k- ε モデルによる 植生のある急勾配流れの乱れ予測

A PREDICTION OF TURBULENCE IN STEEP SLOPE FLOW WITH VEGETATION BY k- ε TURBULENT MODEL

平田吉成¹・真野明²・有働恵子³・呉修一⁴
Yoshinari HIRATA, Akira MANO, Keiko UDO and Shuichi KURE

- ¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)
²フェロー会員 工博 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)
³正会員 博(工) 東北大学准教授 災害科学国際研究所 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)
⁴正会員 博(工) 東北大学助教 災害科学国際研究所 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Vegetated flow in open channel is studied by many researchers. However, there are few studies about steep slope flows with vegetation. This study aims to predict turbulence property of this flow so as to estimate the degree of erosion at levees when flood flow occurs. Two models and two coefficients are used in this study. There are significantly different results due to the difference of coefficients which is not optimized from those which is optimized. Therefore, it is important to optimize coefficients to be applied. The prediction of turbulence property was improved by optimized coefficients in this study.

Key Words : *vegetation, k- ε model, turbulence property, steep slope flow*

1. 序論

植生のある開水路の流れ予測は治水, 利水, 親水等の目的から数多くの研究がされてきた. そのほとんどは河川を対象にした, 緩勾配流れに関する研究であり, 急勾配流れを対象とした研究は僅かにしか存在しない. 植生のある急勾配流れの予測が可能となればそれに対応した状況, 例えば堤防越流時の侵食予測が可能になる. 特に近年においては気候変動による局地的豪雨や大雨の頻発により計画高水位超過洪水の危険性が増していることから, この研究への需要は高まると考えられる.

また, 2011年に起きた東北地方太平洋沖地震では東北地方太平洋沿岸に大津波が押し寄せた. その際, 盛土上に植林されていた海岸林にも大きな被害が出た. 海岸林の被災形態は倒伏, 折損, 流出の3つに分類されているが, 盛土上の海岸林では津波により盛土の裏法面が侵食され, 木が根元から流出するというケースが発生している. このようなケースからまた, 植生のある急勾配流れにおける土砂侵食の予測が重要になると考えられる.

このような需要に対して, 国土交通省は旧堤防を

用いた実スケールの越流実験を行い, 植生を残した場合, 植生を短く刈り取った場合, 植生をはぎ取った場合について検討し, 植生を短く刈り取った場合が最も堤防本体の侵食が遅くなるという結果を得ている¹⁾. これは越流に対して堤防を長い時間もたせるための有用な知見である. しかし, なぜ植生が侵食を遅らせるのか, そのメカニズムは調べられていない.

植生のある開水路に関する研究の流れ予測は数値解析で行われている. 乱流の数値解析においては計算時間が短く, モデルも簡易であるk- ε モデルが広く用いられているが, 精度の高い予測は植生のある流れにおいて困難である. そのような中で様々な手法が提案されk- ε モデルの改良が行われ, 緩勾配流れにおいて模擬的な植生層内部の乱流構造までもを説明する乱流モデルが提案されている²⁾. しかし, これらを堤防越流のような急勾配流れに適用し, 植生の影響により変化した流れを精度良くモデル化した例はない. 急勾配流れの特徴として流れが射流であることが挙げられる. そのため流れに乱れが発生し, 土砂の輸送特性が常流と比較し活発になる事が考えられる.

本研究では, 堤防越流のような急勾配流れにおい

て、模擬植生を有する開水路実験を通じ、植生の存在による流れ構造の変化と侵食速度抑制の関係を確認するとともに、数値解析を用いて植生のある急勾配流れにおける流速、乱れを予測することを目的とする。流速、乱れの計算にはk-εモデルを使用する。しかしながら基本的なk-εモデルだけでは精度の高い予測は難しいため、既往の研究で提案されている改良されたk-εモデルを使用し、係数をモデルに応じて最適化することにより予測精度の向上を試みる。

2. 模擬植生を有する急勾配開水路実験

(1) 実験概要

本研究では、急勾配開水路を用いて、堤防法面裏に植生のある堤防に越流が起きた場合を想定したものである。実際の堤防形状は様々であるが、一般的に堤防の越流は、天端で常流から限界水深を経て射流へ移行し、法肩付近で等流水深となるものと考えられる。裏法面の流れは非常に速く、土砂水理学の観点からRouse数($R_0 \equiv \sigma_s w_0 / \kappa u_*$)を用いて検討すると、土砂粒径が0.1mm, 0.2mm, 0.3mmの場合Rouse数がそれぞれ1.7, 4.9, 7.5となり、植生等が全く存在しない場合、法面の土砂は浮遊砂として巻き上げられる条件を満足する場合がほとんどである。これらの事と空間的な制限を考慮し、水路長, 水路幅, 勾配はそれぞれ4.2m, 0.2m, 1/10としている。実験で用いた開水路の模式図を図-1に示す。

