30.地形と林相に着目した土砂生産の緩衝効果に関する検証

渡部　泰介[1]・池本　海周[1]・川越　清樹[1]

[1]福島大学共生システム理工学類（〒960-1296 福島県福島市金谷川 1）
E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp (Corresponding Author)

本研究では，令和元年東日本台風により土砂・洪水氾濫の被害を与えた五福谷川流域(阿武隈川支川)を対象に，土砂生産と地形，林相の環境場における関係を検証した．あわせて，土砂生産による流出を緩衝する事例も抽出して関係性も求めた．土砂流出現象を捉えるため小流域を解析単位に設定し，流域内の環境場の特徴を明らかにした．この特徴を求めることで，生態系を活用した災害への対策として希少な知見を収集することが研究の目的となる．

結果として，①地形として斜面傾斜が急で，地形の平均曲率(分散値)が大きい条件の小流域は，マスムーブメントと土砂流出緩衝効果が共存すること，②林相として樹齢 25～40 年のスギで土砂流出緩衝効果が高まること，が明らかにされた．

Key Words: *2019 East Japan Typhoon,Gofukuya basin,sediment production,climate change adaptation*

1. はじめに

近年，気候変動の影響を示唆する気象観測史上最大降水量の更新が認められ，日本各地で甚大な水，土砂災害が生じている．この代表的な事例である平成 29 年九州北部豪雨，平成 30 年西日本豪雨や令和元年東日本台風では，従来までに災害防止のため整備されてきたインフラの設計基準を超過する現象も多数生じている[例えば 1)]．気候変動にも対応できる対策が切望される状況下で，堤防の整備，ダムの建設・再生などの対策を一層加速するとともに，集水域から氾濫域にわたる流域一体であらゆる関係者が協働して災害対策を行う流域治水が推進され，日本各地で流域治水プロジェクトが取り組まれている．流域治水を推進する上で，人口，社会の集中している氾濫域におよぶ影響の負荷を軽減するために集水域で過大な流出現象を制御，緩和させることも対策オプションとして強化しなければならない．具体には，集水域の大部分を構成する山間地で，自然，社会環境を維持するための通例の水，物質循環 [2)]を維持しつつも，氾濫域に被害を与えるような過大な流出を制御する対策を講じることが必要である．先に示す代表的事例では，谷出口より下流側河道で土砂流出に伴う河床上昇，河道閉塞を引き起こさせた後に，過大な出水とともに大量の土砂・泥水を氾濫させる土砂・洪水氾濫による深刻な被害が相次いで認められた [3),4),5)]．土砂・洪水氾濫による被害の軽減のためには，渓岸から生産される過大な土砂，もしくは河道に供給される過大な土砂を抑制する対策を講じなければならず，渓岸浸食と渓岸沿いの土砂生産(斜面崩壊，土石流など)への対応が求められる．この対応として，砂防ダム等の整備は大きな効果を期待できる対策だが，集水域となる山間地は広大であるため，費用対効果を考慮すれば整備優先地域，山間部の渓岸の性質の改善も視野に入れる必要がある．山地の概ねが森林により被覆される現状ふまえれば，過大な土砂流出の抑制に森林の機能を発揮させるアプローチの強化も性質を改善することといえる [6)]．こうしたアプローチは，生態系を活用した災害への対策である Eco-DRR(Ecosystem-based disaster)[7)]，もしくは，CO_2 削減への寄与も期待できる気候変動による影響への対策である EbA(Ecosystem-based Adaptation)[8)]に通じるものであり，森林復元力の低下も危惧されている状況下 [9)]で，過大な土砂の生産，および河道への土砂供給に対しても効果を与えながら，健全な森林空間の創出も可能性になりえる方法にもなりえる．こうした背景も踏まえ，筆者らは，令和元年東日本台風により土砂・洪水氾濫の生じた阿武隈川支川の五福谷川を対象に，樹林により稀有な土砂流出緩衝効果を示した事例を基に効果の定量化，および特徴を求めた [10)]．ただし，この結果は大規模な土砂生産の生じた特定個所のサンプルによる結果で

