

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00633

研究課題名(和文) 河川風を利用した小型風力発電の発電量評価技術の開発

研究課題名(英文) Assessment for power generation of small wind turbines using river winds.

研究代表者

吉野 純 (YOSHINO, Jun)

岐阜大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70377688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、河川風を利用した小型風力発電の導入可能性とその発電量評価技術確立することを目的とする。強い斜面風が卓越する気象学的条件を理論的に考察し、岐阜県内において飛騨川が流れる下呂市萩原付近が強い河川風が卓越する場所であると特定した。また、現地での集中気象観測や気象モデルによる数値解析を行い、この付近にはよく晴れた早朝に強い斜面下降風が卓越することが明らかとなった。また、堤内地では堤外地に比べて、特に河川の流軸に沿う風向時に同高度で平均1.5倍程度強い風速となることが明らかとなり、2倍程度の発電量(売電価格)差が生じる試算となった。

研究成果の概要(英文)：The power generation potential of small wind turbines using river winds is estimated in this study. Theoretical equations indicate that strong winds dominate around the Hidga-gawa riverside area in the V-shaped straight mountain valley in Hagiwara, Gero City, Gifu Prefecture. Observations and simulations suggest that downward slope winds are strong in a clear early morning. The 10-min wind speed at the same level in the riverside area is approximately 1.5 times larger than that in the landside area, when the mean wind direction is along the river flow. It is estimated that the generation potential by small wind powers in the riverside area may be more than twice that in the landside area.

研究分野：水工水理学

キーワード：風力 再生可能エネルギー 環境技術 水工水理学 気象学

1. 研究開始当初の背景

風力発電は、環境負荷が小さく効率の高い再生可能エネルギーの1つとして、地球温暖化防止、エネルギー安全保障、地域雇用創出のために重要であり、国内外の多くの地に風力発電所や風力発電施設が建設されている。しかしながら、起伏に富んだ複雑地形からなる我が国では、風況に恵まれた地域はごく限られており、大型風力発電に関しては陸上から洋上へとシフトしつつある(石原ら, 2005)。一方で、近年、急激な低コスト化が進んでいる小型風力発電は、低風速(およそ3~5m/s)から発電可能であるだけでなく、需要地近く設置できることから送電コストも低く、低周波騒音による問題も少ないことから、陸上での積極的導入が期待されている(NEDO, 2014)。大型風力発電に比べて小型風力発電では倍以上の固定買取価格に設定されていることも後押しして(大型は22円/kWh, 小型は55円/kWh)、今後、風況の悪い都市部や山間部の中でも、比較的風況に恵まれている“河川域”に限れば小型風力発電の導入可能性を秘めている。

風力発電施設の適地選定の際には、一般的に、気象モデルと工学モデルを組み合わせた高分解能な風況予測技術が用いられる(榎木ら, 2012)。その中では、1kmメッシュ程度でメソスケールの風況は気象モデル(WRFやMM5など)で予測され、その出力値を工学的な計算流体モデル(いわゆる工学モデル)に初期条件・境界条件として受け渡し、多重ネスティングを施すことで、10mメッシュ程度で局地スケールの風況を予測することができる。このような風況予測技術の一例として、NEDOによるLAWEPS(Local Area Wind Energy Prediction System)が挙げられる(村上ら, 2003)。しかしながら、その構造上、詳細な地形起伏は考慮できても、河川の水温や河川周辺の地温の分布の変化を下部境界条件として考慮することはできず、河川域に吹くと言われている熱的循環の一種である“河川風”を適切に表現できていないものと考えられる(吉野ら, 2007)。

2. 研究の目的

河川域は、周囲に比べて標高が低く、いわゆる“風の道”となることで、河川風(川風)と呼ばれる比較的強い風が吹くことが知られている(岩本ら, 2009)。河川は周囲の陸地にくらべて比熱が大きく、河川上と陸上との間に気温差が生じることで、それが浮力を生み出し周囲に比べて強い風を生み出す。周囲の気温の高くなる日中(夏季)は下流側へと向かう風、周囲の気温の下がる夜間(冬季)は上流側へと向かう風が吹く。この現象は、基本的には斜面上を流れる重力流と等価であると考えられるが(小倉, 1997)、山間部では山谷風(狩野ら, 2003)や平野部では海陸風(浅井, 1996)の影響も加わることから、その構造や性質は複雑であり、これまでに十

