

2004 年インド洋大津波におけるインドネシア・バンダアチェでの マングローブ林の潜在的減災効果

The Potential Role of Mitigating Effects of Mangrove Forest against
The 2004 Indian Ocean Tsunami in Banda Aceh

柳澤英明¹・越村俊一²・宮城豊彦³・大家隆行⁴・今村文彦⁵

Hideaki YANAGISAWA, Shunichi KOSHIMURA, Toyohiko MIYAGI
Takayuki OIE, Fumihiko IMAMURA

We investigated the damage of mangroves by the 2004 Indian Ocean tsunami at Banda Aceh, Indonesia. We clarified that no mangroves could have survived in the west of Banda Aceh affected by more than 10 m height of tsunami, although more than 50 % of mangroves with 20-25 cm stem diameter could have survived in the east of Banda Aceh affected by 5-7 m height of tsunami. We simulated the 2004 Indian Ocean tsunami to investigate the impact on mangroves. Based on our field observation and numerical simulation, we estimated the destruction limit of mangroves using the relationship between the stem diameter and computed-tsunami bending moment. Furthermore, we evaluated the potential mitigating effect of mangroves at Banda Aceh using the numerical model with the destruction limit considered.

1. はじめに

2004 年インド洋大津波が襲来したタイやインドでは、マングローブ林などの海岸林が津波の被害軽減に大きく寄与したことが報告され、その効果への関心が高まっている(田中ら, 2005; Danielsen ら, 2005)。しかし、海岸林は津波外力によって破壊され、その減災機能を失うのみならず漂流物化してしまう危険性もある(首藤, 1985)。そのため防災に利用する上で、その限界も十分把握しなければならない。樹木の破壊限界を示す研究には、過去の津波被害から定性的に破壊限界を推定したものや樹木を人工的に引き倒し、そのときの曲げモーメント力を測定したものがあ(首藤, 1985; 渡邊ら, 1996; リバーフロント整備センター, 1999; 今井ら, 2005)。しかし地盤強度や根の生育状況など個々の樹木特性によって測定値にはばらつきがあり確定論的な議論が難しく、またこれまでの研究手法では測定できるデータ量に限界がある。そこで本研究ではインドネシア・バンダアチェ市の海岸に分布するマングローブ林を対象に、実際に 2004 年インド洋大津波によって被害を受けたマングローブの破壊状況を調査し、津波の再現計算から評価した曲げモーメント力と比較することで、津波に対するマングローブ林の破壊限界を検討した。また破壊限界に基づきマングロー

ブ林の津波氾濫流に対する抵抗則を考慮した数値解析を行うことで、インドネシア・バンダアチェ市で期待されるマングローブ林の減災効果を評価した。

2. 対象地域

研究対象地域は、図-1 に示すインドネシア・バンダアチェ市である。バンダアチェ市の海岸には、汀線から約 1 km にわたってエビの養殖池が造成されており、その合間にマングローブの森がいくつか点在している。元来、この地域には広大なマングローブ林が分布していたが、その大部分が森林伐採されエビ養殖池に転換された。そのため海岸線から居住地までの間、そのほとんどがエビ養殖池となっており津波の障害物となるものはほとんどない状態であった。2004 年 12 月 26 日にこの地域を

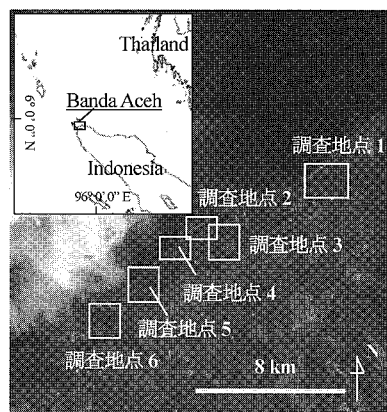


図-1 研究調査対象地域(スマトラ島北部・バンダアチェ, 95°19'00" E, 5°35'00" N)

1 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正 会 員 博(工) 東北大学大学院工学研究科
3 博(理) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
4 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
5 正 会 員 工博 東北大学大学院工学研究科