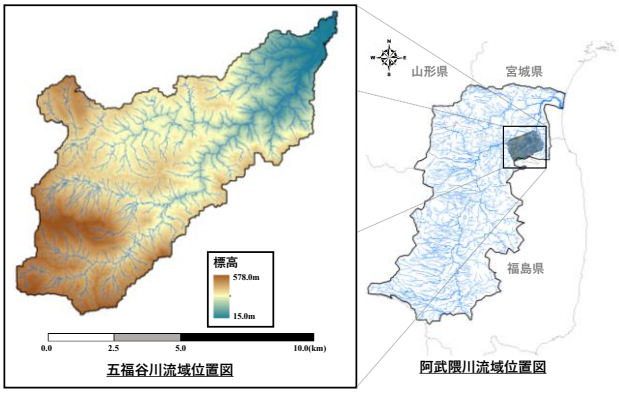


図-1　研究対象領域位置図

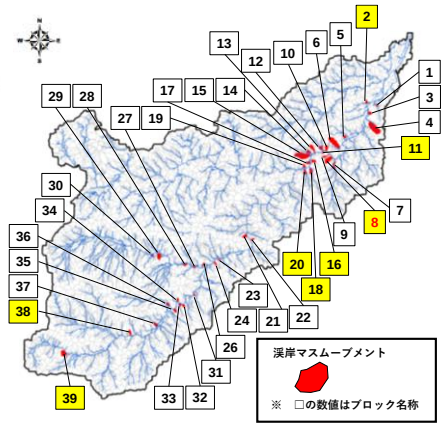


図-2　マスムーブメント位置図

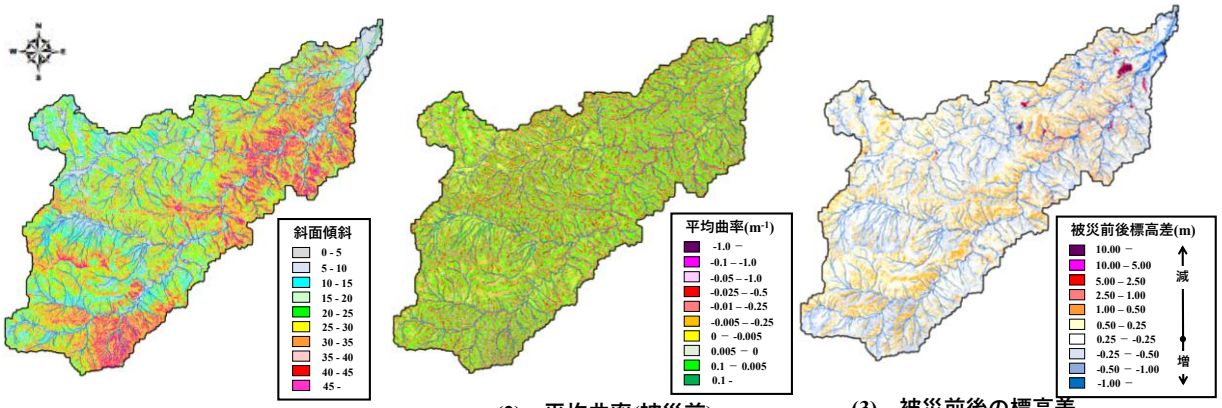


図-3　検証地形状況図

あるため，樹木の成長過程，地形の影響等も含めた流域内に分布する環境場の因子まで検討されたものではない．また，五福谷川流域で土砂流出緩衝効果を発揮されたものは複数認められている状況にある[10]．

本研究は，先行研究の事例を拡張して，五福谷川流域の渓岸に生じた土砂生産領域を対象にして地形，林相の環境場の関係を検証した．また，土砂生産した領域のうち，土砂生産による流出を緩衝した事例の環境場の関係も明らかにした．この検証から，土砂流出緩衝効果の期待できる普遍的な環境場の条件による特徴を明らかにし，生態系を活用した災害への対策として希少な知見を収集することが研究の目的となる．

