

集水域の植生管理による湿地再生が 小水力発電ポテンシャルに与える影響の評価

岩川 岳史¹・佐藤 嘉展²・竹門 康弘³・角 哲也⁴

¹ 学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: iwakawa.takefumi.74u@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 愛媛大学准教授 農学部生物環境学科 (〒790-8566 松山市榊味3丁目5番7号)

E-mail: sato@agr.chime-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学准教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: takemon.yasuhiro.5e@kyoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

小水力発電による減水区間の環境影響を補償するために、集水域の植生を管理し湿地を再生した場合の流況変化を評価した。岡山県北東部に位置する落合川は、源流域に劣化進行中の湿地を持つ黒岩高原があり、その下流の急峻な流程で小水力発電事業が計画されている。湿地劣化の原因の1つは、集水域の樹林化により蒸発散量が増え湿地の地下水位が低下したことにある。そこで、集水域の蒸発散・遮断蒸発を考慮したタンクモデルを構築し、歴史的な植生変化が発電事業に寄与する発電ポテンシャルに与える影響を評価した。その結果、検討した2017年、1976年、1948年の植生分布様式の中で1948年の植生分布に管理した場合の発電ポテンシャルが最も高まるとともに流域の自然再生にも寄与することが分かった。本研究の成果は、国定公園内の水力開発のモデル事業として適用できる可能性がある。

Key Words: *small hydropower plant, hydropower development potential, wetland restoration, evapotranspiration, canopy interception*

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの観点から小水力発電の拡大が求められている。しかしながら、発電適地であっても、国定公園内などの高度な自然保全区域での水力開発の実現は現状では極めて難しい。一方、ヨーロッパ地域では、保全すべき区間と開発・利用すべき区間を明確にし、すべて不可ではなく、適切な現状評価に基づき水力開発ポテンシャルを評価している¹⁾。日本でも、水文学・水理学・応用生態工学などの学際的な連携に基づく科学的な評価手法の確立が急務であるが、現状では、流域面積当たりの維持流量が発電ガイドラインで規定されているのみ²⁾など、議論は大きく立ち遅れている。

岡山県吉井川水系落合川では、旧阿波村が主体となり、次のような基本方針により小水力開発が進められている。

- 1) 地域に貢献する小水力発電を目指す
- 2) 国定公園内の水力開発であり、発電減水区間の発生を極力最小化する

3) 一方で、発電経済性のために水量有効活用を目指す
4) その代償措置として、上流「黒岩高原」の流出機能を高めることで、発電利用と環境保全の両立を目指す

ここで、4)のような流域スケールで減水区間を改善する取り組みはこれまであまり行われていない。しかし自然再生において流域規模の対処が重要であり²⁾、減水区間の環境負荷への補償も流域単位で考えられるべきである。黒岩高原には劣化が進行してきた湿地が分布し、その一因として、戦後の人工造林と土地利用変化に伴う湿地の乾燥化・樹林化が考えられ、これを改善することで小水力発電ポテンシャルを向上させる可能性がある。

本研究では、この小水力開発をモデルに、植生管理と湿地再生が下流域の流況の改善にいかに関与するかを明らかにするため、まず蒸発散・遮断蒸発・積雪・融雪過程を考慮したタンクモデルを構築して、現地観測データを用いた河川流況の再現性を評価し、次に、植生の相違による蒸発散、遮断蒸発量の変化に着目し、上流「黒岩高原」の過去～現在～将来の植生シナリオが、流出特



図-1 黒岩高原と落合川流域

性、特に、発電事業に寄与する水量である発電ポテンシャルに与える影響について感度分析的な検討を行った。

2. 対象流域と現地調査

(1) 流域の特徴

図-1の衛星写真、図-2の縦断面図が示すように落合川の源流域には黒岩高原が広がり、その下流では急峻な斜面を落合川が流れる（以後、落合川は黒岩高原下流部を指すこととする）。黒岩高原は上段湿地、中段湿地、下段湿地の3つの湿地帯が分布している。いずれも平らな領域を流れる河道の周辺に位置しており、高原内の降雨は湿地を介して河川に流出するため、黒岩高原の植生は湿地に影響を持つ。また、黒岩高原は標高840~940mほどに位置し、落合川の金山橋地点（小水力発電所の排水口設置予定地点）も標高500mを超え、多雪地帯である。