襲った大津波は、海岸線から約 4 km 内陸まで遡上し、パングアチエ市で死者・行方不明者が 7 万人を越える大災害を引き起こした (大家ら, 2006)。

3. 研究手法

(1) 現地調査

調査は 2006 年 12 月 12 ~ 16 日の日程で行われ、図-1 の調査地点 1 ~ 6 において合計 789 本のマングロープを調査し、樹径の測定、津波による破壊の有無、破壊高さ、位置情報の記録を行った。本研究では、主にこの地域で最も群生し、一般的に東南アジア諸国で植林されている *Rhizophora* 種を対象とした (写真-1(a))。



写真-1 (a) パングアチエ市の *Rhizophora* 種 (b) 支柱根上で折れた *Rhizophora* 種

(2) 数値解析

2004 年インド洋大津波の再現計算を行うにあたり、計算領域を広領域 (最大: 1860 m グリッド) から狭領域 (最小 23 m グリッド) へ格子サイズを変化させながら接続計算を行った。計算領域はインド洋全体から、パングアチエ市までを 5 領域に分けて行った (大家ら, 2006)。支配方程式には、広領域では地球座標系の線形長波方程式を、狭領域における遡上計算には底面粗度を考慮した非線形長波方程式を利用した。さらに断層モデルには、Manshinha・Smylie (1971) を利用し、断層パラメータには、大家ら (2006) を参考とした。また、底面粗度係数は小谷ら (1998) に倣い、土地利用に応じた粗度係数 (Vegetation=0.03, Pond and River=0.025) を与え、住宅密集地には衛星画像より目視判読によって抽出した家屋データを用いて、合成粗度モデルにより底面粗度係数を決定した (油屋ら, 2002)。

4. 結果

(1) 現地調査結果

今回調査したマングロープ林 (*Rhizophora* 種) の破壊パターンは、支柱根上数十センチでの破断が多く、この傾向は著者らのタイ・パカラン岬における調査結果と一致する (柳澤ら, 2006)。 *Rhizophora* 種の場合、支柱根が地盤をしっかりとつかんでいるため、地盤が侵食さ

れない限りは、根上がりや抜根などの根から破壊されるパターンはほとんどみられない (写真-1(b))。今回の調査データにおいて、破断位置は平均で約 1.5 m であった。次に、調査地点ごとに測定した *Rhizophora* 種の生存率を図-2 に示す。図-2 は、図-1 の調査地点 1, 4, 5, 6 において、樹径ごとに破壊樹木と生存樹木を整理し、生存率をプロットしたものである。調査地点 1 ~ 5 では、樹径の大きさに関連し、生存率が高くなっており、どの地点でも樹径が 20-25 cm 以上ある場合には、50 % 以上の生存率を維持していた。著者らが行ったタイ・パカラン岬での調査 (柳澤ら, 2006) においても、20-25 cm の樹径のものは 50 % 以上の生存率が確認されており、定性的には 20-25 cm 以上の *Rhizophora* 種が先駆する樹林帯が形成されていれば、大抵の津波には耐えられるものと推定できる。ただし、今回の調査で最も西に位置する調査地点 6 では、被害が大きく樹径が 35-40 cm の巨木もすべて破壊されていた。この地点では、10 m 以上の津波高が確認されており (松富ら, 2005)、この規模の津波になるとマングロープ林の津波減衰効果は

