

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

SII-5-1 「自然災害と生態系サービスの関係性に基づいた  
創造的復興に関する研究」  
(JPMEERF19S20510)  
令和元年度～令和3年度

Research on Build Back Better Based on the Relationship Between Natural Disaster  
and Ecosystem Services.

〈研究代表機関〉  
九州大学

〈研究分担機関〉  
熊本大学  
東京海洋大学  
第一工科大学  
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

〈研究協力機関〉  
アジア航測株式会社

令和4年5月

## 目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 地域循環共生圏の確立と創造的復興の総合化 （九州大学、東京海洋大学、第一工科大学）	・・・・・・・・・・	22
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 自然災害と生態系サービスの関係性からみた創造的復興の提案 （熊本大学）	・・・・・・・・・・	37
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法 （九州大学、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所）	・・・・・・・・・・	52
要旨		

1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	..... 67
IV. 英文Abstract	..... 71

## I. 成果の概要

課題名 S II-5-1 「自然災害と生態系サービスの関係性に基づいた創造的復興に関する研究」

課題代表者名 島谷 幸宏 (九州大学大学院 特命教授)

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

### 研究経費

116,994千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和元年度：38,998千円、令和2年度：38,998千円、令和3年度：38,998千円)

### 研究体制

(サブテーマ1) 地域循環共生圏の確立と創造的復興の総合化

(九州大学、第一工科大学、東京海洋大学) (JPMEERF19S20501)

(サブテーマ2) 自然災害と生態系サービスの関係性からみた創造的復興の提案

(熊本大学) (JPMEERF19S20502)

(サブテーマ3) 災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法

(九州大学、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所) (JPMEERF19S20503)

### 研究協力機関

アジア航測 (株)

本研究のキーワード 地域循環共生圏、創造的復興、水資源、減災・防災、生態系サービス、文化的サービス

## 1. はじめに（研究背景等）

自然災害は、人命・財産に直接的な被害を与えるとともに、生態系の構造（物理化学的構造、および生物群集や生物多様性）を変容させ、その結果、生態系の機能としての生態系サービスに影響を及ぼす。2012年の北部九州豪雨は阿蘇カルデラに大きな被害をもたらしたが、草原の崩壊面積が森林に比べて小さいこと、水田や氾濫的環境に遊水機能を持たせることが有効であることが指摘されるなど、平常時の自然の管理状態や土地利用が、災害の発生や被害の大きさを左右する可能性も災害現場で観察されている。また熊本地震では地下水脈への影響により湧水の枯渇、地割れ等により放牧ができなくなるなどの暮らしや産業に影響が生じた。特に阿蘇地域は筑後川や白川など九州6つの1級水系の水源となっており、流域人口は240万人、さらに筑後川導水を通して福岡都市圏250万人の上水源となるなど、生態系サービスの中でも水の供給サービスは非常に重要である。また、阿蘇地域の復興を考えると、産業の基盤となる生態系サービスの復活や活用は不可欠である。一方、熊本県は熊本地震からの復興にあたって、単なる復興ではなく創造的な復興を基本的な方針としている。また環境省は第5次環境基本計画のなかで、「地域循環共生圏」の創造を目指している。

## 2. 研究開発目的

テーマ1における研究の目的は、①研究の全体を総合化し創造的復興を地域循環共生圏の創造につなげるための基本的な考え方を提示すること及び②自然災害と生態系サービスの関係性に基づいた創造的復興の具体的な方法を示すことの2点である。

## 3. 研究目標

全体目標	<p>プロジェクト全体を総括し、「地域循環共生圏の構築と創造的復興」に関する包括的提案を行う。阿蘇地域が大都市との共生圏を構築する際に重要な、草原の供給サービスの定量的評価を行う。また、発災時に自然資源を有効に活用してレジリエンスを高めるための手法を開発する。</p> <p>自然災害と生態系サービスの関係性からみた創造的復興手法の提案のため、攪乱と生物多様性、および自然条件・社会条件と災害との関係性を把握し、土地利用の見直し、伝統的な手法、自然環境の適切な管理などにより災害リスクを低減する創造的復興手法を提案する。阿蘇を代表する草原生態系の生物多様性が、草原管理方法、地形や気候とどのように関連し、維持されてきたのかを解明することを目的としている。</p> <p>災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法の提案のため、文化的サービス、地域の資源循環に配慮した災害復旧・基盤整備手法の開発を行い、阿蘇地域固有の生態系サービス・文化的サービスに特に景観の視点から光を当て、ともするとこれらに負の影響を及ぼしかねない土木の災害復旧の現在の方法論の見直しにつながるガイドラインを構築すること、そして、自然を適切に管理し、自然との関係性を考慮した土地利用を進める上で効果的な、阿蘇地域固有の自然資源を活用した工事手法を提案する。</p>
------	--

サブテーマ1	地域循環共生圏の確立と創造的復興の総合化
サブテーマリーダー /所属機関	島谷幸宏／九州大学
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プロジェクト全体の総括</li> </ul> <p>プロジェクト全体を総括し、「地域循環共生圏の構築と創造的復興」に関する包括的提案を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・草原の大都市圏への水供給サービスの定量的評価</li> </ul> <p>阿蘇地域が大都市との共生圏を構築する際に重要な、草原の供給サービスの定量的評価を行う。また、発災時に自然資源を有効に活用してレジリエンスを高めるための手法を開発する。</p>