黒岩高原は戦後に開拓され、畑作や山焼きが行われていたが、その後、規模は縮小しスギ・ヒノキが植林された。図-3に示すのは、現地調査と過去の土地利用をもとにGoogle Earthと国土地理院、地理院地図面積計算機能

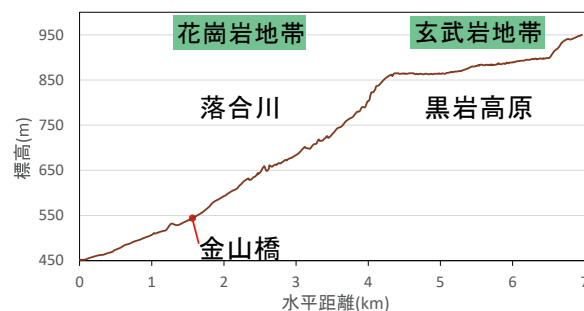


図-2 黒岩高原、落合川の縦断面図

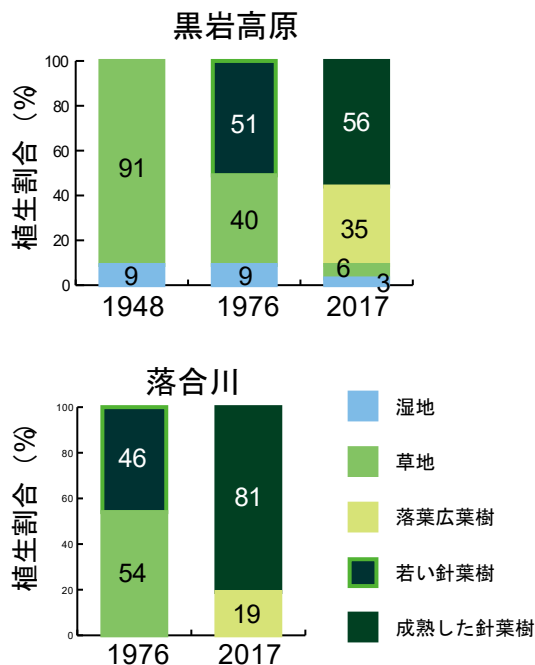


図-3 黒岩高原と落合川の植生変化

を用いて求めた黒岩高原と落合川の歴史的な植生変化である。1948年時の植生はススキの繁茂する草地と湿地であったが、1976年時では植林された針葉樹が見られ、草地の手入れが行われなくなった現在では、針葉樹が半数を占め、植林をされずに残った草地や一部湿地も落葉広葉樹林化している。また1976年から2017年で若い針葉樹の成長が見られる。落合川でも1976年と2017年を比べると、半分を占めていた草地が同様に樹林化している。森林の水源涵養機能は知られているところであるが、森林の土壌が水を涵養し地表は遮断蒸発や蒸発散により水を消費する³⁾。黒岩高原の場合、森林土壌の水源涵養機能は斜面下の湿地が果たすことができ、樹林化による水の消費が湿地の水源涵養機能を低下させると考えられる。このような流域の植生変化、湿地劣化による河川流況への影響は、戦後間もない頃よりこの地に暮らす住民が、昔に比べて落合川の水が目に見えて少ないことを指摘していることから伺える。

(2) 現地観測

a) 黒岩高原

図-1に現地観測場所を示す。気象観測として上段湿地で転倒マス式雨量計と気温計を設置し、2017年12月1日～2018年11月30日と2019年8月14日～10月31日のデータを入力データに使用した。上段湿地と中段湿地からの流出水路では、2019年8月14日～10月31日の期間で水位観測を行った。中段湿地流出水路では、台風の出水直後を含む3回の流量測定の結果からH-Q曲線を作成し、同地点の観測流量とした。また、気象観測所では景観カメラを設置し積雪・融雪の様子をモニタリングした。

b) 落合川

小水力発電所の排水口設置予定地点である金山橋で2017年8月20日～10月30日の間で水位観測を行い、その間に観測された7回の流量データを用いて、同様に観測流量を求めた。