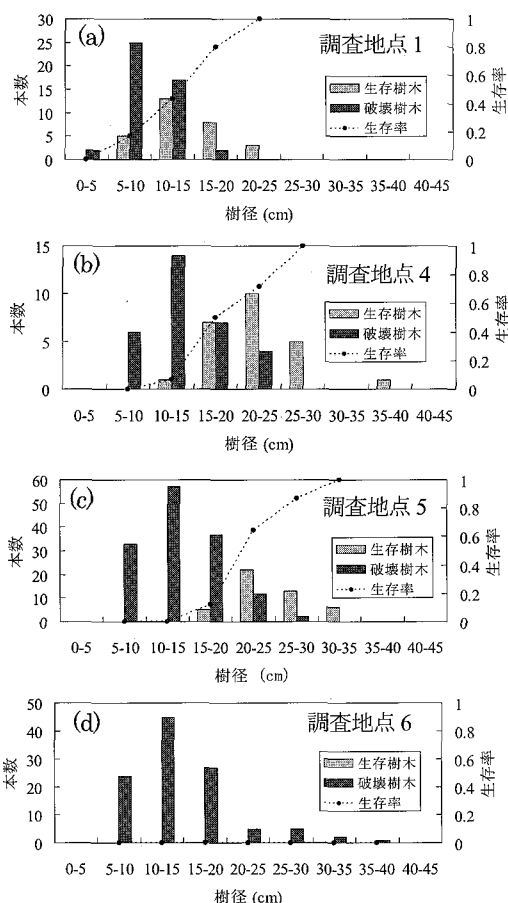


図-2 調査地点 1, 4, 5, 6 における生存率

無効になってしまうといえる。被害の全体的な傾向としては、パンダアチェ市西で被害が大きく、東に行くに従い、生存率が増加する傾向となった(図-2(a)~(d))。

(2) 数値解析結果

数値計算の精度を検証するため、実測値との比較を行う。図-3(a)に、実測により得られた浸水域(JICA, 2005)と本計算結果との比較を示す。津波は、汀線より約4km遡上しており、計算結果はその範囲をよく再現している。また図-3(a)に示すLine1, Line2, Line3に沿って計算で得られた最高水位と松富ら(2005)による実測結果を比較した結果、市街地での局所的な変動を除き、計算値はほぼ実測値を再現した(図-3(b)~(d))。以上より本モデルは、パンダアチェ市での津波の流動状況を検討するにあたり十分な妥当性を持っていることが確かめられた。

数値解析によれば津波発生から約40分後、パンダアチェ市海岸に津波の第一波が到達する。津波は、図-3のLine3周辺で特に大きく、海岸近くでは津波高は10mを越えた。これは地震の震源域がアチェ市の西方にあるため、津波の影響を強く受けたものと考えられる。一方、Line3から東に行くに従い津波高は減少し、海岸線付近で5~7m程度になる。この津波高の変化は、マングローブ林の被害状況とも一致している。

(3) アチェ市におけるマングローブ林の破壊限界

現地でのマングローブ林の被害調査および、津波の数値解析より、マングローブ林の破壊限界は樹径の大きさ、

津波の外力に関係していると考えられる。そこで本研究では、2004年インド洋大津波の再現計算によりマングローブに作用する曲げモーメントを算定し、樹径との関連性を検討した。津波による曲げモーメント力の評価には、抗力を主な作用力とし、実測により測定した平均折れ高さ(1.5m)を回転点とした以下の式で算定した。

$$M = \frac{1}{4} C_d \rho u^2 d (D - H)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M は津波による曲げモーメント力、 C_d は抗力係数、 ρ は水の密度、 u は流速、 d は樹径、 D は浸水深、 H は平均折れ高さである。抗力係数の値は、Masselら(1999)を参考にレイノルズ数に応じて変化させた。枝葉部の影響については、成長した *Rhizophora* 種の場合、下枝高さは地面から6~10m程度あり枝葉部が大きく浸水するケースは少なく、また浸水した場合には幹よりも早く破断する場合も多いため、今回は無視できるものと仮定した。図-4に、現地調査によって得られたマングローブ林の樹径とその地点での曲げモーメント力に対し、破壊および生存している樹木ごとにプロットした結果を示す。さらに図には、静的引き倒し試験によって評価された日本の樹木に対する倒伏限界モーメントの回帰式も示した(渡邊ら, 1996; リバーフロント整備センター, 1999; 今井ら, 2005)。図-4によれば、マングローブ林の津波による破壊は、樹径が小さいほど、また曲げモーメント力が強いほど多くなる傾向となった。また既往の研究における倒伏破壊モーメントと比較するとリバ