分に理解されているとは言えない。ある地形条件ある気象条件を満たしていれば、河川風が比較的強く卓越する可能性があり、陸上であっても小型風力発電導入の好適地となると期待される。

このような背景から、本研究開発では、特に近年急激に低コスト化が進んでいる“小型風力発電”に着目し、さらに、これまでの風況予測技術において盲点となっていた“河川風”に着目することで、河川風を利用した小型風力発電の適地選定技術を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

このような背景から、次の4つの研究ステップを実施して、本研究開発の目的を達成する。

(1) 河川風の理論的考察

河川上と陸上との間の気温差は、浮力を生み、局地的な強風いわゆる“河川風”を生み出す。気温の高くなる日中(夏季)は下流側へと向かい、気温の下がる夜間(冬季)は上流側へと向かう風が吹く。河川風は、基本的には傾斜面上を滑降(滑昇)する重力流であると考えられることから、気象学的には、空気の運動方程式をスケールアナリシスにより簡略化することで、その構造や性質を理解することができる。まず、運動方程式中のバランス関係と、適当な境界条件を仮定することにより、傾斜面上を流れる空気に関する風速の鉛直分布(傾斜面に直交する軸)や定常状態での最大風速に関する理論式を導出できる。また、傾斜面上を流れる重たい空気(重力流)に関する風速の水平変化(傾斜面に平行な軸)に関する理論式を導出できる。ここで想定される環境変数は、“河川水温”、“地面温度”、“河川長”、“斜面勾配”、“重力流厚さ”、“渦拡散係数”等である。この理論的考察により、どのような地形条件や気象条件を満たしていれば河川風がより強く卓越するかを理解を目指す。

(2) 河川風の現地観測

(1)の理論的考察で得られた知見に基づき、愛知県の平野部や岐阜県の山間部の中で河川風の強まりやすい箇所を選定する。選定された河川において、河川上と陸上との間の気温差が大きくなりやすい夏季および冬季の典型的な1日間を対象として、集中的な河川風観測を実施する。複数箇所に“風速計”を設置し、河川風の日変化や空間変化を計測する。また、“放射温度計(赤外線カメラ)”により河川と河川周辺の地表面温度の分布を経時的に計測する。また、ある大型橋梁の橋脚や橋桁などに多数の“風速計”および“気温計”を設置し、高度10m以下における風速および気温の2次元断面の計測を行う。河川風内における気温の2次元断面の移動計測を行う。これら多数の観測結果に基づいて、河川風に関する理論的考察との妥当性について確認

する。

(3) 河川風を表現できる工学モデルの構築

これまでの工学モデルにおいては、下部境界条件の地表面温度は、気象モデル (1km メッシュ程度) からの空間内挿によって定義されていた。そのため、1km 以下の川幅からなる比較的小規模な河川とその周辺の地表面温度の変化を十分に表現することはできず、河川域における風速を過小評価していたものと考えられる。そこで本研究では、河川の水温と河川周辺の地温の分布を考慮できる LES モデル (Smagorinsky モデル) を構築する。これにより、河川周辺における気流計算を行う。

構築された LES モデルを用いることで、理想的条件を設定して、並列クラスターコンピュータ上において多数の数値実験を行う。まず、2次元傾斜断面における河川風の2次元理想実験を実施することで、理論的考察との整合性について確認する。環境変数である“地面温度”などに関して多数の感度実験を行うことで、河川風の最大風速に対してより感度の大きな環境変数を把握する。また、観測データとの精度検証により、構築された新しい工学モデルの妥当性を明らかにする。

(4) 小型風力発電の発電量評価

工学モデルや気象モデルを組み合わせることで、河川域における小型風力発電の発電量評価システムを構築する。気象モデルには PSU/NCAR が開発したメソスケール気象モデル MM5 (Dudhia, 1993) を採用する。初期値・境界値・同化値条件には 20km メッシュの気象庁全球モデル GSM (日本域) を使用する。計算領域は、18km メッシュ領域、6km メッシュ領域、2km メッシュ領域、666m メッシュ領域の計4段階の双方向ネスティングによって構成され、これらにより気圧配置や雲に伴う広域の風況を再現する。気象モデルの出力を単方向ネスティングにより工学モデルに引き渡すことで、河川が存在を考慮した 10m メッシュの局地スケールの風況を計算する。

構築された発電量評価システムに基づき、岐阜県内の山間部における河川域を対象として、小型風力発電の風力発電ポテンシャルを評価する。そして、これまでに得られた知見を有機的に組み合わせることで、河川風を利用した小型風力発電の導入可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 河川風の理論的考察