3. 研究手法

(1) タンクモデル

流出モデルとして3段タンクモデルを用いた。1段目、2段目、3段目のタンクの側方流出はそれぞれ表面流出、表面浸透流出、地下水流出に相当する概念モデルである。

(2) 可能蒸発量の推定

可能蒸発量の推定にはMakkink式を用いた⁴⁾。Makkink式は必要な入力データは気温と日射量であるが、日射量の推定には気温の日較差による方法⁵⁾を用いたため、正味の入力データは気温のみである。

$$E_M = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{l} + \beta \quad (1)$$

ここで、 E_M ：Makkink式による可能蒸発量(mm・d⁻¹)、 α 、 β ：地点ごとの地域定数、 Δ ：飽和水蒸気圧曲線の勾配(hPa/°C)、 γ ：乾湿計定数(hPa/°C)、 R_s ：全天日射量(MJ・m⁻²・d⁻¹)、 l ：水の蒸発潜熱(MJ・Kg⁻¹)であり、全天日射量 R_s は以下の式で求まる。

$$R_s = \tau_t R_A \quad (2)$$

τ_t ：大気透過率、 R_A ：大気外日射量(MJ・m⁻²・d⁻¹)で、大気透過率の算定には以下の式を用いる。

$$\tau_t = A[1 - \exp(-B\Delta T^C)] \quad (3)$$

ここに、 A 、 B 、 C ：経験定数、 ΔT ：気温の日較差(日最高気温-日最低気温)(°C)である。

a) 実蒸発散量の推定

近藤(1998)の無次元蒸発散量と葉面積指数LAIの関係式を用いて植生ごとの実蒸発散量を推定した⁶⁾。

$$(\text{森林}) \frac{E}{E_p} = \frac{0.78}{1 + \exp\{-0.78(LAI - 2.2)\}} \quad (4)$$

表-1 設定した針葉樹(1976と2017)、落葉広葉樹(着葉期と落葉期)の葉面積指数LAI、樹体葉面の最大保水量 S_{MAX} 、樹冠の閉鎖率 Ω

	針葉樹 (1976)	針葉樹 (2017)	落葉広葉樹 着葉期(落葉期)
LAI	3	6	3(0.7)
S_{MAX} (mm)	1.5	2.0	1.0(0.5)
Ω	0.6	0.9	0.9

$$(\text{草地}) \frac{E}{E_p} = 0.45 + 0.4\{1 - \exp(-1.5LAI)\} \quad (5)$$

ここで、 E ：実蒸発散量、 E_p ：可能蒸発量であり、本研究ではMakkink式による可能蒸発量 E_M を用いた。同論文では、水田の E/E_p とLAIには明確な関係が見られず、 E/E_p は0.5～0.8の値をとっている。水田は十分に水で満たされている一方で、対象地の湿地は比高差もあり、ところにより乾燥している。この点で水田より蒸発散量が小さいと考えられる湿地の E/E_p を0.5とした。横山・及川(2000)によると、C4植物のLAIは最大で4.95と報告されているため⁷⁾、同じC4植物であるススキが繁茂する黒岩高原の草地のLAIも2を超えている可能性が十分に考えられるが、(5)式では草地のLAI>2の範囲で E/E_p の値がほとんど変化しないことから、ここでは単純化のため黒岩高原の草地のLAIの値を2とした。また冬季の草地はLAI=0とした。針葉樹(1976年)、針葉樹(2017年)と落葉広葉樹(落葉期)のLAIは近藤ほか(1992)が遮断蒸発量の計算値算出のために設定した値を参考に表-1のように設定した⁸⁾。なお、針葉樹(1976年)は疎林の設定値を当てはめている。落葉広葉樹(着葉期)のLAIは同論文でまとめられている観測値を参考に3とした。雪面からの昇華・蒸発は考慮せず、積雪のある時の草地、湿地の蒸発散量は0mmとしている。

b) 遮断蒸発量の推定

森林からの遮断蒸発量の推定には近藤ほか(1992)のモデルを用いた⁸⁾。降水強度が小さい場合は樹体にぶつかる降水の全てが遮断され蒸発する。一方、降水強度が大きい場合は、降雨中の濡れた樹体からの蒸発と降雨後に樹体に残った水分の蒸発に分けられる。