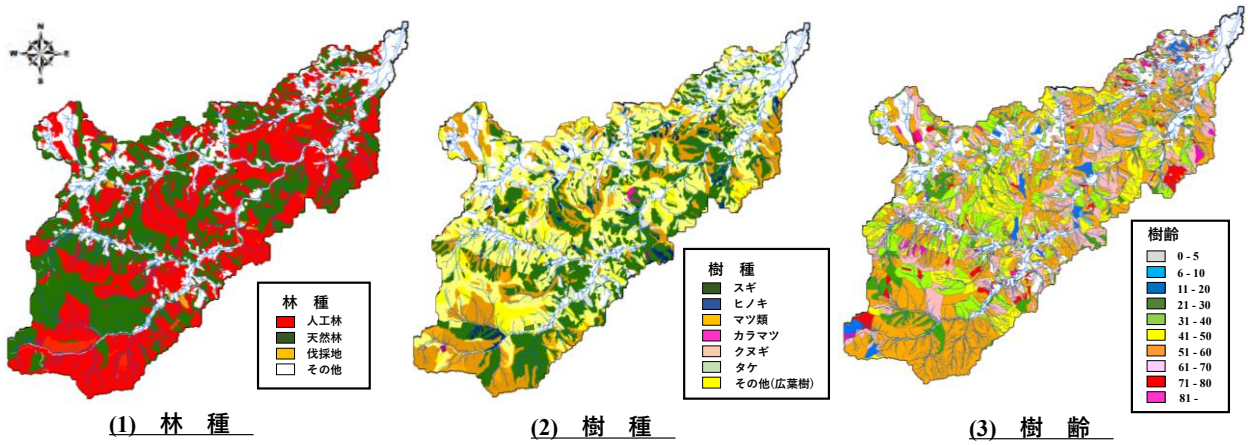
2.　研究対象

研究対象の領域は宮城県丸森町を流下する阿武隈川支川の五福谷川である(図-1 参照，流域面積 23.8km^2，河川延長 2.7km)．五福谷川では，令和元年東日本台風の上陸，通過時(2019 年 10 月 12～13 日)に土砂・洪水氾濫が生じた．当該流域は，主に中生代白亜紀前期の花崗閃緑岩，花崗岩より構成された花崗岩類の地質分布をなし，風化により生産されたマサ土や粗大なコアストーンが渓岸に厚く分布する特徴をもつ．そのため，豪雨に伴いマスムーブメントが発生しやすく，過大な土砂生産・流出されやすい要因を有している．なお，先行研究による衛星画像判読結果から令和元年東日本台風時に流域内で 54 ブロックのマスムーブメントが確認された[10]．本研究では，マスムーブメントのうち渓岸に接し，かつ渓岸浸食と分離されるマスムーブメントを対象に検証した．また，発展的に流出されるプロセスまで追跡したい意向より，渓岸に接する小流域(集水域)を解析の対象単位に設定した．

3．解析方法，データセット

地形，林相に着目した環境場とマスムーブメントに対する土砂流流出緩衝効果の関係を検証するために用いたデータは，現地調査より収集されたデータ，および国土交通省東北地方整備局より提供された被災前後の LP データ(空間解像度 1m×1m)，宮城県林業振興課より提供された森林情報システム[11]に用いられている数値地理情報データである．

なお，現地調査より，五福谷川渓岸に接するマスムー



(1)　林　種　　(2)　樹　種　　(3)　樹　齢

図-4　検証林相状況図

ブメントを含む小流域ブロックは 39 ヶ所認められている(図-2 参照). これらブロックのうち土砂流出緩衝効果を示したブロックが 8 ヶ所である. この調査を基盤情報にして解析を進める. 以下の(1)～(3)に解析方法とデータ利用について説明する.

(1)　地形

地形の環境場の条件として検証に用いたものが被災前標高時の斜面傾斜度, 地形の平均曲率である. 図-3 に被災前後の標高差の情報も加えた地形状況図を示す. 斜面傾斜度は滑動に直接寄与する条件になる. 地形の平均曲度は地形の凹凸の状態を誘導できる条件であり, 西田らに提案されて以降 [12], 多くの先行研究で斜面不安定化の条件の判定に利用されているものである [13),14]. その他, 解析の対象単位のために小流域を用いている(図-2 参照). これらの情報を LP データを基に整備した.