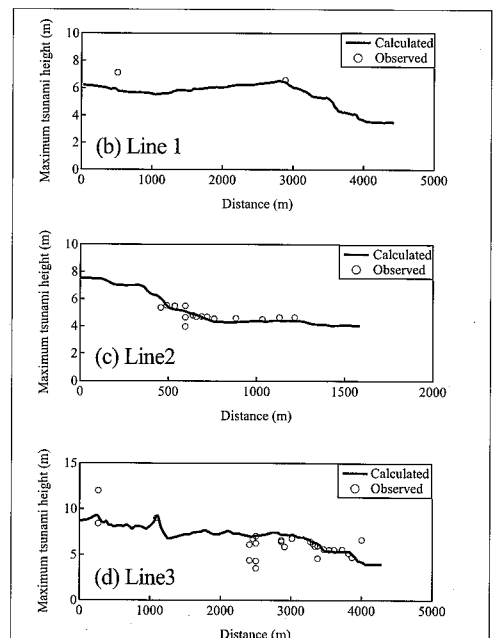
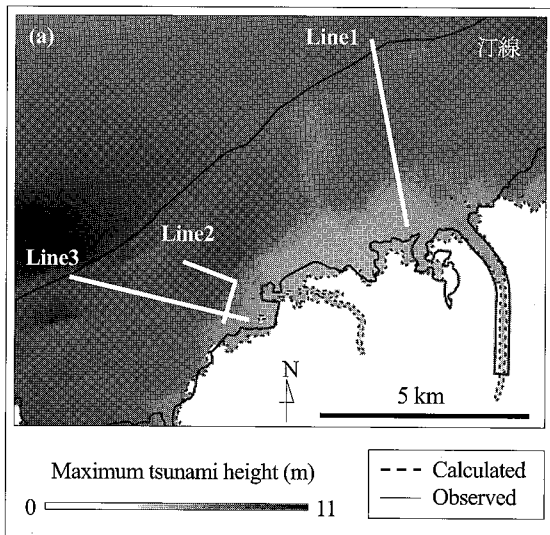


図-3 数値解析と実測地の比較。(a): 浸水域の実測値と計算値の比較, (b), (c), (d): (a)の汀線方向の端点を0としたLine1~3における最大津波高の比較。

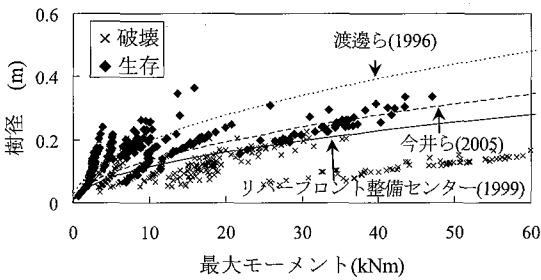


図-4 マングロープの樹径と最大モーメントの比較

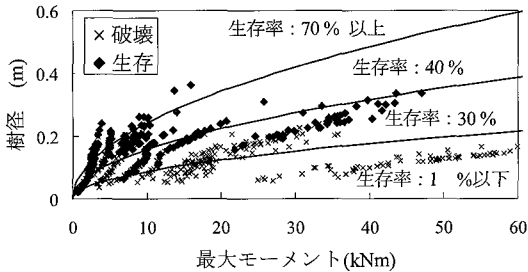


図-5 生存率に応じたマングロープ林の破壊限界線

ーフロント整備センター (1999) の回帰式は、図-4 で生存が始まる境界付近に位置する結果となった。樹種や破壊パターン、測定数、曲げモーメントの支点高さなどが異なるため直接的な比較で強度を議論することはできないが、本研究の結果は既往の研究に近い傾向となった。本研究ではマングロープ林の破壊限界のばらつきを考慮するため、図-5 において生存率が 70 %, 40 %, 30 %, 1 % となる領域を定義し、樹径の 2 乗に比例する以下の

式で破壊限界線を決定した。

$$\begin{cases} \bullet \text{ 生存率 } 40 \sim 70\% & M = 1.7 \times 10^5 \times d^2 \\ \bullet \text{ 生存率 } 30 \sim 40\% & M = 4.0 \times 10^5 \times d^2 \dots (2) \\ \bullet \text{ 生存率 } 1 \sim 30\% & M = 1.3 \times 10^6 \times d^2 \end{cases}$$

ここで、 M は曲げモーメント (Nm)、 d は樹径 (m) である。これによりマングロープの樹径、および津波による曲げモーメント力を決定することで津波規模に対するマングロープの生存率を評価することが可能となった。