降水強度小： $\Omega^* \times Pr < I_{pot} \times (\tau_p/24) + S_{MAX}$ のとき、

$$I = \Omega^* \times Pr \quad (6)$$

降水強度大： $\Omega^* \times Pr \geq I_{pot} \times (\tau_p/24) + S_{MAX}$ のとき、

$$I = I_{pot} \times (\tau_p/24) + S \quad (7)$$

ここで、 I ：遮断蒸発量(mm・d⁻¹)、 Pr ：降水量(mm・d⁻¹)、 I_{pot} ：遮断蒸発能(mm・d⁻¹)であり上述のMakkink式で求めた可能蒸発量で代用した。 τ_p ：降水継続時間(h)、 S ：樹体表面の保水量(mm)、 S_{MAX} ：樹体表面の最大保水量(mm)、 Ω^* ：降水が樹体にぶつかる確率であり、

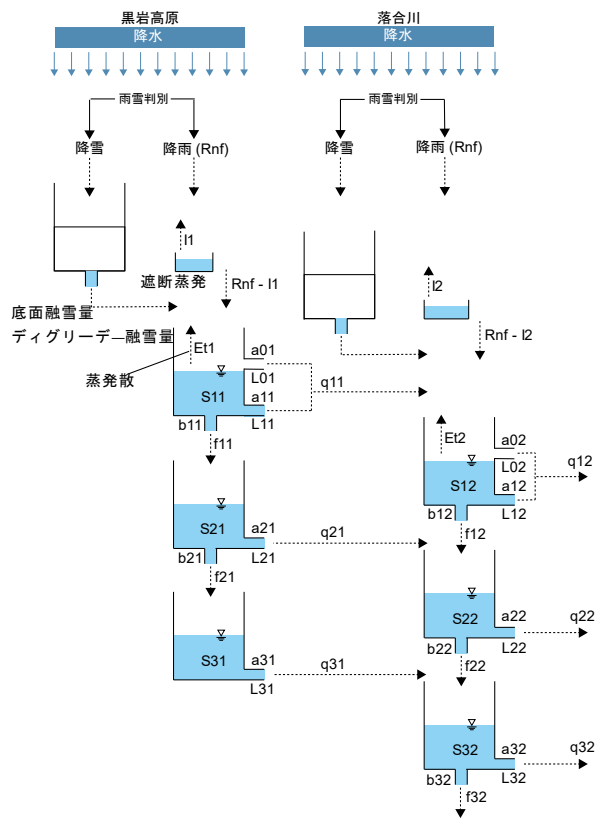


図-4 モデルの構成

$$\Omega^* = \Omega \{1 - \exp(-F \cdot LAI/\Omega)\} \quad (8)$$

$$S = S_{MAX} \{1 - \exp(-Pr/S_{MAX})\} \quad (9)$$

F : 葉面の傾きファクター, Ω : 樹冠の閉鎖率である。葉面の傾きファクター F は0.5 (ランダム分布) とした。各植生の樹体表面の最大保水量 S_{MAX} , 降水が樹体にぶつかる確率 Ω については上述の LAI 同様に近藤ほか (1992) が計算値算出のために設定した値や報告されている代表値を用いて表-1 のように設定した⁹⁾。なお、雪の遮断や草地、湿地での降雨遮断は考慮していない。

(3) 融雪量の推定

先行研究の甲斐 (2018) に従い、流出用の1段目のタンクの上に積雪タンクを設けた⁹⁾。雨雪判別気温を月ごとに設定して積雪タンクに雪を貯留し、ディグリーデー法による融雪量と地中からの伝導熱による底面融雪量を考慮した。その際、景観カメラによる積雪期間や融雪のタイミングを参考にした。

(4) モデルの構成

モデル化にあたって、流域を平らな黒岩高原と下流の急峻な落合川にわけ、それぞれで上述の蒸発散、遮断蒸発、積雪タンクを考慮したタンクモデルを構成して図-4のように連結させた。黒岩高原は地表下1mほどの層が透水性の低い玄武岩で覆われていることから、3段目

