

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：23303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06301

研究課題名（和文）森林管理による融雪遅延機能強化は温暖化による積雪減少に対する適応策となるか？

研究課題名（英文）Is strengthening of snowmelt delay function through forest management an adaptation measure against snowfall reduction due to global warming?

研究代表者

高瀬 恵次（Takase, Keiji）

石川県立大学・生物資源環境学部・客員教授

研究者番号：90133165

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：森林内外の消雪日の差（SDD）に着目したメタ解析を行ったところ、日本は SDD がプラスにもマイナスにもなり得る地域であり、冬期平均気温が異なれば、貯雪・融雪遅延機能が発揮される森林構造も変化することが分かった。また、森林内外の積雪・融雪観測からは、暖候地における森林流域では森林の強度間伐を行い、疎林を形成することで森林の貯雪・融雪遅延機能の発揮が期待できると考えられた。さらに、石川県手取川流域における積雪・融雪をシミュレーションしたところ、上流域の森林は貯雪・融雪遅延機能を発揮しているが、林内の積雪は気温変化の影響を受けやすく、将来的には森林の貯雪・融雪遅延機能は低下することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、貯雪・融雪遅延機能を発揮している森林であっても、林内の積雪は気温変化の影響を受けやすく、将来的には森林の貯雪・融雪遅延機能は低下する可能性が高い。このような暖候地における森林流域では森林の強度間伐を行い、疎林を形成することで森林の貯雪・融雪遅延機能の発揮が期待できると考えられ、これらの情報は水源林としての森林づくりを進めるのに際して活用されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：A meta-analysis of the factors influencing the difference in snow disappearance date (SDD) between forested and open areas revealed that SDD in Japan can either be positive or negative. Moreover, we found that the snow storage function of forests is affected by mean winter temperatures. The observations of snow accumulation and snowmelts in and around forests suggest that, in regions with warm climate, the snow storage function of forested watersheds can be enhanced by intensive thinning and formation of sparse forests. The simulations of snow accumulation and melt models revealed that forests in the upper watershed in the Tadori River show effective snow storage function; however, snow accumulation in forests is easily affected by temperature changes, which can adversely affect their snow storage function in the future.

研究分野：水文学

キーワード：積雪・融雪 温暖化 森林 適応策 水資源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

冬期における降雪は流域内に積雪として貯留され、春先に緩やかに溶け出した融雪水は、農業用水、発電用水などに利用されており重要な水資源となっている。積雪流域においては、融雪期における流出量が多いものの、その変動は夏期の流出量の変動より小さく、安定した水資源であることが融雪水の特徴である。しかし、気候変動にともなう温暖化の進行によって、積雪量は減少し、加えて融雪時期は早まることにより、春先の水資源が不足する可能性が指摘されている。このため、春先の渇水被害を最小とするための対策を確立することが急務となっている。わが国では国土面積の3分の2を森林が占めているため、森林流域内の積雪が少しでも緩やかに融雪すれば(貯雪・融雪遅延機能が発揮されれば)、春先の水資源確保に寄与することになる。このような課題を検討する際には、積雪・融雪モデルを用いるのが一般的であるが、これまでの積雪・融雪モデルは、観測が容易な林外のデータに基づいたものが多い。つまり、日本の国土面積の約7割を占める森林内での積雪・融雪モデルの検証は十分ではなく、森林管理の状態と積雪・融雪との関係についての知見は少ない。

### 2. 研究の目的

(1) 森林内外の消雪日の違いは気象条件、森林特性といった様々な要因によって生じ、森林が国土面積の3分の2を占める日本国内では、森林内の積雪が少しでも長く残ること(貯雪・融雪遅延機能)が春先の水資源確保に寄与する。したがって、森林の貯雪・融雪遅延機能を評価するための基本的な知見を得ることを目的として、森林内外の消雪日の違いが何によって説明されるのかを明らかにすることを試みた。

(2) 森林内外を対象として積雪・融雪特性を解明しようとする研究事例はすでにあるが、ほとんどの研究は、融雪が顕著に進行する3~4月を対象にしたものであり、12~2月のような厳冬期における森林内の融雪過程について検討した事例は少ない。また、世界的に見ると温暖な豪雪地帯に分類されるわが国において1冬期を通した融雪観測の事例は皆無である。そこで、積雪初期から消雪日までを対象として、森林内外の積雪・融雪過程を観測し、森林内外の融雪熱収支の解析を試みた。