サブテーマ2	自然災害と生態系サービスの関係性からみた創造的復興の提案
サブテーマリーダー /所属機関	皆川朋子／熊本大学
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>・攪乱と生物多様性との関係性把握</li> <li>・自然条件・社会条件と災害との関係性を把握し、土地利用の見直し、伝統的な手法、自然環境の適切な管理などにより災害リスクを低減する創造的復興手法の提案</li> </ul> <p>斜面崩壊によって植生が頻繁に破壊される箇所では、植生遷移が中断されることでいわゆる二次林が自然植生として成立する。このような自然のサイクルが生物多様性にもたらす影響について解析し、現在の植生構造と自然災害の分布や頻度との関係を明らかにする。一方、潜在自然植生が森林である日本において、草原は人為的な半自然環境として維持されてきた。そこには草原特有の生態系があり、独自の生物多様性が存在している。阿蘇を代表する草原生態系の生物多様性が、草原管理方法、地形や気候とどのように関連し、維持されてきたのかを解明することを目的としている。</p>

サブテーマ3	災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法
サブテーマリーダー /所属機関	樋口明彦／九州大学
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>・文化的サービス、地域の資源循環に配慮した災害復旧・基盤整備手法の開発</li> </ul> <p>阿蘇地域固有の生態系サービス・文化的サービスに特に景観の視点から光を当て、ともするとこれらに負の影響を及ぼしかねない土木的災害復旧の現在の方法論の見直しにつながるガイドラインを構築すること、そして、自然を適切に管理し、自然との関係性を考慮した土地利用を進める上で効果的な、阿蘇地域固有の自然資源を活用した工事手法を提案することを、目標としている。</p>

4. 研究開発内容

本研究では、研究目標に基づき、8つの骨子を定めた。サブテーマ1では（1）研究全体を総合化し創造的復興を地域循環共生圏につなげるための方法の提案、（2）草原の水共有サービスと経済的価値、（3）発災時の自然資源の活用手法（グリーンレジリエンス）、サブテーマ2では（4）斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示、（5）草原及び森林斜面における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示、（6）伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方を提示する。さらに、サブテーマ3では（7）文化的サービス（特に景観）を考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成、（8）建設工事における自然資源活用手法を提案する。

目的に対応し、大きく2つの体制を構築している。

【総合化の研究体制】

図1に示すように、S II-5の各サブテーマリーダーを集めた、総合化のためのタスクフォースを結成し、テーマ1サブテーマ1の草原の水資源の価値の成果を加えながらディスカッションし総合化を図る。

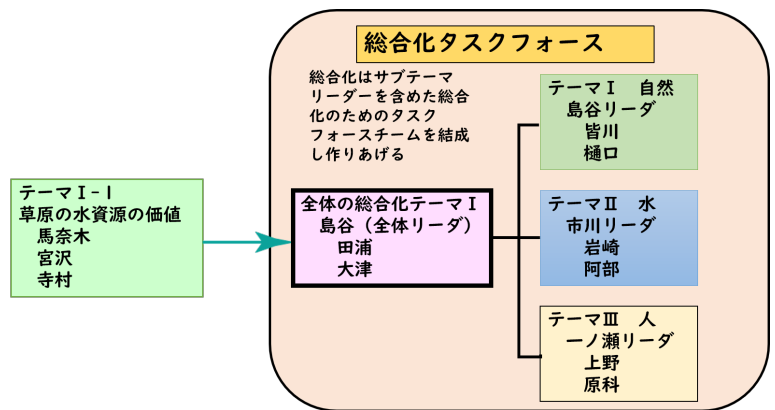
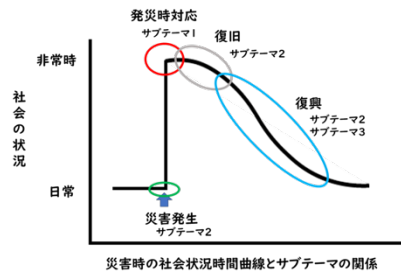


図1 研究を総合化するための研究体制図

【自然災害と生態系サービスの関係性に

## 【基づいた創造的復興の具体的な方法の研究体制】

災害時の社会状況と対応させて、図2に示すように災害発生時の自然条件と社会条件の関係性についてはサブテーマ2で、発災時に自然資源を活用しどのようにしてレジリエンスを高めるのかに関してはサブテーマ1で、災害復旧時の環境配慮についてはサブテーマ3で、災害復興時の自然資源の活用についてはサブテーマ2、3で扱う。



サブテーマ1 グリーンレジリエンス  
島谷、寺村、大津、田浦

サブテーマ2 自然条件・社会条件と災害との関係性  
皆川

サブテーマ2 攪乱と生物多様性  
皆川・副島

サブテーマ2 Eco-DRR  
皆川・副島

サブテーマ3  
樋口・榎本

サブテーマ3  
樋口・

図2 創造的復興の具体的な方法の研究体制

サブテーマ1は、研究全体の

総括、草原の水資源としての価値の解明、発災直後の自然資源の活用からなる。全体を総括する研究は、熊本県が熊本地震発生後に政策として挙げた「創造的復興」と環境省が政策として挙げた「地域循環共生圏」をどのように関連付け、それらの関連付けをもとに自立分散型の社会をどのように構築し、大都市等の他の地域との補完と支えあいの連携をどのようにはかり、阿蘇地域に持続的な地域社会を形成するかという問いに答えること目的としている。草原、河川・湿地・湧水・水田、森林・木材、石材の自然資源を対象に9つのサブテーマの研究成果に基づき、資源ごとに過去・現在・未来の価値を整理し、それらを共有、保全・再生・創出する手法について分析した。

