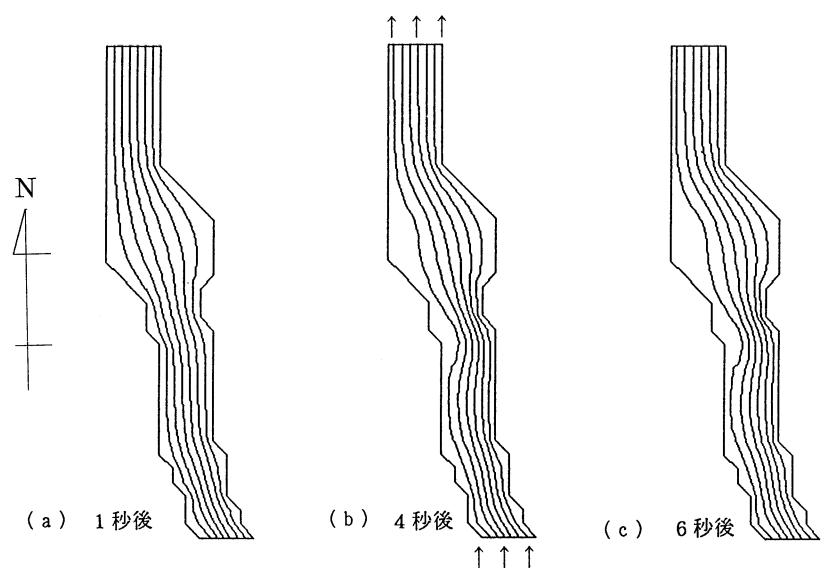
### 3-3 実験条件と結果

#### 1) 水平2次元モデル

数値実験の条件は山地での観測点が非常に限られていたため大分県北部の耶馬溪ダムでの風向・風速記録を採用した。風速が最も大きかった午後6時の前後30分は平均して約20メートル/秒の風がありその方向はほぼ南向きで一定していたので、この事実より南向きの風速20メートル/秒の一定の風を与えた。数値実験の結果を図-10に示す。風が吹きはじめた時からすぐに流線の蛇行がはじまり、谷の幅が狭いところでは流線が特に密になってその左右の振動が大きくなつた。10秒経過してからは谷の幅が広がるところで大きな渦が発生し後流と呼ばれる領域ができた。その後も時間とともに渦が大きくなつた。

#### 2) 鉛直2次元モデル

このモデルについても20メートル/秒の風が吹いているという条件にした。図-11, 12に結果を示す。風が流れて最初の山を越える所で渦が発生している。次の山では渦は発生しなかつた。このモデルでは実験を開始して直ちに図の状態となり、その後も変化はなく定常な流れになった。