植生のモデルは、剛性の大きい非可撓性の直径3mmの竹ヒゴを選定した。国土交通省の実験では、植生を短く刈り取った場合がもっとも侵食が遅くなることが確認されており、この場合の植生は刈り込む前と比べると明らかに撓みが少なく、この植生が侵食速度の抑制に寄与している。そのため実験では、この状態のモデルとして問題の簡素化の意味も含め、非可撓性植生模型を採用した。水路の最底面に発泡スチロール板を固定し、そこに千鳥格子状に2cm間隔で竹ヒゴを差し込んだ。このときの植生密度 λ は流れの単位容積当たりの遮蔽面積で表され、0.075である。流れの中の植生の高さは、すべての実験ケースにおいて3cmとしている。流量は5L/s, 8L/s, 11L/sの3種類の条件で実験を行い、粒径は0.1mm, 0.2mm, 0.3mmの土砂を選定しこれを混ぜたペンキを下流端から上流に向かって120cm区間水路床に薄く付着させた状態の固定床のもと、実験を行っている。

(2) 実験ケース

流速の測定は、下流端から上流に向かって30cmの地点でレーザ流速計を用いて行った。最も底に近い測点を底面から0.5mmとし次いで1mm, 2mmと測定し、以降2mm間隔で底面に対して鉛直上向きに測定を進めていった。レーザ流速計の測定周波数は100Hzに設定し、各測点につき10秒間、計1000回測定し、その平均値を流速とした。測定の際は水が流

図-1 水路模式図

表-2 実験ケース

実験ケース	流量(L/s)	土砂粒径(mm)	植生	測定点
1	8	0.2	有り	FirstPoint
2	8	0.2	有り	SecondPoint
3	8	0.2	有り	ThirdPoint
4	5	0.2	有り	FirstPoint
5	8	0.2	有り	FirstPoint
6	11	0.2	有り	FirstPoint
7	5	0.2	無し	FirstPoint
8	8	0.2	無し	FirstPoint
9	11	0.2	無し	FirstPoint
10	8	0.1	有り	FirstPoint
11	8	0.2	有り	FirstPoint
12	8	0.3	有り	FirstPoint
13	8	0.1	無し	FirstPoint
14	8	0.2	無し	FirstPoint
15	8	0.3	無し	FirstPoint

れ始めてから十分に時間が経過し、定常となって水面の変動がほぼなくなった時から計測を開始した。実験は流量、水路床粒径、模擬植生の有無、測定点別で行った。行った実験ケースを表-2に示す。

また、今回の測定点は図-3に示すように青（First Point）赤（Second Point）緑（Third Point）の三点で行った。これはHuaiら³⁾が行った模擬植生を用いた実験において、計測点によって流速分布に若干の変化が見られたためである。

また、流量5L/s, 8L/s, 11L/sでのレイノルズ数($Re = Ru/\nu$)はそれぞれ20000, 40000, 55000であり、流れが乱流である事が分かる。フルード数($Fr = u/\sqrt{gh}$)はそれぞれ4.8, 5.2, 5.4となった。

(3) 実験結果と考察

a) 測定点比較

図-4に各点流速分布を示す。各点での流速差はFirst PointとSecond Pointでは3cm/s程度、First PointとThird Pointでは10cm/s程度の開きがあった。これはThird Pointの上流方向直近に模擬植生が配置されているため、流れの剥離によって流速が乱れたためだと考えられる。しかし定性的に見ればいずれも流速鉛直分布は同様の構造になっている。