(4) バンダアチェ市におけるマングロープの津波減災効果

バンダアチェ市には、元来、広大なマングロープ林が海岸に広がっていたが、近年、大規模なエビ養殖池転換によって、その多くが伐採された。そのため、2004 年インド洋大津波の襲来時には、まばらな疎林となっており十分な津波防波効果は得ることはできなかった。しかし、森林伐採前のマングロープ林の状態が維持されていたならば、津波被害は大きく軽減されていた可能性がある。そこで、本研究では過去バンダアチェ市に存在していたマングロープ林の範囲を現地での地質・地盤高調査から推定し (図-6)、2004 年インド洋大津波に対して、森林伐採前のマングロープ林が津波対策として有効となりえたのかを数値解析によって検討した。マングロープ林の津波氾濫流に対する抵抗則には、油屋ら (2002) の合成等価粗度モデルを利用し、さらにマングロープ林の破壊を考慮するため時間ステップごとに曲げモーメント力を算定し、式 (2) の破壊限界線に応じ時間発展的に生存率および抵抗則を変化させた。マングロープ林の条件には *Rhizophora* 種を想定し、樹径が 20 cm、密度

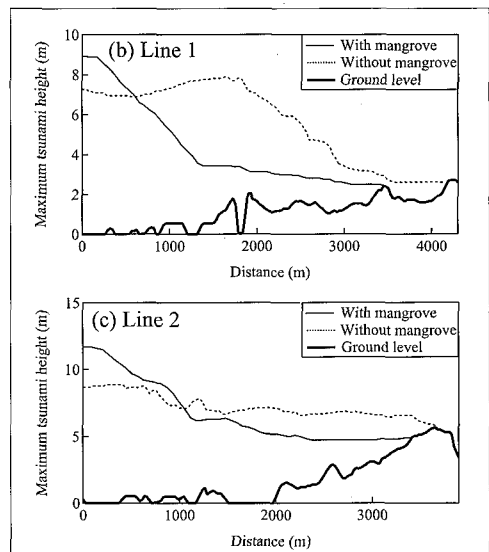
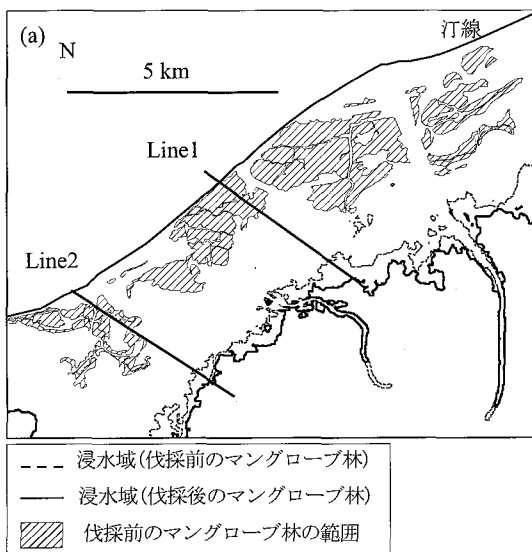


図-6 2004 年インド洋大津波に対するマングロープ林の減災効果。(a)：伐採前と伐採後のマングロープ林を考慮した場合の浸水域 (b), (c)：(a) の Line 1, 2 における最高津波高の断面図

0.25 本/m²で数値解析を行った。*Rhizophora* 種の支柱根形状については、タイで行った調査結果に基づき決定した(柳澤ら, 2006)。

図-6に、森林伐採前と伐採後(現在)のマングローブ林の状態の数値解析を行ったときの浸水域と津波高を示す。図-6, Line2では津波が大きくマングローブ林の多くが津波によって破壊されてしまうため、伐採前の状態であっても津波防波効果は小さいが、Line2から東に行くに従い津波規模が減少し生存率も増加するため、図-6のLine1上では、伐採後に対し、伐採前のマングローブ林背後では津波高を最大73%減衰させた。Line1周辺の背後地には、バンダアチェの市街地があり、森林伐採前のマングローブ林は津波による人的・物的被害を大きく低減できるものと考えられる。本来、バンダアチェ市は、マングローブ林により自然災害から沿岸域が守られていた地域であり、今後、人為的に失われたマングローブ林を再森林化していくことで、津波災害を軽減できることが示された。