よく晴れた夜間から早朝にかけて、放射冷却により斜面を降りる斜面下降風が卓越することが知られている。Kondo and Sato (1984a) や Kondo and Sato (1984b) は、理想的な1次元斜面および3次元谷地形における晴天時の斜面下降風に関する理論式を提案している。

まず、1次元斜面の理論では、質量、運動量、および、熱に関する保存則より斜面上の重力流として記述され、斜面下端での定常風速 u は、

$$u = \left[\frac{g\theta}{\theta} \cdot \frac{\sin\alpha}{(1+F_s)} \cdot \frac{C_H}{C_M} \cdot l \right]^{\frac{1}{2}}$$

と記述される。つまり、1) 地表面温度と大気の温度との差 θ が大きいほど、2) 斜面の勾配 α が大きいほど、3) 斜面の長さ l が長いほど、4) 斜面での運動量のバルク係数 C_M が小さいほど、5) 斜面での熱のバルク係数 C_H が大きいほど、斜面下端での斜面下降風は強くなると理解できる。

また、3次元谷地形の理論では、1次元斜面の理論に対して、谷斜面からの質量や熱の流入が考慮されたものであり、谷地形下端での定常風速 u_v は、

$$u_v = \left[\frac{g\theta}{\theta} \cdot \frac{\sin\alpha}{(1+F_s)} \cdot \frac{C_H}{C_M} \cdot l \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\sin\alpha_v \cdot 2l_v}{\sin\alpha \cdot D_v} \right]^{\frac{1}{3}}$$

と記述される。つまり、1) 谷斜面の角度 α_v が大きいほど、2) 谷斜面の長さ l_v が大きいほど、3) 谷の幅 D_v が小さいほど、谷地形下端での斜面下降風は強くなると理解できる。

このような斜面下降風が卓越しやすい地理的条件を考慮して、本研究では岐阜県下呂市萩原を現地観測の対象地域として設定した (図1)。この場所は南北に延びる直線上のV字谷の中にあり、「益田風」と呼ばれる局地風が吹くことが知られている。AMeDAS 萩原では、岐阜県内において最も強い平均風速が観測されている。



図1 : 研究対象地域 (岐阜県下呂市萩原周辺)

(2) 河川風の現地観測

本研究では、河川風の理論的考察により選定された、岐阜県下呂市萩原を流れる飛騨川の堤外地と堤内地を対象として河川風に関する現地観測を行った。現地観測は、2016年9月10日~11日 (夏季) の期間に集中的に実施された。

図2は、堤外地であるスポーツ公園橋歩道

(地点 1), 右岸側高水敷 (地点 2) および堤内地である AMeDAS 萩原 (地点 3) における風速の 10 分平均値を時系列図で示している. この日は移動性高気圧に覆われていたために上空の一般風はごく弱い. 10 日の早朝に堤外地であるスポーツ公園橋歩道と堤内地である AMeDAS 萩原の間に大きな風速差が見られ, 堤外地では 7~8 時には最大で約 7.5m/s の風が卓越している. その頃の堤内地の風速は約 5m/s であり, 堤外地の方が約 2.5m/s (1.5 倍程度) も強いといえる. 9 時を過ぎると堤内外の風速差は比較的小さくなり, 14~15 時にかけて 4m/s 程度の比較的強い風が観測されている. その後, 風速は弱まるが, 日没後の 20 時頃から 11 日の明け方 4 時頃にかけて再び 4m/s 程度の比較的強い風が観測され, 堤外地と堤内地の間の風速差も大きくなっている. その後は, 曇天となると風速も弱まり明瞭な風速差は観測されなかった.

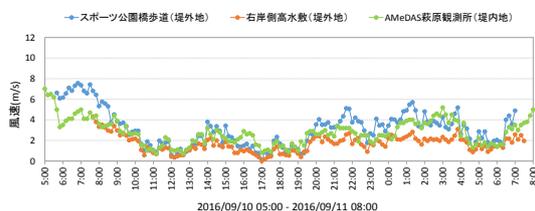


図 2: 3 地点で観測された風速の時系列 (2016 年 9 月 10 日 5:00~同 11 日 8:00)

図 3 は, スポーツ公園橋歩道 (地点 1) および AMeDAS 萩原 (地点 3) における風向別平均風速を示している. 谷地形に沿った飛騨川の流路方向に沿って風速が大きいことが分かる. 特に斜面下降風が卓越する際に風速差は大きくなることを見て取れる. 風速値の比率としては, 北風するときには約 1.4 倍, 北北西のときは約 1.5 倍堤外地のほうが堤内地よりも強い風が吹いていることが分かる. 一方で, 斜面上昇流が卓越している際には, 約 1.2 倍堤外地のほうが堤内地よりも強い風が吹いており, 堤外地における平均風速は 3m/s となっている.