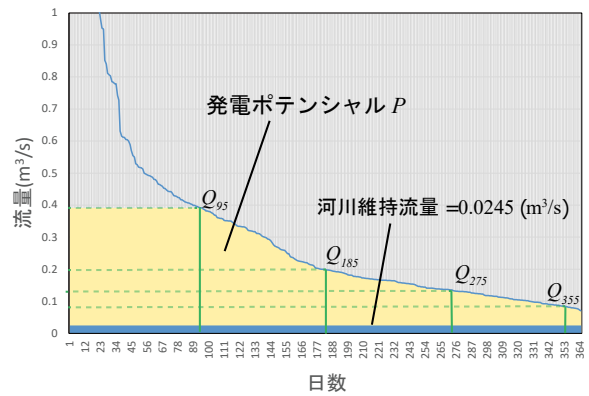


図-5 流況曲線と発電ポテンシャル

からの地下浸透は無視している。

まず観測流量データを用いて現在の流量を再現するようにタンクモデルと融雪モデルのパラメータを決定した。その際、黒岩高原のパラメータを決定するにあたり、中段湿地と下段湿地の水位変動にほとんど相違が見られなかったことから、ここでは、まず中段湿地でタンクモデルを構成してパラメータを決定し、これを黒岩高原にも適用した。現在流量の再現後、黒岩高原と落合川が1976年の植生分布であった場合の金山橋の流況と、黒岩高原が2017年、1976年、1948年の植生分布の場合の黒岩高原出口での流況を推定し比較を行った。その際、2つの入力変数、降水シナリオと気温は全て2017年12月～2018年11月の1年間の観測降水量と気温を用い、植生の相違によるタンクモデルのパラメータの変更は行わずに、植生の相違による蒸発散、遮断蒸発量の差のみに着目した流況の変化について考察した。

4. 検討結果

(1) 金山橋での現在流量の再現結果

水力発電所は豊水流量以下の流量で稼働するよう設計されることが多いため、豊水流量以下の流量の再現が大切である。そこで、図-5に示す発電に使用可能な水量を発電ポテンシャル P ($m^3/s \cdot day$)として定義して、この値があうように留意した。重要なことは発電所をうまく利用できたとする、発電ポテンシャル P の増加率はそのまま収入の増加率となることである。また、発電ポテンシャルは豊水流量 Q_{95} から渇水流量 Q_{355} までの流量と密接な関係があることが分かる。観測と計算によるハイドログラフの比較を図-6に、構成したタンクモデルのパラメータを表-2に示す。精度の確認には、Presages 係数 (PRES)¹⁰⁾を用い、その値は0.705であった。表-3に流況曲線の各種流量と発電ポテンシャル P の観測値と計算値を示す。各流量の再現精度にばらつきはあるが、発電