特に, 特徴的な地形の条件である地形の平均曲率の詳細を説明する. 地形の平均曲率は, 曲面上の 2 点間を結ぶ最短距離となる接線の勾配変化率と定義され, 変化率最大値, 最小値の平均により求められる. DEM 情報を用いる場合には, 隣接する 8 方向のグリッドセルを利用し, 2 次差分法を用いて求められている [15]. 空間解像度 1m×1m の LP データを用いて整備するあたり, 凹凸が複雑化しやすく危惧があったため, 先行研究より提案される最適な空間解像度 5m×5m に補完 [13] して地形の平均曲率を求めた.

(2)　林相

宮城県林業振興課より提供された森林情報システム [11] に用いられている数値地理情報には, 林種, 樹種, 樹齢の情報が格納されており, 小班毎に整理されている. これらの情報を検証に用いた. 図-4 に林相の使用データを示す. 五福谷川流域内の林相の概要としては, 人工林と天然林の割合はほぼ等しく, 北西側は天然林, 南東側は人工林が卓越する. 天然林の樹種はその他の広葉樹として分類され, 人工林の樹種は多様だがスギの割合が多い. ただし, 人工林の高標高部ほどマツ類の占拠が多くなる状況を示す. 樹齢より, 40 年から 70 年の樹木が多く分布し, 所々に若齢の樹木が挟在する.

(3)　検証解析方針

検証解析は以下①～③の方針で進めた.

① 小流域の斜面傾斜度, 地形の平均曲率分散値の関係による土砂生産領域, およびその土砂流出緩衝効果の特性の検証(地形による検証結果)

② ①の結果による土砂生産領域と小流域の林相の関係性による検証(林相による検証結果)

③ 小流域の推計土砂流出量と各検証の比較(推計土砂流出量による検証)

なお, 推計土砂流出量は LP データの被災前後の標高差分より算定している.

3.　解析結果

以下の(1)～(3)に検証の解析結果を示す.

(1)　地形による検証結果

五福谷川流域で確認された土砂生産領域を含む小流域, および渓岸域の小流域の斜面傾斜度, 地形の平均曲率分散値の関係を図-5 に示す.

渓岸域の小流域全体においての斜面傾斜度, 地形の平均曲率分散値の関係より, 斜面傾斜度 10° に多くの小流域が分布し, 地形の平均曲率分散値も多様になることが示されている. 10° を境に傾斜が緩くなるほど地形の平均曲率分散値が小さくなる. 一方で, 傾斜が緩いほど明瞭ではないが, 傾斜が急になるほど地形の平均曲率分

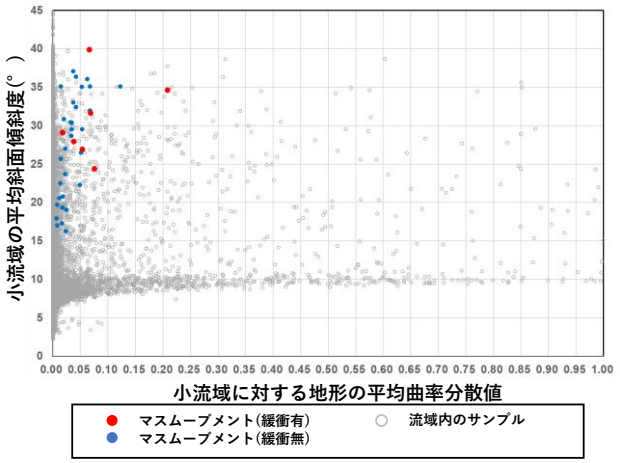


図-5　小流域の斜面傾斜度―平均曲率分散値の関係図

散値が小さくなる傾向を示している．この結果は，極端に傾斜度が緩急であれば，小流域の地形の凹凸は少なく，単一の面がなされていることを示唆している．

土砂生産領域を含む小流域に関して，斜面傾斜度は 15° 以上，地形の平均曲率分散値は全体小流域の集合域よりも大きな値を示す傾向が確認された．つまり，相対的に急な部類に属して，凹凸の多い小流域で土砂生産領域が発生しやすいことを示す結果が得られた．