5. ま と め

本研究の成果を以下に列挙する。

- (1) インドネシア・バンダアチェ市の海岸を対象として、マングローブ林の被害調査を行った結果、バンダアチェ市の西では被害が大きく、35-40 cmの樹径のマングローブ林もすべて破壊されていた。一方、東に行くに従い生存率が上がり、20-25 cm以上の樹径があれば、50%以上は生存可能であることが分かった。
- (2) 2004年インド洋大津波の再現計算を行いバンダアチェ市海岸の津波高を検討した結果、バンダアチェ市の西では津波が10 mを越えるが、東に行くに従い減少して5-7 m程度となることが分かった。
- (3) 津波計算からマングローブ林に作用しうる曲げモーメント力を算定し、樹径の大きさと比較した結果、生存率に応じた破壊限界線を示すことができた。
- (4) (3)で示した破壊限界を数値解析におけるマングローブ林の抵抗則に考慮し、元来バンダアチェ市で存在していたマングローブ林による津波防波効果を評価した結果、2004年インド洋大津波に対し、マングローブ林背後では津波高を最大73%減衰させることが可能であることがわかった。

以上の成果は、現在、アチェ市海岸で進められているマングローブの植林計画を検討するうえで重要な知見であり、今後、さらにアチェ市での植林状況、マングローブ林の成長状況を考慮し、検討を行っていく必要がある。

謝辞：本研究の一部は、平成18年度建設工学奨励金、

平成18年度笹川科学研究助成金、科学研究費補助金基盤(A)(代表：今村文彦、課題番号：18201033)によるものである。また現地調査では、Syiah Kuala大学Dr. Muzailin Affan氏らの協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 油屋貴子・今村文彦(2002)：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案，海岸工学論文集，第47巻，pp. 276-280。
- 今井健太郎・松富英夫(2005)：沿岸林による津波減災効果とその限界に関する判定図の作成，平成17年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 250-251。
- 大家隆行・越村俊一・柳澤英明・今村文彦(2006)：2004年インド洋大津波によるバンダアチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価，海岸工学論文集，第53巻，pp. 221-225。
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害予測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360。
- 首藤伸夫(1985)：防潮林の津波に対する効果と限界，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 465-469。
- 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎・Sanang Homchuen(2005)：津波防御に対する樹林幅と樹種影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果—，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1346-1350。
- 松富英夫・榊山 勉・Shindhu Nugroho, 都司嘉宣・谷岡勇市郎・西村裕一・鎌滝孝信・村上嘉謙・松山昌史・栗塚一範(2005)：Banda Acehと周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題，海岸工学論文集，pp. 1366-1370。
- 柳澤英明・越村俊一・今村文彦・宮城豊彦・林 一成(2006)：マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件—2004年インド洋大津波によるタイ Khao Lakでの被害調査—，海岸工学論文集，第53巻，pp. 231-235。
- リバーフロント整備センター編集(1999)：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp. 154-171。
- 渡邊康玄・市川嘉輝・井出康郎(1996)：洪水時における河道内樹木の倒伏限界，水工学論文集，第40巻，pp. 169-174。
- Danielsen, F., M. K. Sorensen, M. F. Olwig, V. Selvam, F. Parish, N. D. Burgess, T. Hiraishi, V. M. Karunakaran, M. S. Rasmussen, L. B. Hansen, A. Quarto and N. Suryadiputra (2005)：The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. Science, Vol. 310, pp. 643.
- JICA (2005)：The study on the urgent rehabilitation and reconstruction support program for Aceh province and affected areas in north Sumatra. JICA, 41 p.
- Manshinha, L. and D. E. Smylie(1971)：The displacement field of inclined faults, Bull. of the seismological soc. of America, Vol. 61, pp. 1433-1440.
- Massel, S. R., K. Furukawa and R. M. Brinkman(1999)：Surface wave propagation in mangrove forests. Fluid Dynamics Research, Vol. 24, pp. 219-249。