また、阿蘇地域の生態系サービスの中で特に重要な草原の水供給サービスに着目し、阿蘇草原の優占群落であるススキの樹液流速や葉面積指数（LAI）を現地にて測定することにより蒸発散量を求め、野焼き草原の維持による水資源涵養効果を推定した。さらに都市圏に対する水供給サービスの経済的価値を見積もり、都市圏との経済的な関係を明示した。加えて、発災時に自然資源を有効に活用してレジリエンスを高めるグリーンレジリエンスの手法を開発した。

サブテーマ2では自然条件・社会条件と災害との関係性、攪乱と生態多様性との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法の提案を目指した。災害に関しては阿蘇カルデラ地域で頻発する斜面崩壊と水害、攪乱と生物多様性に関しては、草原及び阿蘇北向谷原始林を研究対象とし、（1）斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示、（2）草原及び森林斜面における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示、（3）伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方の提示を行った。

サブテーマ3では、災害復旧工法および阿蘇景観を調査し、景観を区分ごとの工事用道路の配置、工法、植生導入時の配慮、自然材の活用手法などを含む国立公園内の災害復旧時の環境・景観配慮ガイドラインを作成することを目指した。また、建設工事における自然資源の活用量および供給可能量調査、伝統技術調査を実施し、石材や木材を活用した時のコスト、経済循環量、CO2 排出量などを算出し、自然資源を活用した建設工法の提案を行った。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### サブテーマ1

##### （1）研究全体の総合化

戦略課題S II-5における各テーマ・サブテーマから出てきた結果を横断的に俯瞰し総合化を行っ

た。総合化を進めるにあたり、当該サブテーマと他の各サブテーマ、また、テーマグループの枠を越え、地域資源毎に横ぐしでのミーティングを複数回実施し俯瞰的に整理を図った。詳細な成果については全体報告書に記載しているため、ここでは概要を示す。

- ・ 創造的復興とは地域資源に新たな価値を発見あるいは再発見し、その新たな価値を地域内外と共有し、自立分散型の社会を構築することこそが創造的復興（すなわち価値創造の復興）として定義した。
- ・ 阿蘇地域の草原、樹林地・木材、河川・湿地・遊水地・水田、地質・石材、社会関係資本などの地域資源を対象として、水資源、防災機能、災害レジリエンス、生物多様性、風景・文化、地域経済循環、カーボンニュートラルなどの新たな価値を創造するために、9つの小課題を設定し、それらの価値創造に基づき自働分散型の社会を構築するための、制度、社会の仕組み、社会関係資本の再構築、地域資源活用の工夫や技術開発などについて研究したものである。
- ・ それぞれの小課題は地域資源を対象に様々な方法論・様々な視点から資源の価値創造に迫り、その活用方法などについて研究を実施した。それぞれの小テーマは複雑に絡み合い、全体像が構築されていった。特に社会関係資本はすべての項目と関連している。
- ・ 地域資源の価値の再発見または創造には過去、現在、未来の視座が重要であり、さらに循環共生圏のサイズ（圏域）は地域資源によって異なることを考慮することが重要であることが示された。

## （２）草原の水共有サービスと経済的価値

草原の水資源涵養効果に関して、C4植物であるススキの阿蘇の草原が水資源をどれほど供給しているのか価値を明らかにするため、本研究では植物の「蒸散」に着目した。これまで、植生による水資源消費である蒸発散(降雨中・後に発生する植物体表面あるいは地表面からの蒸発と、光合成に伴う植物体内からの蒸発：蒸散)については数多くの研究が実施されており、草原で森林よりも蒸発散が低いことが報告されている。しかし、これらの研究は樹木が生存し得ないような強烈な乾季の存在する地域の草原や、地中深くの湿った土壌や地下水帯まで根を伸ばすことができる深根性の樹木からなる森林が含まれており、これら研究で得られた知見を、湿潤な日本の半自然草原とその放棄後に発達した森林のような、同じ環境下に隣り合って成立した草原と森林の蒸散の蒸発散の比較にそのまま適用することは難しく、乾燥の影響がない阿蘇草原のような「湿潤環境下での蒸発散は草原で森林より低いのか？」という疑問に答えることは、現在の知見ではできない。

そこで本研究では、阿蘇草原の主要構成種であるススキを対象に、蒸発散の諸過程(降雨によって濡れた植物体表面からの蒸発である遮断蒸発と蒸散)のうち、草原と森林とで大きな違いが予想される蒸散に注目し、その計測に取り組んだ。

光合成の際に葉から蒸散として漏出する全ての水が茎(幹)を通ることから、茎にその内部の流速を計測する樹液流センサーを取り付けて、高時間分解能(10分間隔)で計測することで算出を試みた。樹木の幹で計測用に開発された既存の熱パルス比法樹液流センサーを改変した外部密着型HRMセンサーを自作し、計測および計測の信頼性の検証を実施した。

試験地は、阿蘇の草原を代表するススキおよびササの草原からなる、阿蘇外輪山の新宮牧野に設営した。ススキに密着型HRHセンサーを取り付け、熱パルス輸送速度(heat pulse velocity, HPV, cm/h)を計測した。また、密着型HRMセンサーを設置した状態で基部から切断し、切断面からの吸水量と密着型HRMを同時に計測することで、 $HPV-F_d$ 関係を構築した。観測で得られたHPVを樹液流速( $F_d$ , g樹液  $m^2$ 茎断面積  $s^{-1}$ )に変換し、蒸散速度( $F_d \times$  総茎断面積/調査地面積)を算出した。また、着葉量の指標である葉面積指数(LAI,  $m^2$ 着葉面積  $m^{-2}$ 地上面積)を定期的に計測した。