(3) 積雪地帯の森林は、日射を遮蔽して風速を減衰させることで、林外よりも消雪を遅らせる機能(融雪遅延機能)があると言われている。しかし、気温上昇時において、森林が融雪遅延機能を現在と同じように発揮するかは不明である。そこで、森林内外における積雪・融雪過程をシミュレーションできるモデルを構築し、1950~2099年の150年連続ランデータをインプットデータとしてモデルを駆動することにより、気候変動が森林内の積雪・融雪に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、森林内外における消雪日の差の指数である SDD ( $SDD = SDD_{\text{forest}} - SDD_{\text{open}}$ ) に着目した。SDD<sub>forest</sub> は林内の消雪日、SDD<sub>open</sub> は林外の消雪日であり、森林内外のどちらの積雪が長く残るのかを示す指数である。よって、SDD がプラスの場合は林内の積雪が長く残り、マイナスの場合は林外の積雪が長く残る (Lundquist et al., 2013)。

国内全域を対象に森林内外の消雪日を観測した論文・資料を整理し、消雪日を抽出することで計36個のSDDの情報をデータベース化した。そして、観測地点から最寄りの気象庁観測所、もしくは現地観測された気象データを利用し、SDDと気象条件の相関分析を行った。気象データの抽出期間は対象地の気候特性を抽出する目的から、一般的な冬期に該当する12月~2月とし、冬期平均気温( ), 冬期平均風速 ( $\text{m s}^{-1}$ ), 冬期平均日射量 ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), 最大積雪深 (cm), 冬期積算降水量 (mm) の5項目の気象条件を説明変数とした。

(2) 石川県白山市 (36.43°N, 136.64°E: 標高220m) の観測地点で2017.12 - 2018.3 (以下、2018年) と2018.12 - 2019.3 (以下、2019年) に積雪・融雪の現地観測を行い、観測データを基に以下の熱収支式から森林内外の融雪熱収支を解析した。

$$Q_m = R_n + H + IE + G$$

Q<sub>m</sub>: 積雪面の融雪および凍結に費やされる熱量 ( $\text{W m}^{-2}$ ), R<sub>n</sub>: 純放射量 ( $\text{W m}^{-2}$ ), H: 顕熱輸送量 ( $\text{W m}^{-2}$ ), IE: 潜熱輸送量 ( $\text{W m}^{-2}$ ), G: 地中伝導熱量 ( $\text{W m}^{-2}$ ) である。純放射量 R<sub>n</sub> と地中伝導熱量 G は実測し、顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE の計算にはバルク法を用いた。

(3) 積雪地域の森林流域における積雪・融雪・流出過程を再現する物理水文モデル DHSVM (Wigmosta et al., 1994, 2002) を使用し、森林内外における積雪・融雪を比較することによって、現在および将来における森林の貯雪・融雪遅延機能を定量評価した。石川県白山市(標高200-500m)に位置するスギを中心に構成された森林小流域に DHSVM を適用した。なお、適用期間は2017-2019年であり、気象データ(気温、風速、相対湿度、下向き短波放射、下向き長波放射、降水量)と地形情報(標高、斜面方位)および森林情報(LAI、樹高、アルベドなど)を入力パラメータとした。また、森林情報のパラメータ値を調整し、林内と林外(オープン)における積雪・融雪・流出過程のシミュレーションを行った。さらに、気象庁気象研究所において開発された水平解像度20kmの全球気候モデルMRIAGCM3.2Sを用いてRCP8.5シナリオに基づいて1950-2099年が連続的に計算された150年シームレスランデータを、構築した積雪・融雪モデルに入力することによって、将来における森林内外の積雪・融雪の変化をシミュレーションした。また、森林内外の積雪日数も比較することによって、水資源の観点から森林の貯雪・融雪遅延機能について定量評価した。

#### 4. 研究成果

(1) SDDと気象条件の相関分析を行った結果、冬期平均気温とSDDに最も強い負の相関関係が見られた( $r = -0.62$ ,  $p < 0.01$ )。さらに、日本国内の冬期平均気温とSDDの関係性を全球スケールのそれと比較した(Fig.1)。その結果、全球スケールと日本国内のどちらにも冬期平均気温とSDDに負の相関が見られた。加えて、世界的に見ると日本は比較的温暖な気候帯に属し、冬期平均気温とSDDの間に負の相関が見られることから、SDDはプラスにもマイナスにもなり得ることが分かる。また、SDDの地域特性の大部分は冬期平均気温によって説明されることから、冬期平均気温が異なれば森林と積雪・融雪の関係性および森林の貯雪・融雪遅延機能が発揮される森林構造が変化すると考えられる。