図-3 流速測定点

図-4 各測定点での流速分布

図-5 流量別、植生有無による流速分布変化

図-6 粒径別、植生有無による流速分布変化

図-7 流量別植生内底層での対数則分布

図-8 粒径別植生内底層での対数則分布

b) 植生による流速抑制効果

図-5にCase4~Case9の結果を示す。Case7~9は、植生がない場合の流速分布である。図にある赤い曲線はCase7~9における滑面对数則分布を示している。流速分布は対数則に従った分布になっており、各ケースの流量の差は、流速の増加によって顕著に表れており、一方水深の増加はあまり見られない。このとき水深は等流水深となった。これはManningの流速公式などで予測される結果と合致するものである。Case4~6は、植生が有る場合の流速分布である。植生内（植生内層とよぶ）と植生外（植生外層とよぶ）で流速の分布形が異なっている。植生が無い場合のケースと比べると、大幅に流速が低減されている。また、各ケースで流量が変わっているのに関わらず、植生内層では3つのケースでほぼ同じ流速となった。流量の増加とともに水深は増えていることから、流量の増加分の流れは植生外層を通っていることが分かる。よって、植生内は流量の影響を受けにくくなっていることが分かった。植生のある流れにおいて、植生内で流速が一様分布になり、植生外で流速が速まり、水位が上がるような流速分布は清水⁴⁾の実験結果と定性的に同様であり、実験結果に信頼性があると考えられる。また、Case4~6の植生内流速分布を見てみると、底面付近とその上部、具体的には底面からの距離/植生高が0.1までの流速が加速する部分と、0.1から0.8までの流速がほぼ一定となっている部分、流速が加速する0.8以上の部分に分かれている特徴的な流速分布が得られる。植生内層において、底面にきわめて近い層（植生内低層）、その上部（植生内中層）といった2つの特徴的な分布が存在し、植生外層とあわせ3つの層が存在している。

図-6は、粒径を変えて流速分布を測定した結果を示すものである。Case13~15は、植生がない場合の流速分布であり、Case13の実験条件に対して滑面乱流の対数則分布を赤色の実線で示している。Case13の実験値は理論値に一致しており、通常の開水路乱流が再現されていることが分かる。Case10~12は、植生がある場合の実験値である。植生内層及び植生外層でも粒径により流速分布は多少変化しているがその影響は小さい。

c) 植生内低層の特性

Case4~6の植生内低層の流速分布を片対数グラフに示したものが図-7であり、0.5mm, 1mmでの測定点の流速が、青い直線で示した粗面对数則分布上にプロットされていることから、対数分布になっていることがわかる。さらに底面粒径毎のCase10~12の流速分布を示した図-8をみると、粒径が大きいCaseで流速は小さくなっており、底面粒径の影響を受けていることがわかる。すなわち、植生内底層は低層から決まる壁法則が成立している粗面乱流領域である。また、図中の実線はプロットが直線上にあることを示すものである。

3. 計算モデル

(1) 計算方法

計算モデルは清水²⁾、Katul⁵⁾の2つのモデルを使用した。それぞれ清水のモデルは水流に、Katulのモデルは気流に対応したモデルになっている。また、清水のモデルは本来2次元だが、本研究では計算時間短縮のため流れ方向成分のみを扱い、1次元モデルとして使用する。結果として清水のモデルを1次元化したモデルでは流速は再現できたが乱れは再現できず、Katulのモデルでは流速、乱れ共に再現できたが、水流に対応したものでは無かった。清水のモデルを1次元で表現したモデルを以下に示す。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\nu_t + \nu \right) \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{1}{2} C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_K} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon \\ & + C_{fk} \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U^2 \sqrt{U^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \\ & - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{f\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U^2 \sqrt{U^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

次にKatulが用いたモデルを以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_K} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon \\ & + C_{fk} \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2} \right) U - \frac{1}{2} C_{dx} \beta_d \lambda U k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) - C_5 \frac{1}{2} C_{dx} \beta_d \lambda U k \varepsilon \quad (6)$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k} \left[C_1 \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C_2 \varepsilon + C_{f\varepsilon} \left(\left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2} \right) U \right) \right]$$

$$C_5 = \frac{C_{f\varepsilon}}{C_{fk}} \quad (7)$$

$$\beta_d = C_\mu^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\alpha'} \right)^{\frac{2}{3}} C_{fk} + \frac{3}{\sigma_K}, \quad \alpha' = 0.05 \quad (8)$$

ここに、 U は流下方向の時間平均流速(cm/s)、 y は底面からの鉛直方向距離(cm)、 k は乱れエネルギー(cm^2/s^2)、 ε は乱れエネルギーの散逸率(cm^2/s^3)、 ν は動粘性係数(cm^2/s)、 ν_t は渦動粘性係数(cm^2/s)を表し、係数 $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_K, \sigma_\varepsilon$ はそれぞれ0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3, λ は植生密生度(流れの単位容積当たりの遮蔽面積)(1/cm)。清水は係数 $C_{dx}, C_{dy}, C_{fk}, C_{f\varepsilon}$ をそれぞれ1.3, 0, 0.07, 0.16とし、Katulは係数 C_5 を1.5、 β_d を4.0として計算した。

清水のモデルとKatulのモデルの違いは(5)式右辺の最終項、(6)式の右辺第2項だが、これらの項は植生の抗力により伴流が生じる際にできる、急速に拡散する小さな渦が持っているエネルギーを表している。