C3植物である多くの樹木やササ、草本植物とC4植物のススキでは、光合成の仕組みが大きく異なり、その違いが群落の蒸散速度、およびその環境変動への応答の違いを生み出していると考えられる。樹液流計測で得られた蒸散速度の違いの仕組みを理解し、また異なる気象条件下でのササ・ススキ・他の植生間の蒸散速度の比較を予測できるよう、個葉スケールでの蒸散および関連諸現象の



計測も同時に行った。葉の老化による生育期間後半での蒸散速度の低下については、春-夏の葉の光合成計測結果を基に再現された蒸散速度のモデル推定値と樹液流計測による実測値との比較を通じて、モデルの過大評価を指標として評価した。

計測によって得られたHPVから、樹液流およびそれを引き起こす蒸散を精度よく捕捉できていることが示唆された。葉面積指数(LAI)は芽吹きが始まる5月半ば以降に上昇を開始し、7月下旬には最大値に到達した。それ以降も開葉は続いたものの、基部では老化した葉の枯死が確認され、LAIはほぼ一定の数値を採った。最大値は $7\text{m}^2\text{m}^{-2}$ を越え、この付近の灌木林(ヤシャブシ)や針葉樹人工林(スギ)、広葉樹植栽地(クヌギ)よりも高い数値を採った。LAIが $3\text{m}^2\text{m}^{-2}$ を越えると地表面蒸発の寄与は検出できないほど小さくなるのが他計測では知られており、ススキ群落での地表面蒸発についても無視しうると考えられる。

異なる地域に成立したヤシャブシ群落とスギ群落が本研究のススキ群落と隣り合った場合の蒸散を推定して比較すべく、それぞれの個葉スケールの生理特性とLAI、そして新宮試験地の気象条件を入力値に蒸散速度を推定した。ススキについては、センサー設置前の7月以前についてはモデル推定値、その後はセンサーによる実測値を用いて蒸散速度を推定した。2021年の5月下旬から11月上旬の蒸散速度は、ススキ群落で110mmであったのに対して、ヤシャブシ林は約200mm、スギ林は約250mmを示し、ススキ群落の蒸散速度が明確に低いことが明らかとなった。実際にはヤシャブシ林は5月半ばには展葉を完了し、11月末まで蒸散速度を維持すること、ススキ群落は真冬の短い期間を除いて蒸散速度を維持することから、ススキ群落との年間蒸散量の差はさらに大きく異なると考えられる。

さらに、Case-1「5月以降、LAIが年間の最大値を採る」、Case-2「Case-1かつ葉は老化しない」の条件で蒸散速度を推定した。ススキ群落は、草原特有の開葉の遅さと葉の老化の早さ、そしてススキに特有のC4植物ならではの気孔調節により、この付近の森林よりも著しく低い蒸散速度を採ることが明らかとなった。これらのケースを鑑み、概ねススキの年間蒸散量は約130mm程度ということが明らかとなった。

ススキ、ササ、スギ・ヒノキ、ヤシャブシの年間蒸散・蒸発量について表1に示す。年間蒸散・蒸発量は、ススキ<ササ<ヤシャブシ<スギ・ヒノキの順に大きくなり、ススキ草原が水資源涵養効果が高いことが示唆された。なお、近年の研究で森林では遮断蒸発が多いことがいわれているものの、計測方法等は確立されていない現状がある。遮断蒸発はスギ、ヒノキでは10~20%とも言われており、この量は年間雨量から考えると350~700mmと非常に大きな値である。遮断蒸発は葉が濡れている時間と乾く速度が関係しているが、ススキやササは森林に比べて風が通りにくいいため乾きづらく、森林より遮断蒸発量は小さいと考えられる。これらから、水資源の保全の観点からススキを主とする草原を維持することは大きな価値を有することが示された。

表1 年間蒸発散量

		ススキ (C4)	ササ (C3)	スギ・ヒノキ	ヤシャブシ
年間蒸散量		約130mm	約200mm	約250mm	約200mm <sup>*1</sup>
年間蒸発量	林床面蒸発	ほとんどの期間でLAIが3以上のため、寄与は限定的(ゼロに近い)			
	遮断蒸発	スギ・ヒノキより低いと考えられる	スギ・ヒノキより低いと考えられる	8~13% <sup>*2</sup>	スギ・ヒノキより若干低い
年間蒸散・蒸発量		ススキ < ササ < ヤシャブシ < スギ・ヒノキ			

\*1 永野美徳他(2017) 阿蘇地域のヒノキ高齢低密度人工林における遮断率の観測, 日林誌99, 70-73.

\*2 Miyazawa, Y. et al(2017) Transpiration of trees in a cool temperate forest on Mt. Aso, Japan: comparison of model simulation and measurements., Ecol Res 32, 547-557.