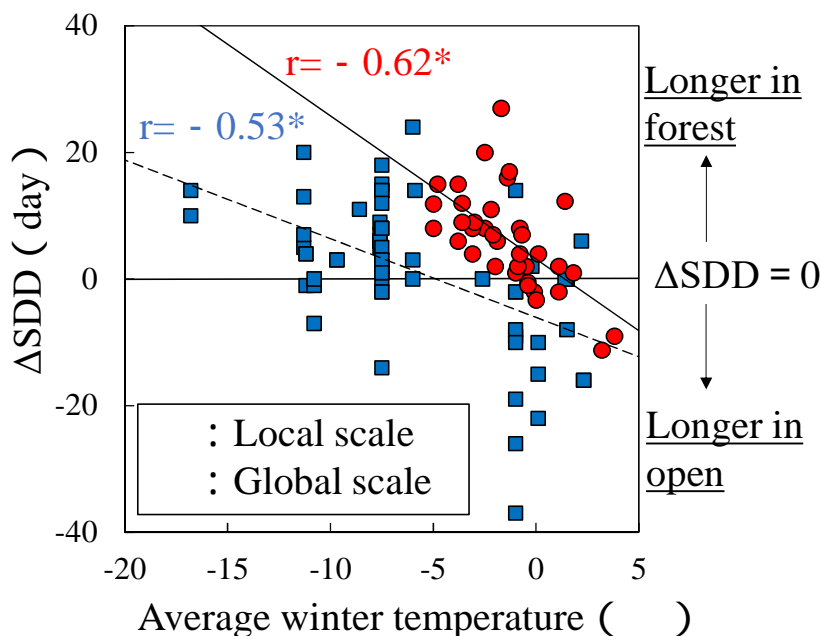


Fig.1 全球スケールと日本における冬期平均気温 - SDD の関係

(2) 積雪融雪の現地観測を行ったところ、各観測年の冬期平均気温は2018年が1.8℃、2019年が3.5℃となり、SDDは2018年が+1日、2019年が-4日であった。熱収支解析の結果(Fig.2)、2018年は3月の林内の純放射量が林外の55%-80%に減少したことで、林内の総融雪熱量は林外の約85%に抑制された。一方で、2019年は林内の融雪が明らかに遅れるような融雪現象は生じなかった。これは、2019年が暖冬の影響によって、3月まで林内の積雪が残らず、森林による日射抑制量は小さくなることから、正味の純放射量がほとんど抑制されなかったためである。したがって、冬期平均気温が高いエリアほどSDDがマイナスになりやすいのは、冬期積雪量が少なく、森林の日射抑制効果が発揮される3月まで林内の積雪を多く残せないためと考えられる。もし、森林樹冠の降雪遮断量を減らすことができれば、3月以降の林内の残雪量は増加し、森林による日射抑制効果は大きくなる。したがって、暖候地における森林流域では森林の強度間伐を行い、疎林を形成することで森林の貯雪・融雪遅延機能の発揮が期待できると考えられる。