↑印は風の向きを示す

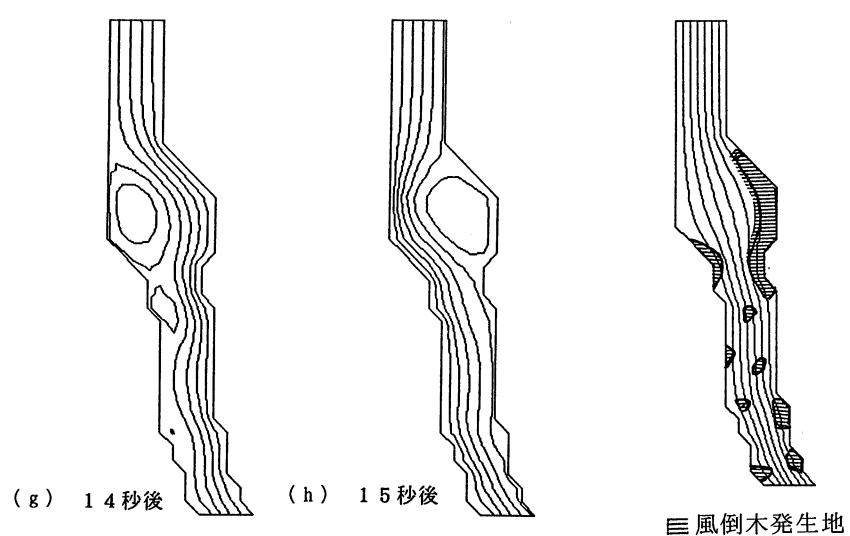


図-10 水平2次元の流線図・風倒木発生位置図

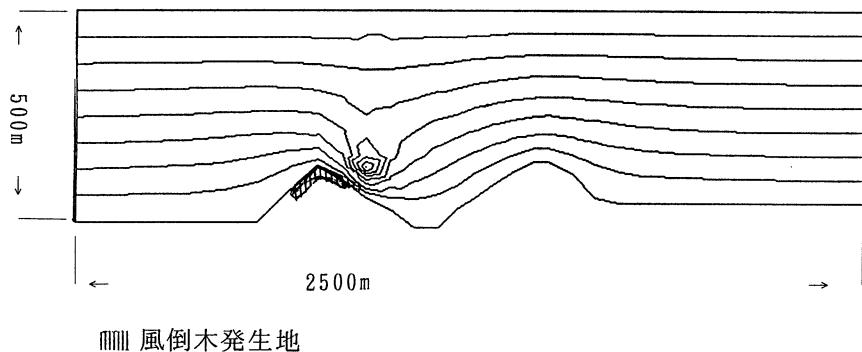


図-11 鉛直2次元の流線および風倒木発生位置図

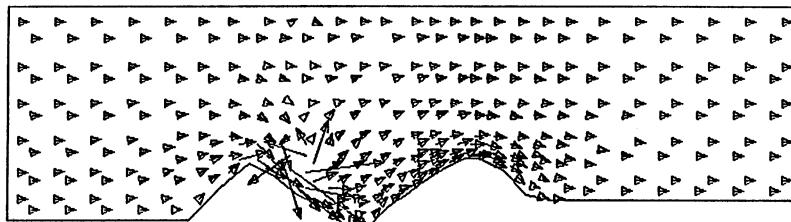


図-12 風のベクトル図

#### 4. 考 察

##### 4-1 現象の説明

2つのモデルに共通して起きた現象があった。それは風の流路（谷の幅や鉛直長さ）が急に大きくなるところで後流を伴う渦が発生したことであった。この現象が起きた原因の一つに粘性流体（空気、水など）の流れを特徴づける $Re$ （レイノルズ数）の急激な変化が挙げられる。 $Re$ は一般に $Re = \text{代表長さ} \times \text{流速} / \text{粘性力}$ で表される。この実験の場合「代表長さ」が「風の流路の幅」、「流速」が「風速」にあたる。 $Re$ が大きければ流れは乱流になり、小さければ層流になる。流路が急に大きくなるということは $Re$ が小さな状態から急に大きくなるという変化も同時に引き起こしているので、先にも述べたように流れが層流状態から乱流状態へと導かれやすい。そのため後流を伴った渦が発生したと考えられる。

次に水平2次元で起きた流線の蛇行現象についても渦が関わっている。この現象を導く渦というものは境界条件の渦度によって規定され発生したもので境界上に存在する。この渦の影響により流線の方向が絶えず乱れたと説明できる。

##### 4-2 流線と実際の風倒木発生地との比較

航空写真で判読した風倒木発生地を図-10, 11に記した。実験結果で流線が密になった風速の速い

ところや渦の周囲は、ほぼ実際の風倒木発生地と重なっていた。しかし流線が疎なところでも風倒木が発生していた。これは土壤の柔らかさなど素因による影響もしくは、数値実験が水平2次元または鉛直2次元の解析であるため3次元の風の挙動を十分に表現できていないためと考えられる。また数値計算上の結果から得られた風速の絶対値が渦のところで過大評価された。

## 5. おわりに

予測しがたい風倒木発生地を数値実験により予測、説明が可能であると考えられる。今後は3次元の解析を行うことで2次元では表現できなかた風の動きや数値計算上での絶対値の問題を解決することが望まれる。

最後に本研究にあたっては、大分県、耶馬渓ダム管理所より貴重な資料、データを頂いた。記して謝意を表する。

## 引用文献

- 1) 大分県林業試験場：研究時報第18号 pp. 4 – 6, 1992
- 2) 台風19号等災害復旧対策調査委員会編 報告書 pp.10, 27, 48, 1992
- 3) 大分県日田土木事務所：宮田川通常（荒廃）砂防事業における調査 報告書 pp. 25, 1992
- 4) 大西和栄・林健次・遠山洋・二之宮弘：パソコンによる流れ解析 pp. 5, 88–98, 朝倉書店, 1986
- 5) 島田守家：暴風・台風びっくり小事典 pp.14, 講談社, 1992
- 6) 川嶋康彦：強風災害の数値実験 未発表 平成4年度森林資源学科卒業論文