次に、阿蘇の水資源の経済的な価値計測に関して、通常の産業連関表では水の貢献は明示的に含まれていないため、まず、水・土地を明示的に含む産業連関表を作成し、応用一般均衡（CGE）モデルによる評価を行うこととした。本研究では資本、労働、その他の3つによって分類できる産業の付加価値額を水の使用量と耕作地の面積を加えた資本、労働、水、土地の4つの分類に再配分した。本研究では、阿蘇の水資源を抱える熊本県とその恩恵を受けて経済活動を行っていると考えられる福岡県の両県を対象に、特に各県の農業における水の価値の算出を目指した。

STEP1では、先に述べた水・土地を明示的に含む産業連関表を作成し、その結果、水への支払いは経済活動への貢献という意味では、395億円の支払いがされていると言えることが判明した。市場で価値づけされてこなかった水資源を一種の資本ととらえた場合、生産要素として投入することにより、およそ31%の農業GDPに結び付くと捉えることができる。

次にSTEP2では、STEP1で作成した産業連関表をインプットデータとして、他に水資源の量の変化を外生的に加えて経済における均衡を求めた。本研究では、水を生産要素として明示的に取り入れた産業連関表を用いて、応用一般均衡（CGE）モデルによって水の価値の推移を計算した。シナリオでは、使用できる水量が今後減少していく想定のもと、計算をしている。この減少は、阿蘇の草原面積が過去100年に減少していることにより想定される飲用水の減少分とその他水田など水源涵養機能の減少により想定される湧水量分を想定している。

STEP3では、STEP2で最適化されて求められた経済の均衡から水の価値の推移をアウトプットした。ここで言う価値とは、水を生産要素として投入した際にリターンとして得られる収益の追加分を指す。結果から、今後水の価値が上昇していくことが予想された。

経済活動に対する貢献に加えて、阿蘇の水資源が持つより包括的な水の価値を算出するために、Contingent Valuation Method(CVM) を用いた研究も行った。CVMを用いることで、水資源の持つ利用価値、非利用価値を含めた阿蘇の水資源保全に対するmarginal willingness to pay (MWTP) を明らかにすることができる。WTPに関する調査は、令和2年12月7日～21日の期間にweb上で実施した。対象地域は日本全国を対象とした。阿蘇の水資源保全に対する支払意思額を明らかにするために、(1)水資源が人々の生活にもたらす恩恵についての説明、(2)森林・草原・水田がもつ涵養機能の説明および、水資源涵養についての知識、今後想定される水資源涵養量の減少についての重要度の質問、(3)CVMシナリオの説明、(4)MWTPの質問という手順で回答者に質問を行った。現在の阿蘇山から各地域への水資源供給量を629億m<sup>3</sup>であるとし、保全活動を行うか行わないかによって、今後の水資源供給量が維持されるか減少するかが決まる、というシナリオを設定している。保全活動を行う場合は、各世帯が税金を負担する必要があるが、阿蘇による水資源供給量を現状のレベルで維持することができる。保全活動を行わない場合は、税金の支払いは発生しないが、毎年約400万m<sup>3</sup>の水資源供給量の減少が生じる。補足情報として、支払いは10年間続くという仮定を提示した。上記のシナリオを提示したうえで、回答者に水資源保全のWTPについての質問を行った。回答者に「水資源を維持する活動のために、年間最大いくらまであなたの世帯から支払ってもよいですか」という質問を行い、支払いカード形式によって回答を行わせた。主な質問項目は、阿蘇を水源とする水の量が減ることに対する保全事業としての支払い意思額であるが、本研究では、「阿蘇」という言葉の持つブランド力や影響力の大きさを検証するため、質問文の中に「阿蘇」という文言を入れたグループと、入れないグループの2つに分けてWTPに関する質問を行った。

抵抗回答調整済みのWTP（全国）に関して、阿蘇情報の有無間で平均WTPを比較すると阿蘇情報を入れないグループのWTPが大きいという結果が出た。また、九州地方では阿蘇の情報を含める場合と含めない場合とでは後者の方が高いWTPを示すことがわかった。この両者の間には、母平均の差があることも裏付けられており、九州の人々にとって山奥の水源地は気軽に訪れることが難しく意識されることが少ないためか、日常に使う水ほどには大切さが認知されていない結果が得られた。九州内の県別で水資源保全に対するWTPを推定したところ、福岡県以外の県で、阿蘇情報なしのグループの方が阿蘇情報ありのグループより高いWTPを示している。中でも、佐賀県と長崎県では阿蘇情報ありとなしの場合のWTPの差が大きい。一方で、熊本県、宮崎県は阿蘇情報あり・なしの差が小さいこ

とが示された。

### (3) 発災時の自然資源の活用手法（グリーンレジリエンス）の提案

災害時のレジリエンス自然の恵みを活用し、災害を減らし、災害から立ちあがることを、グリーンレジリエンスと定義した。災害直後のレジリエンスを高めるためには、家庭での備蓄や近隣の自然資源のストックポテンシャルが高いことに加え、その資源を使うことができる「活用力」が重要である。

本研究では、南阿蘇の農村地域と熊本市（椿ヶ丘地区）の市街地において、熊本地震発災時の水や自然資源の利活用についてのアンケート調査（各20世帯）を行い、その差異からグリーンレジリエンスについて検討した。アンケート方法は、対面またはgoogle formによるWEB入力、内容は発災時の避難行動、避難生活の仕方や、各家庭の備蓄の数量・利活用実績、その地域内での自然資源の存在と距離を図るため、①基本情報、②避難状況、③水の調達、④食料の調達、⑤生活にかかわるエネルギーの調達の5つの項目を設け、選択肢方式と自由回答方式を組み合わせた。