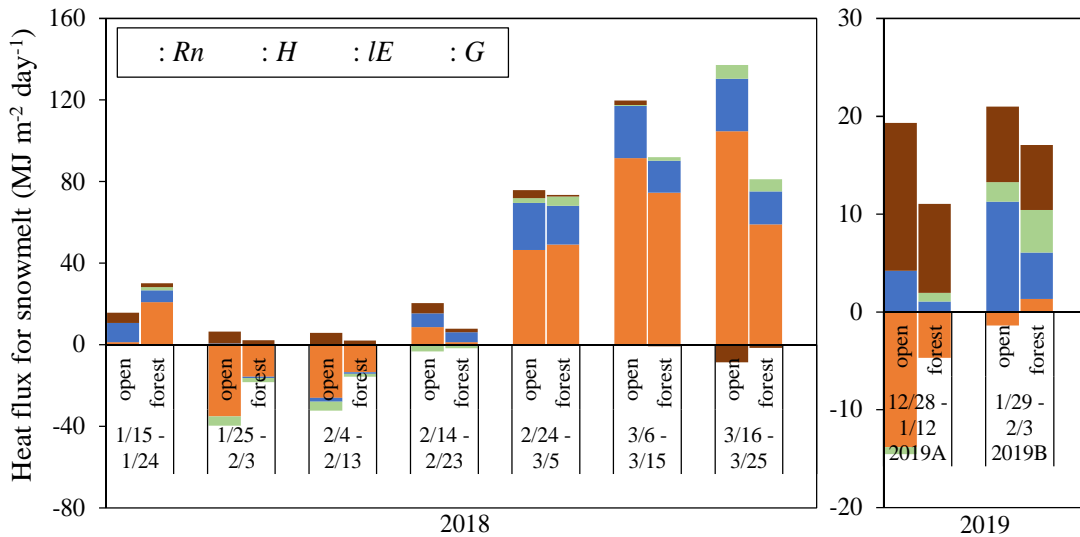


Fig.2 森林内外における融雪熱収支

(3) 実際の気象観測データ（気温，風速，相対湿度，下向き短波放射，下向き長波放射，降水量）を入力して，森林内外における積雪融雪過程を再現した．森林内の観測積雪深と計算積雪深および林外の観測積雪深と計算積雪深はほぼ合致していた．次に，実際の観測を行った石川県白山市（標高 200-500m）を含む中流域を対象として，150 年シームレスランデータを用いて構築した積雪融雪モデルを動かした．積雪・融雪の変化および年最大積雪深を Fig.3 に示す．また，オープンに対する林内積雪の比（林内/オープン），および，オープンと林内の積雪日数の差（林内 - オープン）も示している．これらを見ると，2030 年以降の積雪量の減少が顕著である，林内の積雪日数の方がオープンより少なく，この傾向は将来も同じである，オープンの積雪に対する林内の積雪量もあまり変わらないことなどが分かる．

さらに，手取川ダムなどを含む上流域を対象として，150 年シームレスランデータを用いて構築した積雪融雪モデルを動かした．積雪・融雪の変化および年最大積雪深を Fig.4 に示す．また，オープンに対する林内積雪の比，および，オープンと林内の積雪日数の差も示している．これらを見ると，2030 年以降の積雪量の減少が顕著である，現在は林内の積雪日数の方が多いが，2030 年以降は林内の積雪日数が少なくなる，オープンの積雪に対する林内の積雪量も少なくなることなどが分かる．つまり，現在，上流域の森林は貯雪・融雪遅延機能を発揮していると言えるが，林内の積雪は気温変化の影響を受けやすく，将来的には森林の貯雪・融雪遅延機能は低下する．