土砂生産領域を含み土砂流出緩衝効果の認められた小流域に関して，総じて地形の平均曲率分散値は大きな傾向がありつつも，緩衝効果の認められなかった小流域との差は不明瞭である結果が得られた．

これらの結果を統合すれば，土砂生産領域は．相対的に急である斜面傾斜度 15 度以上，大きな地形の平均曲率分散値を示すと多く存在するといえる．そのため，相対的に急峻で凹凸の多い斜面で形成されている小流域は土砂流出するリスクが高いといえる．その一方で，土砂流出緩衝効果のあった小流域の結果をふまえると，土砂生産領域の多い相対的に急傾斜で凹凸の認められる小流域に過大な土砂流出緩衝にも寄与する小流域が内在しており，その緩衝有無の判別は区別しにくいことを示している．

(2)　林相による検証結果

五福谷川流域で確認された土砂生産領域を含む小流域の樹種，樹齢と地形の平均曲率分散値，および斜面傾斜度の関係を図-6(1),(2)に示す．なお，林相の林種は，その他(広葉樹)が天然林，それ以外は人工林に分類できることから割愛した．

図-6(1),(2)より地形的な環境条件に関しては大きな傾向を得ることが出来ない．一方で，樹種，樹齢より，その他広葉樹を除いて，樹種に関わらず約 25～50 年の樹齢に緩衝効果を示すものが多い傾向と，特にスギに関すれば 25～40 年に効果発揮された占拠率が極めて高い結果