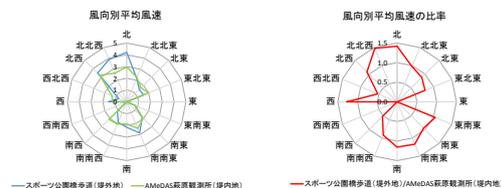


図 3: 堤外地と堤内地で観測された (左) 風向別平均風速と (右) その比率

前述の理論式により, 斜面下降風の風速を堤内地の設定で見積もったところ, 1 次元斜面の理論では, 定常風速 $u=3.39\text{m/s}$ となり, 3

次元谷地形の理論では, 定常風速 $u_0=5.75\text{m/s}$ となった. 3 次元谷地形の方が観測された堤内地における風速をより正確に表現できていると見なせる.

(3) 河川風を表現できる工学モデルの構築

領域気候モデル PSU/NCAR MM5 を用いて斜面下降風に関する再現実験を行った. 入力条件として, 大気には $20\text{km}\times 20\text{km}$ の気象庁全球モデル GSM (日本域) を使用した. また, 海面温度には, $1^\circ\times 1^\circ$ の NCEP daily SST を使用した. 計算領域は, 18km メッシュ領域, 6km メッシュ領域, 2km メッシュ, 666m メッシュ領域の計 4 段階の双方向ネスティングによって構成される.

図 4 は, 2016 年 9 月 10 日 5 時における 666m メッシュ領域により再現された 10m 高度における風速ベクトルと標高分布を示す. 観測地点付近では, 上空の一般風よりも強い北北西の風が卓越していることが見て取れる. 全体的に標高の高いエリアから低いエリアへと空気が流れており, 観測地点では, 北側に位置する山岳斜面を起源として, 谷地形を下りてくる斜面下降風が卓越していたと見なすことができる. また, 東側の御嶽山の斜面からの冷気の流入も強く影響していることが確認できる. このとき, 観測でも北~北西の風が卓越していることから, MM5 により現実に見られた斜面下降風をある程度再現できていると見なすことができる. ただし, 再現された風速は $3.5\sim 4\text{m/s}$ 程度であり, 一方で, 観測された風速は, 10 日 5 時頃には $6\sim 7\text{m/s}$ であり, MM5 による斜面下降流の風速の再現結果は過小評価となっている. このことは, MM5 内の地形再現性が十分でないことや, 河川 (飛騨川) を表現できてないが過小評価の原因として考えられる.

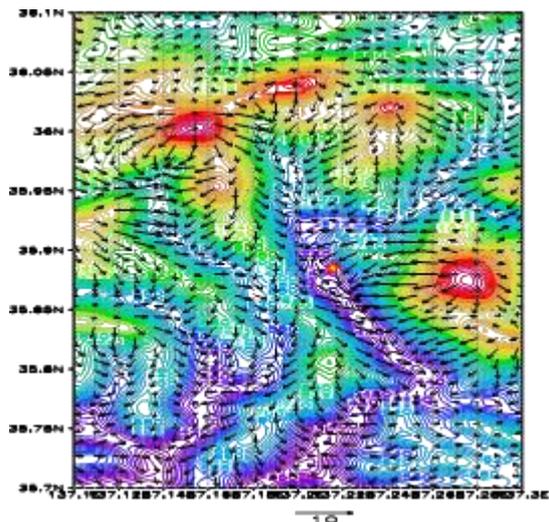


図 4: MM5 により再現された 10m 高度の風速ベクトルと標高分布 (2016 年 9 月 10 日 5 時)

そこで, 傾斜角度 θ の斜面上の非圧縮性流

体に対する、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、および、熱エネルギー方程式より、河川を考慮した斜面下降風の高解像度3次元数値シミュレーションを行った。そして、下部境界条件として壁境界条件 (Deardorff, 1972) を設定することにより、地面における運動量フラックスや顕熱フラックスをパラメータ化して与える。風速および気温に対する粗度長については、水面 ($z_0=0.0001\text{m}$, $z_\theta=0.0001\text{m}$)、または、陸面 ($z_0=0.316\text{m}$, $z_\theta=0.01\text{m}$) として、河川幅は 110m とした。陸面と周辺大気との温度差は 10°C として、 5400 秒の時間積分を行った。