特徴的であったのは、水資源の利用において、熊本市内では給水車や配給によって水を得ていたことに対し、南阿蘇では湧水の利用が顕著に見られた。逆に、水の備蓄は熊本市内の方が多く、これらは、南阿蘇では地域内に湧水資源が豊富にあり、日常的な利用や認知があるため、地域ストックとして水資源が確保されているといえる。南阿蘇の南郷谷の主要な湧水から5km圏内は、南郷谷の人口分布をほぼ網羅しており、湧水と生活圏の重複が、発災時に有効に働いたといえる。

食料備蓄においては、圧倒的に熊本市内より南阿蘇のほうが多くのストックがあった。南阿蘇では75%の世帯が備蓄を利用し、80%の世帯が地震直後(3日ほど)食料調達に困らなかった。熊本市内では、数日程度の生存に必要な備蓄は存在したが、その利用があまり見られなかった。南阿蘇は自然資源が豊富であることもさることながら、その資源を活用できる日常的な技術や機材を有していることが明らかになった。グリーンレジリエンスは、地域の自然資源が日常的に利用できる状態で維持されていること、また、自然資源を活用できる技術を有していることが重要であることが明らかになった。

加え、特に湧水について着目すると、阿蘇南郷谷の江戸時代の集落形成史は湧水に依存している。白水地区は湧水が豊富で用水が発達せず、且つ湧水が多く湧出するエリアより標高の高い位置には集落・水田が形成されなかった。湧水資源が乏しい久木野と長陽では外輪山久木野側では用水開発、長陽ではため池開発が行われ、この水資源より低いところで集落・水田が発達した。阿蘇谷でも湧水と集落位置の関係を相関性があり、湧水資源に依存して集落が形成されてきたことがうかがえる。これらの自然資源の活用をベースとした集落形成が熊本地震時の湧水利用につながったと考えられる。自然と共生してきた地域社会の履歴が災害レジリエンスに大きく寄与したといえ、これがグリーンレジリエンスの根幹をなしているといえる。

また、農村部におけるレジリエンス拠点の要素案として、電力の自立化に着目し、Jet水車による約1.5kWの発電パッケージを持ち込み、南阿蘇村両併地区住民の協力を得て、発電デモを実施した。また、水の自立化に関し、地区内に雨水タンクを設置している家庭において、発災時だけではなく日常的な雨水の利用可能性を確認した。ただしコロナ禍が影響し、拠点の設置までは実現ができなかったものの、グリーンレジリエンスに必要な要素や可能性を確認することができた。

### サブテーマ2

サブテーマ2では、自然条件・社会条件と災害との関係性、攪乱と生態多様性との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創作的復興手法の提案を目指すものである。災害に関しては阿蘇カルデラ地域で頻発する斜面崩壊と水害、攪乱と生物多様性に関しては、草原及び阿蘇北向谷原始林を研究対象とし、(4)斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示、(5)草原及び森林斜面における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示、(6)伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化

策のあり方の提示を目的とした。

(4) 斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示

植生の根茎の緊縛力による斜面崩壊抑制機能、流出土砂からの暴露を回避・低減する森林の緩衝機能を活用した土砂災害の低減策を提示するために必要な基礎知見を得るため、斜面崩壊に対する植生の寄与を一般化線形モデルにより評価した。対象としたデータは、平成24九州北部豪雨による一次谷で発生した表層崩壊データである。植生の他、崩壊に関する地形、地質、降雨等に関する変数を説明変数、崩壊・非崩壊を応答変数として分析した結果、阿蘇カルデラのような特殊な火山地域においても樹木の根茎による緊縛力により崩壊抑制効果が認められることが示された(図3)。また、構築した斜面崩壊確率予測モデルを用いて阿蘇カルデラ内の斜面の崩壊確率を可視化し(図4)、斜面崩壊に対して脆弱性が高いエリアを特定することができた。

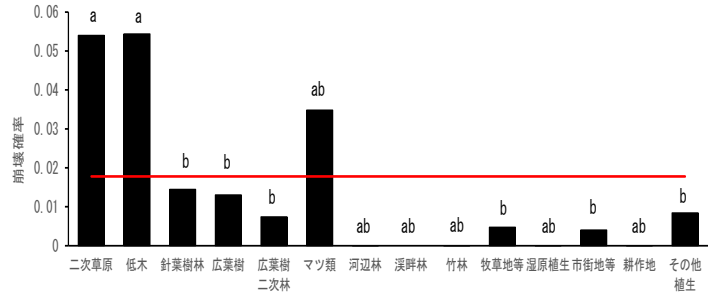


図3 一般化線形モデルにより得られた植生の回帰係数の比較 (異なる英文字間にはP<0.05で有意差, Tukey-Kramer法)

また、構築した斜面崩壊確率予測モデルを用いて阿蘇カルデラ内の斜面の崩壊確率を可視化し(図4)、斜面崩壊に対して脆弱性が高いエリアを特定することができた。

また、本地域では人為により維持されてきた草原が減少する一方で森林が増加し、現在、一次谷斜面の植生の約35%が人工林(針葉樹林)を占めている。樹木は斜面抑制や緩衝林としての機能を有する一方で、斜面崩壊が発生した場合、崩壊深や流下する立木の量は他の植生と比較して大きく、その斜面下部に集落等により甚大な被害を引き起こす恐れがあるため、これを考慮する必要がある。針葉樹林斜面を対象に、上記同様に地形、地質、降雨量、針葉樹などの樹高や収量比数等を説明変数とした一般化線形モデルによる解析し、崩壊確率予測モデルの構築し可視化した(図5)。また、空中写真から得た針葉樹林の立木密度や樹高等の基礎データを取得し、これを用いて立木の量を算出した。これにより緩衝林としての機能が見込まれるエリア、崩壊確率の高いエリアのう