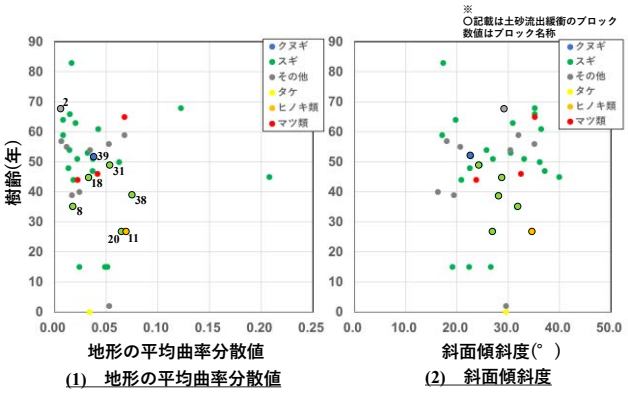


図-6　樹種，樹齢と地形条件の関係図

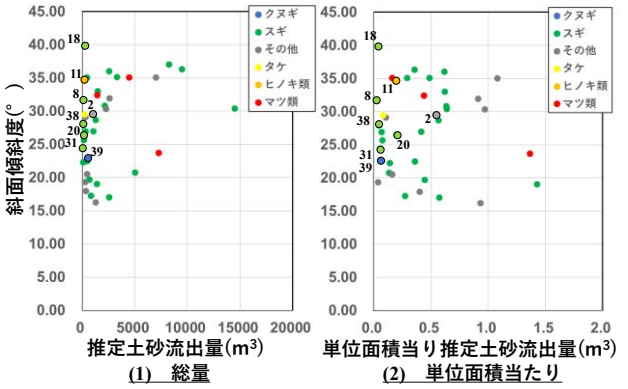


図-7　斜面傾斜度と推計土砂流出量の関係図

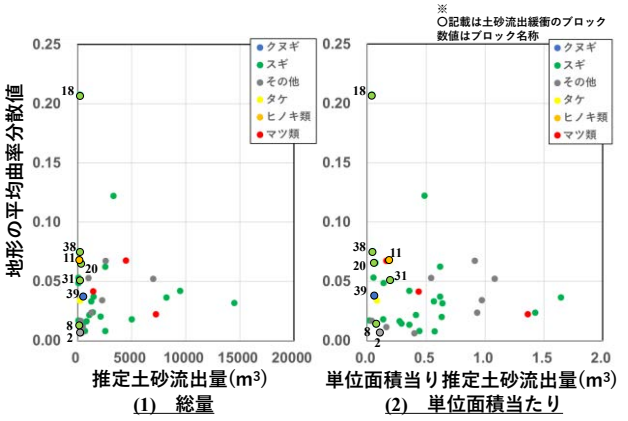


図-8　平均曲率分散値と推計土砂流出量の関係図

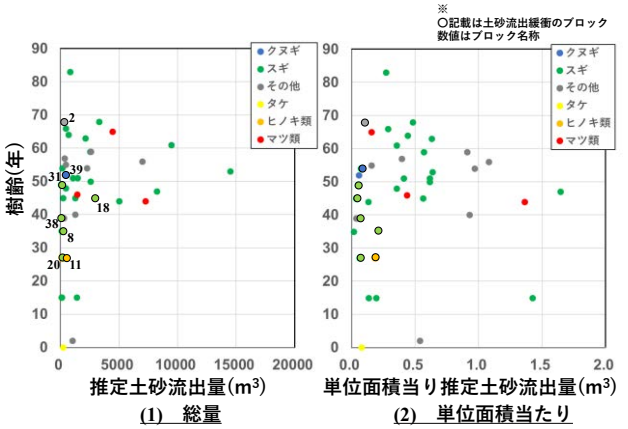


図-9　樹齢と推計土砂流出量の関係図

を得た．ちなみに先行研究で土砂流出緩衝の解析に取り上げたのは 8 ブロックになるが，この樹林帯はおおよそ 30 年の樹齢となる．あわせて，先行研究で成長と樹齢の関係を検証したが，五福谷川流域 8 ブロックのスギの成長率の高さが示されている [10]．この結果は流域内のスギは早熟であり，樹齢 25～40 年が成木相当となり強度も高まっている可能性を示唆している．また，先行研究で千鳥型の樹林配置が土砂流出に寄与した結果を得ている．あくまでスギだけに特化すれば，成長量と当時に植栽された樹林配置の両面が機能している可能性もある．五福谷川流域の樹齢 25～40 年のスギの機能性により土砂流出の緩衝効果に寄与した可能性を示唆している．

(3) 推計土砂流出量による検証結果

参考までに，被災前後の標高差分により五福谷川による土砂生産領域の含まれる小流域で求められた土砂流出の総量は 85,771m^3 となる．なお，小流域内で堆積した領域を土砂流出緩衝した領域と仮定した場合の土量は 7,672m^3 となる．この土量は，土砂流出緩衝効果を示した 8 ヶ所のブロックに集中する．厳密には，単純な土砂生産領域以外の現象の影響も土量に加わっている可能性があるものの，総土量の約 10%近くが土砂流出緩衝されている．

推計土砂流出量と地形，林相の関係図を**図**-7～9 に示す．各図の(1)は小流域の推計土砂流出量の総量，(2)は小流域の単位面積(1m×1m)の推計土砂流出量を示している．**図**-7 は斜面傾斜度と推計土砂流出量，**図**-8 は地形の平均曲率分散値と推計土砂流出量の関係図である．これら地形に関わる関係からは明瞭な効果の関係は示されていない．平均曲率分散値の結果(⑴の結果)から，土砂生産領域，土砂生産領域に内在する土砂流出緩衝を斜面の凹凸で分離することは難しい結果を得ているが，土量を併せても分離することが難しいことが明らかにされた．斜面傾斜度の結果(⑵の結果)から，15° 以上の小流域における斜面傾斜条件で不安定化する条件を得ているが，それ以上の傾斜度で特徴として分離できない結果を得た．

図-9 は樹齢と推計土砂流出量の関係図である．先に示す林相の特徴と同調して，スギの 25～40 年の土砂緩衝効果は明瞭である．その一方で，50 年前後まで緩衝効果を発揮するスギも存在するものの，土量の大小にかかわらずに緩衝効果を発揮できないものも多く認められていることが示された．土砂生産領域発生有無のサンプルが 50 年以上に集中していた可能性も示唆されるが，50 年以上の森林管理による差異を緻密に調査し，その特徴を求めることが必要といえる．