図5は、高度 ($z=9\text{m}$) における x - y 断面の風速分布である。風速分布を見ると、 $x=7,000\text{m}$ より下流側の河川幅に相当する部分で強い風が卓越しており、河川中央に近づくほど風速が強まっていることが見て取れる。一方で、河川幅より外側、つまり、陸地上では河川上ほど風速は強まっていない。風速値としては、河川上で 6m/s 程度であり、陸地上で 3.5m/s 程度となっており、 2.5m/s 程度 (1.7 倍) の差が見られる。

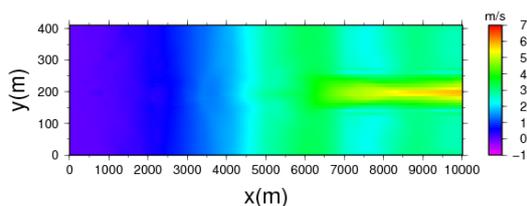


図5: LESにより再現された $z=9\text{m}$ の風速分布 (x - y 平面上)

図6は、斜面下端 ($x=10,000\text{m}$) における y - z 断面の風速分布と気温分布である。風速分布を見ると、河川上では、水面近くでも 4m/s 程度の風が吹いており、 $z=10\text{m}$ 付近で 6m/s 程度の風が吹いている。一方で陸地上では、 $z=5\text{m}$ 付近までは、風速が $1\sim 2\text{m/s}$ と小さくなっており、 $z=10\text{m}$ 付近で風速 3.5m/s 程度となっている。 10m 高度で見れば、河川上は陸地上に比べて 1.7 倍強い風が吹いていることになる。

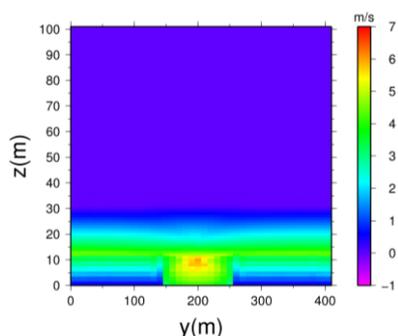


図6: LESにより再現された $x=10,000\text{m}$ の風速分布 (y - z 平面上)

(4) 小型風力発電の発電量評価

河川直上 (堤外地) における小型風力発電の発電量ポテンシャルを調べる。河川直上には AMeDAS のように年間を通した長期間の観測データは存在しないため、小型風力発電による発電量ポテンシャルを直接推定することはできない。しかしながら、現地観測や数値解析によって、河川の流路に沿った方向では堤外地では堤内地に比べて 1.5 倍程度風速が強まることが理解されているため、堤内地に存在する AMeDAS 観測データを使って、擬似的な河川直上の風速データを作成することができる。それを利用することで、小型風力発電の発電量ポテンシャルを推定できると考えられる。

ここで、小型風力発電の瞬間発電量 $E[\text{W}]$ は次式で表される。

$$E = 0.6\eta AV^3$$

ここで、式中の η はシステム全体の発電効率を示しており、小型風車の η は $20\sim 25\%$ と定義されているため、本論文では $\eta = 0.25$ とする。また、 A は風車の面積であり、ロータの半径 $R=5\text{m}$ つまり $A=\pi R^2=78.5\text{m}^2$ として計算する。 V は風速 [m/s] を示し、風速の 10 分平均値を使用し、 1 時間にわたって平均風速で定常な風が吹き続けるものと仮定する。例えば、 10m/s の風速であったとした場合、 $E=11.8\text{kWh}$ の発電量となる。ここでは、小型風力発電の定格出力を 20kW と想定し、発電量が 20kW を超えた場合にはその値を全て 20kW で頭打ちとなるように計算する。また小型風力発電のカットイン風速を 2.0m/s として計算する。入力する風速は、堤内地に位置する AMeDAS 萩原 (10m 高度) の 30 年間分の風速・風向データであり、これに対して河川直上 (堤外地) を想定した風速に修正を加えることで発電量ポテンシャルを推定する。ここで修正の際には、本研究の観測結果に基づいて (図3)、夏季・冬季ともに堤外地が堤外地の 1.0 倍以上の値を記録している北、北西、北北西、北北東、南、および、南南東の夏季・冬季の倍率を風速に乗じることで堤外地の擬似的な風速データとする。