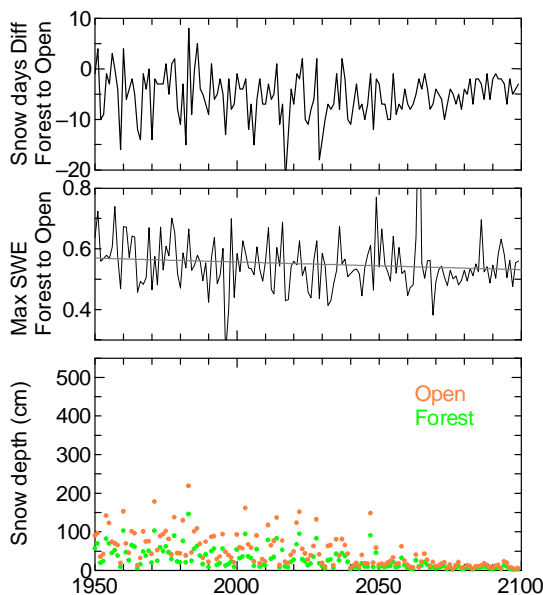


Fig.3 積雪の変化（中流域）

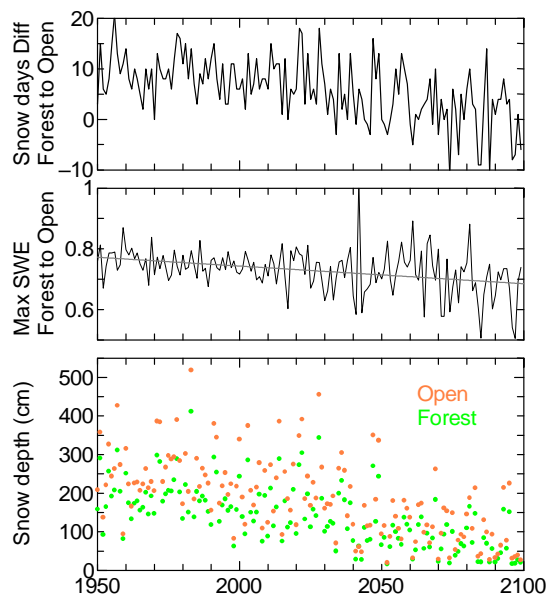


Fig.4 積雪の変化（上流域）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 高瀬恵次・伊藤優子	4. 巻 34 (5)
2. 論文標題 水質総負荷量の計測システム開発とその適用例	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	6. 最初と最後の頁 274-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.34.274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤原洋一	4. 巻 -
2. 論文標題 気候変動が森林内の積雪・融雪、および、扇状地の地下水に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 統合的気候モデル高度化研究プログラム 統合的ハザード予測 令和3年度研究成果集	6. 最初と最後の頁 102-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 角哲也・佐藤嘉展・野原大督	4. 巻 -
2. 論文標題 150年連続気候実験データを用いた積雪地域のダム季節運用に対する気候変動の影響評価 -手取川流域手取川ダムを対象に-	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 統合的気候モデル高度化研究プログラム 統合的ハザード予測 令和3年度研究成果集	6. 最初と最後の頁 105-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIRATA Tomomichi、FUJIHARA Yoichi、TAKASE Keiji、ICHION Eiji、CHONO Shunsuke	4. 巻 34
2. 論文標題 Meta-analysis of Regional Characteristics on Differences of Snow Disappearance Dates Between Open and Forest Areas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF JAPAN SOCIETY OF HYDROLOGY AND WATER RESOURCES	6. 最初と最後の頁 54 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.34.54	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tomomichi Hirata, Yoichi Fujihara, Keiji Takase, Eiji Ichion, Shunsuke Chono	4. 巻 26(2)
2. 論文標題 Snow accumulation and melt in open and forest areas in a snowy temperate region of Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Rainwater Catchment Systems	6. 最初と最後の頁 27-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤原洋一・川田秋雅・平田智道・高瀬恵次	4. 巻 53
2. 論文標題 温暖多雪地帯におけるスギ林の樹冠通過降水量の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 石川県林業試験場研究報告	6. 最初と最後の頁 9-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NOHARA Daisuke, SATO Yoshinobu, SUMI Tetsuya	4. 巻 78
2. 論文標題 A FUNDAMENTAL STUDY ON CLIMATE CHANGE IMPACT ON SEASONAL RESERVOIR OPERATION IN HEAVY SNOWFALL AREA USING 150-YEAR CONTINUOUS CLIMATE EXPERIMENT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_73~I_78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2.I_73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 鍛冶尚寛・長野峻介・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二
2. 発表標題 手取川流域の地球温暖化による扇状地地下水位への影響評価
3. 学会等名 第29回日本雨水資源化システム学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原洋一
2. 発表標題 白山の積雪と水資源
3. 学会等名 R3「水の旅学」学習会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野原大督・佐藤嘉展・角哲也
2. 発表標題 150年連続気候実験データを用いた積雪地域のダム季節運用に対する気候変動の影響評価
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田智道・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二・長野峻介
2. 発表標題 森林内外における消雪日の差の地域特性と積雪・融雪観測
3. 学会等名 令和2年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍛冶尚寛・長野峻介・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二
2. 発表標題 アンサンブルデータを活用した温暖化による地下水への影響評価
3. 学会等名 令和2年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍛冶尚寛・長野峻介・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二
2. 発表標題 領域気候モデルの実験結果を用いた地球温暖化による扇状地地下水への影響評価
3. 学会等名 第28回日本雨水資源化システム学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平田智道・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二・長野峻介
2. 発表標題 森林内外における消雪日の差の地域特性と積雪・融雪観測
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平田智道・藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二・長野峻介
2. 発表標題 森林内外における消雪日の違いが融雪流出に及ぼす影響
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原洋一
2. 発表標題 地球温暖化が手取川流域にどのような影響をもたらすか
3. 学会等名 野々市市教養講演会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 野原大督・佐藤嘉展・角哲也
2. 発表標題 150年連続気候実験データを用いた積雪地域のダム季節運用に対する気候変動の影響評価
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 川勝健志・中野孝教・高瀬恵次・大田伊久雄・小川竹一・遠藤崇浩・増原直樹・佐々木和乙	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ナカニシヤ出版	5. 総ページ数 216
3. 書名 水の都を受け継ぐ - 愛媛県西条市の地下水利用と「地域公水」の試み	

1. 著者名 藤原洋一、水文・水資源学会編	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 640
3. 書名 水文・水資源ハンドブック 第二版	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤原 洋一  (Fujihara Yoichi)  (10414038)	石川県立大学・生物資源環境学部・准教授    (23303)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 嘉展  (Sato Yoshinobu)  (90414036)	愛媛大学・農学研究科・准教授    (16301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関