4．おわりに

土砂流出緩衝効果の期待できる普遍的な環境場の条件による特徴を明らかにし，生態系を活用した災害への対策として希少な知見を収集することを目的に，阿武隈川支川である五福谷川渓岸の土砂生産領域を対象にして，地形，林相の環境場の差異に着目した土砂流出緩衝効果を検証した．

検証より得られた結果を整理すると以下の通りとなる．

① 土砂生産領域を含む小流域は，斜面傾斜度は 15° 以上，地形の平均曲率分散値は全体小流域の集合域よりも大きな値を示す結果を得た．

② 結果①は土砂生産領域を含む小流域である一方，土砂緩衝効果を見込める条件も含む小流域である．ただし，推定土砂流出量による規模に検証から現在想定される地形条件だけで緩衝効果の発揮を分離できない．

③ 樹種に関わらず約 25～50 年の樹齢に緩衝効果を示すものが多い傾向と，特にスギに関すれば 25～40 年に効果発揮された占拠率が極めて高い結果を得た．樹齢 50 年以降の場合は，推定土砂流出量による規模に関わらず効果発揮の有無の判別が難しくなる．

五福谷川の地形，林相による環境場を検証した取り組みにより，環境の特徴を誘導したほか，数値地理情報を用いた土砂生産領域に対して Eco-DRR や EbA の効果を発揮できる地形，林相の情報に関する取り扱いの基盤となる方法を確立した．ただし，更に精緻化，もしくは高度化するための課題も明らかにされたた．今後，課題を解消することに努めて，Eco-DRR や EbA の実装に努めたい．

謝辞：この研究は，国土交通省水管理・国土保全局河川砂防技術開発，気候変動適応研究プログラム 気候変動影響評価手法の高度化に関するプロジェクト 流域生態系管理による気候変動適応効果の評価 PJ2-4，科学研究費補助金(挑戦的研究 21K18785)の支援により実施された．また，国土交通省東北地方整備局宮城県南部復興事務所，宮城県林業振興課に協力を受けた．ここに謝意を示す．

参考文献

1) 川越清樹，鈴木皓達，阿部翼：令和元年台風第 19 号による福島県の災害特徴，土木学会論文集 B1(水工学)，76 巻 1 号，pp.329-345，2020. [Kawagoe, S., Suzuki, H., and Abe, T.: Disaster characteristics of Fukushima prefecture by the 19th typhoon(2019), *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 76, Issue 1, pp. 329-345，2020.]

2) 辻本哲郎，藤田光一：流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向，土木学会河川技術論文集，10 巻，pp.13-18，2004. [Tsujimoto, T. and Fujita, K.: On scenario-driven research and development toward the

integrated management of the river basin scale sediment transport system, *Advances in River Engineering,JSCE*, Vol.10, pp.13-18, 2004.]