表1: 萩原における小型風力発電の発電量ポテンシャル

	堤内地	堤外地
30年 (kW)	171,884	351,303
1年あたり (kW)	5,729	11,710
1日あたり (kW)	15.7	32.1
売電価格 (円/日)	863	1,765

表1は、萩原における堤内地と堤外地の発電量ポテンシャルの比較を示す。1年あたりの発電量は、堤内地では $5,729\text{kWh}$ 、堤外地で

11,710kWh となり、1 日あたりに換算すると堤内地では 15.7kWh、堤外地で 32.1kWh となった。売電価格は 55 円/kWh とすると、堤内地では 863 円/日となり、堤外地では 1,765 円/日となった。年間の売電価格は、堤内地では約 315,000 円となり、堤外地では約 644,000 円となった。以上より、堤外地と堤内地とでは 2 倍以上の発電量や売電価格に差が生じると言え、河川風を利用した小型風力発電の導入可能性は極めて高いことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

①Jun Yoshino, Hiroshi Ito, Tomonao Kobayashi, Observational, theoretical and numerical estimations on wind power potential in the Hida-gawa riverside area in Gifu Prefecture, Japan, Proceedings on grand renewable energy, 査読あり, 掲載決定, 2018.

②張 浚芳, 渡邊 光太, 吉野 純, 小林 智尚, 菱川 善博, 土井 卓也: 屋外太陽光モジュール性能評価のための日射変動天元フィルター法の開発, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 査読なし, p.266-270, 2017.

③渡邊 光太, 張 浚芳, 吉野 純, 小林 智尚, 菱川 善博, 土井 卓也: 日射の短周期時空間変動と大気・雲の状態との関係, 平成 29 年太陽/風力エネルギー講演論文集, 査読なし, p.261-265, 2017.

④吉野 純: 気象情報とビジネス, 中部圏研究, 査読なし, Vol. 200, p.2-13, 2017.

⑤Juna Ernesto Wyss Porras, Susumu Shimada, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi, Evaluation of the Photovoltaic System Installation Impact to an Electric Power Grid. Part 2: Impact analysis of photovoltaic installation to an electric power grid by applying a nonlinear analysis model, Labor & Engenho, 査読あり, Vol.10, No. 1, p. 17-30, 2016.

⑥ Yuanyuan Liu, Susumu Shimada, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi, Yasushi Miwa, Kiyotaka Furuta, Ensemble forecasting of solar irradiance by applying a mesoscale meteorological model, Solar Energy, 査読あり, vol. 136, pp. 597-605, 2016.

⑦Juna Ernesto Wyss Porras, Susumu Shimada, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi, Evaluation of the Photovoltaic System Installation Impact to an Electric Power Grid. Part 1: Simulation of photovoltaic generation by applying a meteorological

model, Labor & Engenho, 査読あり, Vol.9, No. 4, p. 90-102, 2015.

〔学会発表〕(計 43 件)

①吉野 純: 気象予報とビジネス, 第 287 回中部社研フォーラム, 愛知県名古屋市, 2017 年 5 月.

②吉野 純・伊藤 寛・浅井 駿汰・飯田 潤士・小林 智尚: 岐阜市長良川における河川風の現地観測と数値解析, 土木学会平成 28 年度全国大会, 宮城県仙台市, 2016 年 9 月.

③吉野 純: 河川風を利用した小型風力発電の導入可能性, 次世代エネルギー研究センター成果報告シンポジウム, 岐阜県岐阜市, 2016 年 9 月.

④吉野 純・伊藤 寛・飯田 潤士・小林 智尚: 河川下降風による風力発電ポテンシャルの評価, 土木学会平成 27 年度全国大会, 岡山県岡山市, 2015 年 9 月.

〔図書〕(計 2 件)

①木村 富士男, 日下 博幸, 藤部 文昭, 吉野 正敏, 吉野 純 他, 日本気候百科, 丸善出版株式会社, 2018, 516.

②中谷 剛, 三隅 良平, 吉野 純 他, 豪雨のメカニズムと水害対策~降水の観測・予測から浸水対策, 自然災害に強いまちづくりまで~, エヌ・ティー・エス, 2017, 434.

〔その他〕

岐阜大学局地気象予報ホームページ
<http://net.cive.gifu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉野 純 (YOSHINO, Jun)
岐阜大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70377688

(2) 研究協力者

小林 智尚 (KOBAYASHI, Tomonao)
岐阜大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50205473