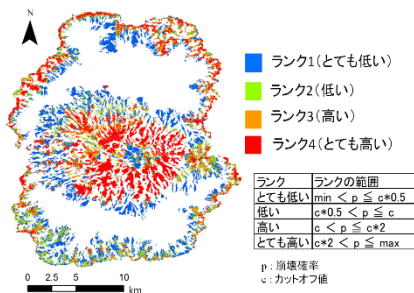
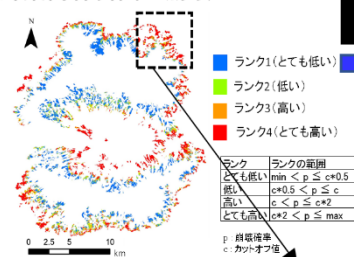


図4 時間最大雨量120mmにおける斜面崩壊崩リスク予測結果

針葉樹林斜面の崩壊リスク



緩衝機能の保全

崩壊リスク、被害大 → 低減策

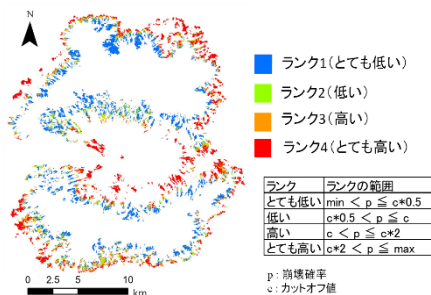
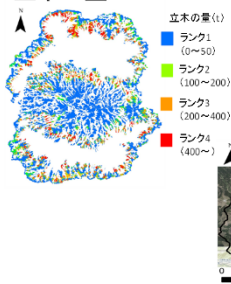


図5 時間最大雨量120mmにおける針葉樹林斜面の崩壊リスク予測結果

立木の量



森林拡大 → 災害大

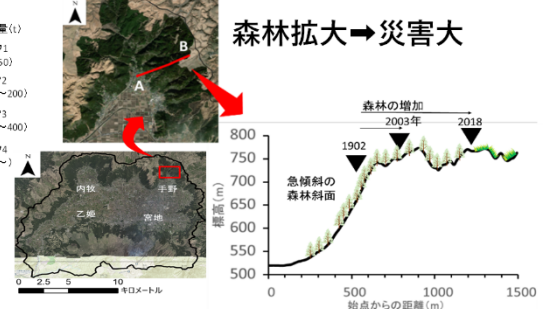


図6 成果の活用例

ち、立木量を考慮することで、災害被害がより大きくなるエリア等を推定でき、斜面崩壊による減災対策を講じる際の基礎資料とすることができ、具体的な斜面植生のあり方を提示することができる（図6）。

**（5）森林斜面及び草原における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示**

地すべり等の自然攪乱はしばしば同じ場所で繰り返され、そのたびに植生遷移は中断されて初期段階に引き戻されることになる。阿蘇北向谷原生林は、西日本における極相の常緑樹林であることから国の天然記念物に指定されているが、斜面上部には地すべりによって生じたと考えられる落葉樹林が存在する。この場所の落葉樹林は、遷移段階途中の二次的なものではあるが自然植生であり、攪乱からの経過時間の違いによって異なる遷移段階の植生が混在することが推定される。本研究では、斜面崩壊による攪乱（災害）頻度が植生にどのように反映されているのかについての基礎的な知識を得るとともに、二次林の組成が生物多様性に及ぼす影響を評価するために、阿蘇北向谷原生林を対象として31地点のコードラート調査を含む詳細な植生調査を行った。植生の航空写真と現地調査の結果から得られた植生図（図7）は、従来作成されていた植生図よりも広い範囲に二次林が成立していることを示しており、過去の攪乱が推定されていたよりも大きな影響をおよぼしていることが明らかになった。また、コードラート調査で得られた種組成についてのクラスター解析や主成分分析の結果は、遷移段階の異なる二次林がモザイク状に存在していることを示した（図8）。このことは、異なる遷移段階の林が共存することによってより多くの種が生育していることを意味している。極相と自然二次林のモザイク状の存在は、頻繁に起こる災害による攪乱によって動的な平衡状態にあることを示すものであり、繰り返される攪乱の結果として生じた異なる遷移段階の植生は、二次的な自然ではあるが、自然植生としての多様性を高める役割を果たしていることがわかる。一方、攪乱の頻度には地形や地質が大きな要因として働いていると考えられる。阿蘇北向谷は稜線付近に崩壊しやすい溶岩層があって急傾斜となっており、地質図を重ね合わせると、2016年の熊本地震による崩壊がその部分で起こっていることがわかる（図9）。