3) 石川芳治：気候変動に伴う希な豪雨に対応する土砂災害対策の課題，日本地すべり学会誌，57 巻 2 号，pp.41-43，2020.[Ishikawa, Y.: Forthcoming challenges to sediment disaster countermeasures which respond to rare torrential rains resulting climate change, *Jornal of the Japan landslide society*, Vol.57, Issue 2, pp.41-43, 2020.]
4) 橋本 彰博, 押川 英夫, 小松 利光：平成 29 年九州北部豪雨災害の特徴と得られた教訓，土木学会論文集 B1(水工学)，74 巻 5 号，pp. I_1087-I_1092，2018. [Hashimoto, A., Oshikawa, H., and Komatsu,T.: Characteristics of the 2017 flood disaster in north Kyushu and learned lessons, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 74, Issue 5, pp. I_1087-I_1092，2018.]
5) 吉田 圭介, 前野 詩朗, 工藤 亮治, 近森 秀高, 赤穂 良輔, 小川 修平, 永田 貴美久：2018 年 7 月西日本豪雨時の岡山県での降雨特性と旭川水系での洪水被害の調査解析，土木学会論文集 B1(水工学)，75 巻 1 号，pp. 172-183，2019. [Yoshida, K., Maeno, S.,Kudo, R.,Chikamori, H., Ako, R., Ogawa, S. and Nagata, K.: Statistical analysis of rainfall in Okayama prefecture and investigation of flood damages in the Asahi river basin attributable to the heavy rain event of July 2018, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 75, Issue 1, pp. 172-183，2019.]
6) 川越清樹, 林誠二，風間聡：森林資源の活用を考慮した斜面に対する Eco-DRR マップの開発，土木学会論文集 G(環境)，76 巻 5 号，pp. I_361-370，2020. [Kawagoe, S., Hayashi, S. and Kazama, S.: Development Eco-DRR map for slopes conshidering application of forest resources, *Journal of Japan Society of Civil Engi-neers Ser G (Environment)*, Vol. 76, Issue 5, pp. I_361-I_370，2020.]
7) 環境省：自然環境・生物多様性　生態系を活用した防災・減災，https://www.env.go.jp/nature/biodic/eco-drr.html，Site viewed:2023/04/01. [Ministry of the Environment: Natural environment and biodiversity, Disaster prevention and mitigation utilizing ecosystems, https://www.env.go.jp/nature/biodic/eco-drr.html，Site viewed:2023/04/01.]
8) 環境省：自然環境・生物多様性　生物多様性分野における気候変動への適応，https://www.env.go.jp/nature/biodic/kikou_tekiou.html，Site viewed:2023/04/01. [Ministry of the Environment: Natural environment and biodiversity, Adaptation to climate change in the field of biodiversity, https://www.env.go.jp/nature/biodic/kikou_tekiou.html，Site viewed:2023/04/01.]
9) Giovanni Forzieri, Vasilis Dakos, Nate G. McDowell, Alkama Ramdane and Alessandro Cescatti：Emerging signals of declining forest resilience under climate change，*Nature*, Vol.608，pp.534-539，2022.
10) 川越清樹，阿部翼，二瓶茜，佐藤大輝：令和元年東日本台風の事例を用いた土砂流出緩衝事例の検証，土木学会論文集 G(環境)，78 巻 5 号，pp. I_189-197，2022. [Kawagoe, S., Abe, T., Nihei, A. and Sato, D.: Verification of sediment discharge buffer effect using the east Japan typhoon 2019 case studies, *Journal of Japan Society of Civil Engi-neers Ser G (Environment)*, Vol. 78, Issue 5, pp. I_189-I_197，2022.]
11) 宮城県：森林情報システム，http://fgis-pref-miyagi.jp/, Site viewed:2023/04/01. [Miyagi prefectural gorvoment, Forest information system, http://fgis-pref-miyagi.jp/，Site viewed:2023/04/01.]
12) 西田顕郎，小橋澄治，水山高久：数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析，砂防学会誌，49 巻，6 号，pp.9-16，1997.[Nishida, K., Kobashi, S. and Mizuyama, T.: DTM-based topographical analysis of landslides caused earthquake, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 49, Issue 6, pp. 9-16, 1997.]
13) 木下博久，長谷川修一，野々村敦子，山中稔：谷密度を指標とした流域スケールにおける斜面崩壊危険度評価手法の検討，応用地質，59 巻 6 号，pp.472-484，2019. [Kinoshita, H., Hasegawa, S., Nomura, A. and Yamanaka, M.: Drainage density as slope failure susceptibility index in small catchment area, *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, Vol. 59, Issue 6, pp. 472-484，2019.]
14) 坂口 哲夫, 吉松 弘行, 杉本 宏之, 秦 耕二：非構造格子状に配置された数値標高による花崗岩山地における斜面表層崩壊の地形特徴，日本地すべり学会，40 巻 3 号，pp.182-190, 2003. [Sakaguchi, T., Yoshimatsu, H., Sugimoto, H. and Hata k. : Topographical features of slope surface collapses in granitic mountain area by using digital elevation data of unstructured grid setting, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol. 40, Issue 3, pp. 182-190, 2003.]
15) Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Landson.: Digital Terrain Modelling:A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications, *Hydrological Processes*, Vol.5，pp.3-30, 1991.