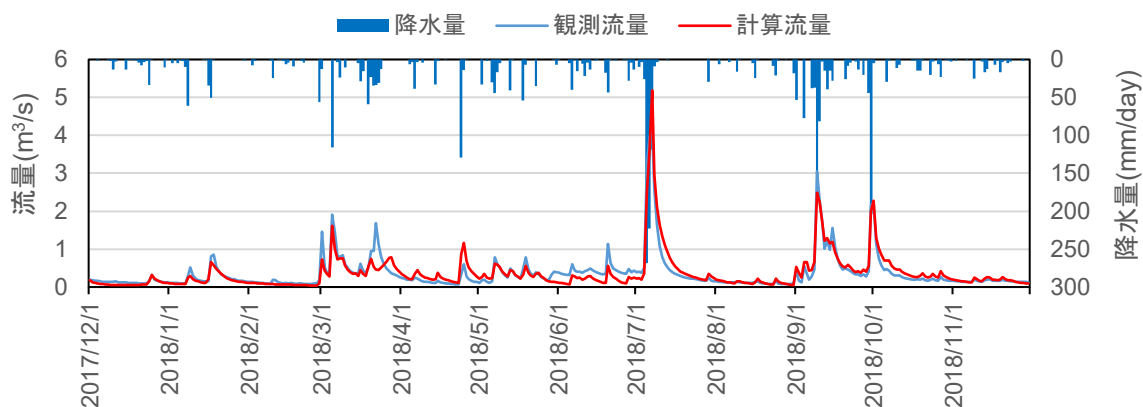


図-6 金山橋の観測流量と計算流量

表-2 タンクモデルの係数

	黒岩高原 1段目	黒岩高原 2段目	黒岩高原 3段目
流出係数(1/hr)	a01=0.034 a11=0.011	a21=0.0018	a31=0.0014
浸透係数(1/hr)	b11=0.15	b21=0.008	
流出孔高さ(mm)	L01=45 L11=15	L21=15	L31=15

	落合川 1段目	落合川 2段目	落合川 3段目
流出係数(1/hr)	a02=0.014 a12=0.013	a22=0.0065	a32=0.0016
浸透係数(1/hr)	b12=0.07	b22=0.0075	b32=0.015
流出孔高さ(mm)	L02=40 L12=15	L22=15	L32=15

表-3 2017年の金山橋地点での観測と計算による流況
(計算値欄の()は観測値との誤差(%)を表す)

流量	観測値	計算値
年間流量(mm/m²)	2010.7	2011.4(0.0)
Q_{95} (m³/s)	0.391	0.389 (-0.7)
Q_{185} (m³/s)	0.198	0.224 (+13.6)
Q_{275} (m³/s)	0.132	0.116 (-12.4)
Q_{355} (m³/s)	0.082	0.052 (-36.4)
P (m³/s・day)	78.4	77.0 (-1.7)

ポテンシャル P に関しては良い精度で再現できた。

(2) 植生分布を過去(1976年)に戻した場合の流況推定

現地住民の指摘に基づいて、湿地の劣化が現在ほど進行していなかったと思われる1976年の金山橋地点で流量を再現した。黒岩高原、落合川の植生の変化は図-3に示すとおりである。流況の推定結果を表-4に示す。こ

表-4 1976年の植生分布の場合の金山橋の推定流況()は2017年の計算流量からの増加率(%)を表す)

流量	1976年
Q_{95} (m³/s)	0.430 (+10.6)
Q_{185} (m³/s)	0.268 (+19.5)
Q_{275} (m³/s)	0.146 (+26.4)
Q_{355} (m³/s)	0.0615 (+17.4)
P (m³/s・day)	89.5 (+16.2)

表-5 2017年、1976年、1948年の植生分布の場合の黒岩高原の蒸発散・遮断蒸発量と黒岩高原出口の推定流況

	2017年	1976年	1948年
年間蒸発散(+遮断蒸発)(mm)	451 (+210)	334 (+115)	259 (-)
Q_{95} (m³/s)	0.167	0.179 (+7.3)	0.192 (+14.9)
Q_{185} (m³/s)	0.115	0.127 (+10.5)	0.139 (+20.4)
Q_{275} (m³/s)	0.076	0.085 (+11.0)	0.092 (+20.9)
Q_{355} (m³/s)	0.030	0.031 (+3.5)	0.032 (+5.5)
P (m³/s・day)	39.0	42.5 (+9.2)	46.0 (+18.0)

れより特に低水流量 Q_{275} に大きな増加が見られ、指標とする発電ポテンシャル P も15%を超える増加があり、発電の観点から当時の豊かな流況が再現された。

(3) 植生変化に伴う黒岩高原出口の流量の詳細比較

黒岩高原の影響は下流に行くほど小さくなる。今後の湿地再生の効果をより明確に議論するために、ここでは黒岩高原出口での流況を2017、1976、1948年の3時期で詳細に比較した。その結果、表-5に示すように1976年、1948年ともに平水流量 Q_{185} 、低水流量 Q_{275} 、発電ポテンシャル P にそれぞれ10%、20%程度の大きな増加が見られ、ここでの植生変化が湿地の水源涵養機能の回復、