底面境界条件については岡部⁶⁾のモデルを参考にしている。つまり、水路床に最も近い格子点の流れが水路床上での摩擦速度 u_{*B} に規定される平衡壁面乱流になるものと仮定し、次のように設定した。

$$(\nu_t + \nu) \frac{dU}{dy} = \alpha u_{*B}^2 \quad \text{at } y = \frac{y_B}{2} \quad (9)$$

$$k = \beta u_{*B}^2, \quad \varepsilon = \frac{u_{*B}^2}{\kappa y_B} \quad \text{at } y = y_B \quad (10)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 α 及び β は係数である。 α 及び β の値は水路床が粗面の場合、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 4$ とするのが適当だとされている。水面境界条件については禰津・中川⁷⁾のモデルを参考にし、次のように設定した。

$$U_{iend} - U_{iend-1} = \frac{u_{*0} \Delta y}{\kappa h_n} \quad (11)$$

$$k_{iend} = \frac{2}{3} k_{iend-1}, \quad \varepsilon_{iend} = \frac{2}{3} \varepsilon_{iend-1} \quad (12)$$

ここで、 $iend$ は水面上に位置する計算格子点の番号、 Δy は格子点間隔である。 U の条件式は、 u_{*0} に規定される対数型流速分布から導かれている。また k および ε の条件は、禰津・中川と同様に、水面付近で乱流構造はほぼ等方性と仮定し、水面上では水深方向の変動流速のみなくなると仮定した。また水深は実験で得られたものを使用した。

以上のモデルを時間に関しては前進差分、空間については中央差分で離散化し、計算を行った。また、実験から得た等流水深 h_n を既知量として与え、未

表-9 計算ケース

実験ケース	流量(L/s)	底面土砂粒径(mm)
Case1	5	0.3
Case2	8	0.3
Case3	11	0.3

知変量 U 、 k 及び ε の変動量がひとつ前の時間ステップに対して0.1%以内に収まる条件で収束解を求めた。なお、計算対象領域は実験開水路長と同等とし、 $y = y_B \sim h_n$ の範囲で、計算格子点をこの間に等間隔(y_B)で配置した。ここで y_B は、粒径 d を用いて $y_B = 2d$ とした。

また、実測値と計算値の差を表す指標としてナッシュ指標を用いた。これは、実測値と計算値が計算領域を通じて、平均してどの程度近いを示す指標である。実験値と計算値が完全に一致すれば、この指標は1となる。定義式を以下に示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum (U_{obs} - U_{cal})^2}{\sum (\overline{U_{obs}} - U_{cal})^2} \quad (13)$$

ここで、 U_{obs} は実験流速、 U_{cal} は計算流速である。流速と乱れ強度に関してナッシュ指標を計算した。乱れ強度は、計算された乱流エネルギー(k)を以下に示すRodi⁸⁾の代数応力関係を用いて評価した。

$$\overline{u'^2} = k \left\{ \frac{2}{3} + \frac{(1-\gamma) \left(-\frac{2}{3} \frac{P_K}{\varepsilon} \right)}{c_\gamma + \frac{P_K}{\varepsilon} - 1} \right\} \quad (14)$$

ここに、 γ と c_γ はそれぞれ0.6、1.5である。

本研究では係数 C_{fk} 、 $C_{f\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε を最適化するにあたり、流速と乱れ強度のナッシュ指標の合計が最大となるような係数を採用した。

(2) 計算結果

計算ケースは流量5L/s、8L/s、11L/sの3通り、底面土砂粒径は0.1mm、0.2mm、0.3mmの3通りで計9通りの計算を行った。計算結果で掲載する計算ケースを表-9に示す。

また、計算に使用するモデルは清水のモデルとKatulのモデルの2つのモデルを使用し、係数は清水の使用したもの、それぞれの実験ケースで最適化した係数を使用した。モデルと係数の組合せを表-10に示す。それぞれの計算ケースにおける、最適化した係数 C_{fk} 、 $C_{f\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε の値を表-11に示す。ここで係数を最適化するのは水に対応したk-εモデルと気流に対応したk-εモデルでは係数の値が異なるためである^{2),5),9)}。それぞれのケースでの計算結果を図-12から図-17に示す。次いで計算で求めた摩擦速度と実測の摩擦速度の対比を表-18に示す。ここで実験における摩擦速度 u_{*b} は以下の式で評価した。

$$\frac{u(y)}{u_{*b}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8.5 \quad (15)$$