ひいては、湿地再生に寄与していることが示唆される。また、黒岩高原の流出特性が植生変化とともに変化してきていることがより明確になった。

5. 結論

本研究で得られた結論と今後の課題を以下に述べる。

- 1) 小水力発電のポテンシャル評価を行うために、植生変化および積雪・融雪の効果を考慮可能な3段のタンクモデルを構築し、現地観測データを用いて十分な再現精度を確認した。
- 2) 集水域の植生様式が落合川の流況に与える影響を検討した結果、現状の高木林を1948年当時の草地・湿地植生に回復させることが水力発電ポテンシャルを最も向上させることを明らかにした。

本検討は、数値的な精度を補償するものではないが、小流域ながら、黒岩高原という湿原が豊かな流況を育んでいたことが再現された。年間数千万円の収入が発生する小水力発電において、数%の発電ポテンシャルの増加でも発電経済性に大きな好影響を与えることになる。今後は、雪面からの昇華・蒸発、森林による雪の遮断の考慮などモデルの改良や検証のためのモニタリングの継続を行っていく。

謝辞：現地調査の手厚いサポートをして頂きましたNPO 法人水力開発研究所代表理事の井上素行氏、貴重な流量測定データを提供して頂きました長瀧氏を始めとする、阿波村の皆様にご心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 角 哲也他：今こそ問う水力発電の価値 その恵みを未来に生かすために、技報堂出版 pp.127, 60, 2019.
- 2) 中村太士, 中村隆俊, 渡辺修, 山田浩之, 仲川泰則, 金子正美, 吉村暢彦, 渡辺綱男：釧路湿原の現状と自然再生事業の概要, 日本生態学会保全生態学研究, 8: 129-143, 2003.
- 3) 福田晴耕, 角哲也, 寺井喜之, 池淵周一：森林伐採の流況変化に関する事例研究, 水資源シンポジウム委員会, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, 649-654, 1992.
- 4) 永井明博：Makkink 式による計器蒸発量の推定と考察, 水文水資源学会誌, Vol. 6, No.3, pp.238-243, 1993.
- 5) 篠原慶規, 小松光, 大槻恭一：日最高, 最低気温から全天日射量を推定する方法, 水文・水資源学会誌, Vol.20, No.5, pp462-469, 2007.
- 6) 近藤純正：種々の植生地における蒸発散量の降水量および葉面積指数への依存性, 水文・水資源学会誌 11 巻 7 号, pp.679-693, 1998.
- 7) 横山智子, 及川武久：水理実験センター圃場における1999年のC3/C4混成草原のLAIとバイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.1, 67-71, 2000.
- 8) 近藤純正・渡辺力・中園信・石井正典：森林における降雨の遮断蒸発のモデル計算, 天気, 39, pp.159-167, 1992.
- 9) 甲斐康恭：温暖化による多雪流域の水資源変動量予測および適応策の検討, 愛媛大学農学部卒業論文, 2018.
- 10) Nicolle P., R. Pushpalatha, C. Perrin, D. François, D. Thiéry, T. Mathevet, M. Le Lay, F. Besson, J.-M. Soubeyroux, C. Viel, F. Regimbeau, V. Andréassian, P. Maugis, B. Augerard, and E. Morice: Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, pp2829-2857, 2014.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

IMPACT ASSESSMENT OF WETLAND RESTORATION WITH VEGETATION MANAGEMENT IN WATERSHED ON SMALL HYDROPOWER DEVELOPMENT POTENTIAL

Takefumi IWAKAWA, Yoshinobu SATO, Yasuhiro TAKEMON and Tetsuya SUMI

A nature restoration of the Kuroiwa Moor has been conducted for compensation of environmental impacts on recession area of a small hydropower plant in the Ochiai River in northeast part of Okayama Prefecture. In order to evaluate the effects on the hydropower efficiency, we estimated the flow duration curves under different conditions of vegetation patterns in the watershed. One of the causes of wetland degradation in the Kuroiwa Moor is decreases of the wetland water level induced by forestation and increase of evapotranspiration in the watershed. Then we focused on the historical vegetation change and built a tank model with incorporating evapotranspiration and canopy interception effects. Using the model we evaluated *Hydropower Development Potential* which has an influence on hydropower generation. As a result, *Hydropower Development Potential* under the vegetation distribution of 1948 is the highest among those of 1948, 1976 and 2017. The results of this study can be applied as a model of small hydropower development in quasi-national parks.