表-10 モデルと係数の組合せ

モデル名	計算モデル	係数
model1	清水	清水
model2	Katul	清水
model3	Katul	本研究

表-11 本研究で最適化した係数の値

実験ケース	C_{fk}	$C_{f\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
Case1	0.09	0.14	0.4	1.6
Case2	0.10	0.01	0.6	2.7
Case3	0.14	0.01	0.6	3.2

図-12 Case1における流速分布

図-13 Case1における乱れ強度分布

図-14 Case2における流速分布

図-15 Case2における乱れ強度分布

図-16 Case3における流速分布

図-17 Case3における乱れ強度分布

表-18 底面摩擦速度の比較

実験ケース	計算(cm/s)	実測(cm/s)
Case1	5.01	5.33
Case2	4.85	5.00
Case3	4.86	5.02

図-12, 図-14, 図-16の鉛直方向流速分布はmodel1, model2, model3で大きな違いはなく, 実測値とも良好な一致をしていることがわかる. 図-13, 図-15, 図-17の鉛直方向乱れ強度分布では, model1, model2の計算結果において植生高付近で過大評価となっており, 流量が増えると過大評価が大きくなる傾向がある. しかしmodel3では全ての流量で, 実測値と良好な一致を得ていることが分かる. これは係数の最適化が予測精度の向上において有効な手段であることを示している. また, 係数を標準値から変更したことで精度が向上した理由としては, 標準値は緩勾配を想定した数値であり, 本研究の急勾配では係数の補正值が異なるためであると考えられる. 具体的には本研究で最適化を行い, 標準値から大きく変化した乱流シュミッド数 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ は乱れの鉛直方向の輸送量を補正する係数であり, 急勾配流れではこの輸送量が緩勾配と比べて大きいため係数の値が変わったと考えられる. 係数の値を従来のものと変え, 精度の向上を図る研究は行なわれているため, 係数を変えて予測精度を向上する事は手法として適切であると思われる. 表-18の底面摩擦速度の比較では計算と実測で大きな違いは見られず, 計算によって底面摩擦速度は再現できたと考えられる.

本研究では模擬植生を有した乱流条件下での急勾配開水路実験を行い, 流速鉛直分布を調べたことにより, 植生による流れ場への影響を示した. また, この流速分布を再現できるモデルを示すことで, これまで既往研究の少なかった植生を有する急勾配流れ場構造の解明に対する一つの知見とした. 具体的には, 植生の存在によって, 植生がない場合に比べ流速が大幅に低減され, 流量の変動は主に植生外層で生じていることがわかった. このため植生内層では流量の影響をあまり受けず, 流速はほぼ一定値に保たれることがわかった. また, 植生内層は植生内底層と植生内中層に分けられ, 前者は底面粗度の影響を受ける壁法則が成り立つこと, 後者は植生抗力の影響が支配的で鉛直方向にほぼ一様な分布を示すことがわかった.

さらに, 清水, Katulの2つのk- ε モデル, 及び本研究による最適化した係数を用いて流速と乱れ強度の予測を行い, パラメータの異なる計算結果から最適化した係数により乱れ強度の予測精度向上を確認した. よって数値モデルの予測においてモデル係数の最適化は必要であると考えられる.

しかしながら本研究のようなSubmergent植生流れでは鉛直方向の乱れが発生するが, 1次元モデルでは計算できないという欠点がある. よって予測精度向上のために2次元, 3次元モデルへの拡張が必要と考えられる.

参考文献

- 1)国土交通省東北地方整備局山形河川国道事務所:平成19年度須川堤防実験解析検討業務報告書, 2006.
- 2)清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次:直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, No.447, II-19, pp.35-44, 1992.
- 3)W.X.Huai, Y.H.Zeng, Z.G.Xu, Z.H.Yang.: Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation, *Advances in Water Resources*, 32, pp.487-492, 2009.
- 4)清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀:直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.438, II-17, pp.31-40, 1991.
- 5)Gabriel G. Katul.: One-and two equation models for canopy turbulence, *Boundary-Layer Meteorol.*, 113, pp.81-109, 2004.
- 6)岡部健士, 湯城豊勝, 児島眞:植生を伴う河床上の掃流砂量に関する研究, 水工論文集第41巻, 1997.
- 7)福津家久, 中川博次:修正k- ε 乱流モデルによる開水路乱流の数値計算, 土木学会論文集 No.387, pp.125-134, 1987.
- 8)Rodi W.: A new algebraic relation for calculating the Reynolds stress, *ZAMM*, Vol.56, pp.219-221, 1976.
- 9)Benoit D.: Christian M., Numerical study of fully developed turbulent flow within and above a dense forest, *wind energy*, 11, pp.503-515, 2008.

(2013. 9. 30受付)

4. 結論