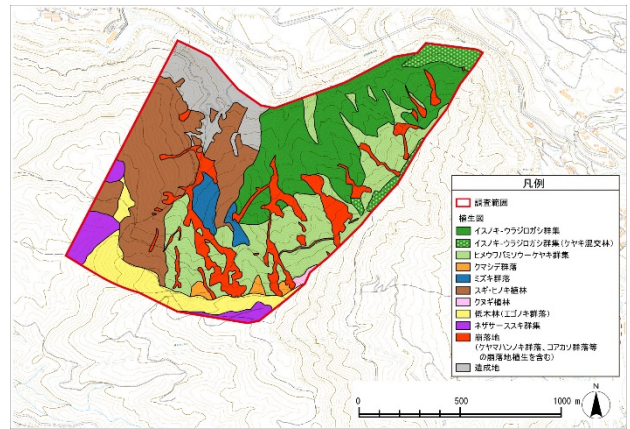


図7 阿蘇北向谷原生林植生図

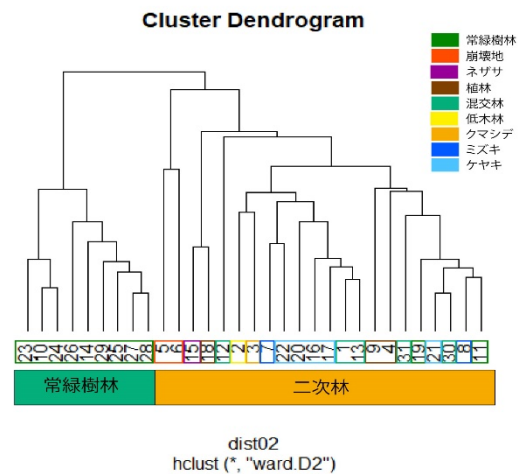


図8 コドラートの植物種組成についてのクラスター解析結果

繰り返り起こる崩壊は、攪乱からの回復の段階が一樣でない二次林の成立に寄与している。それは地形や地質などの自然状況に応じたものであり、そこに生じる段階的な二次林の存在は自然な生物多様性に重要な役割を果たしていると考えられる。繰り返される遷移の初期化は自然の動的平衡といふべきものであり、崩壊

地などへの安易な緑化などは避けるべきであろう。今後の具体的な生物多様性の保全と管理手法のあり方を検討する上で、このような二次的な自然植生の価値についても評価する必要がある。

草原に関しては、草原の生物多様性について人為的攪乱や微地形との関係性、採草型草原の地理的変異について解明し、これを踏まえ、管理のあり方を検討した。

過去6年間における人為的攪乱(野焼きや採草)の程度が異なる草

原の4種類の処理区(S1~S4)において、植生調査を行い、TWINSpan解析により植生分類を行った。その結果、S1~S4処理区において、5つのグループが認められ(図10)、採草の回数が多いS1処理区は一つのクラスターを形成していた。野焼きの比率が高く、採草回数が少ないS2~S4処理区ではグループがやや混在していたが、S1処理区とは明らかに異なる種組成の草原が成立していた。これらの結果は、人為的攪乱の種類や頻度の違いによって、成立する草原の種組成が異なることを示唆している。また今回の調査地のような限られた場所の中において、種組成が異なる草原が混在しているということは、阿蘇の草原における種多様性を高めている要因の一つに、草原維持のための人為的攪乱の程度の違いが関係していると考えられる。

採草型草原の地理的変異を解明するため、阿蘇全域の14カ所において植生調査(種名、被度)を行い、TWINSpan解析およびNMDS解析を用いて、クラスター解析を行った。さらにクラスター解析で得られた地理的な傾向がみられる要因を特定するために、各ライントランセクトにおける気象要因(気温や湿度、降水量、降水日数、日照時間など9要因)、土壌要因(容積重や炭素含量、石灰含量、水素イオン濃度(PH)、火山灰層の厚さなど11要因)を用いて、CCA(Canonical Correspondence Analysis: 正準対応分析)と呼ばれる解析を行った。クラスター解析の結果、阿蘇地域内において、東外輪のクラスターと西外輪と北外輪のクラスターが認められた。東外輪の草原とその他の地域の草原の種組成が明瞭に異なっていることを示唆している。さらにCCAによる要因解析の結果、気象要因に関しては、東外輪の植生とOPR(年間降水日数)が関連していると示された。また土壌要因に関しては、東外輪の植生とCA(炭素集積度)を除く3つの要因(PH(水素イオン濃度)、BS(塩基飽和度)、LAT(AT(始良Tnテフラ)~AK(鬼界アカホヤテフラ)間の地層の厚さ)が関連していることが示された。つまり、東外輪地域は他地域よりも雨の日数が多く、火山灰土壌が卓越していることで、他地域とは異なる草原が成立している可能性が示唆された。阿蘇の

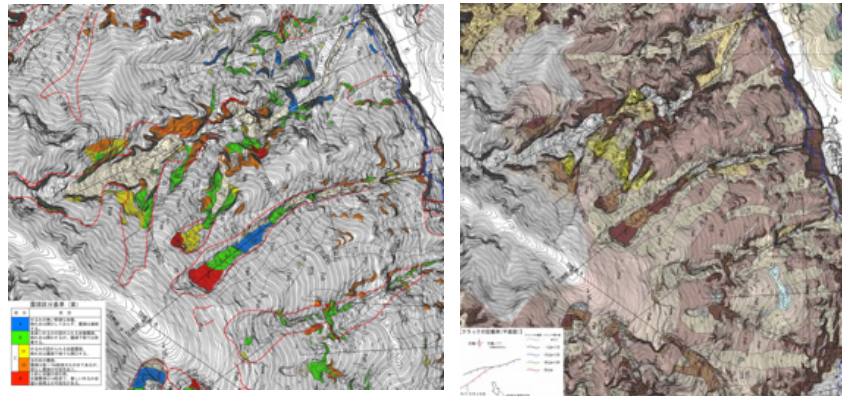


図9 阿蘇北向谷原生林 左：熊本地震による崩壊場所 右：地質図

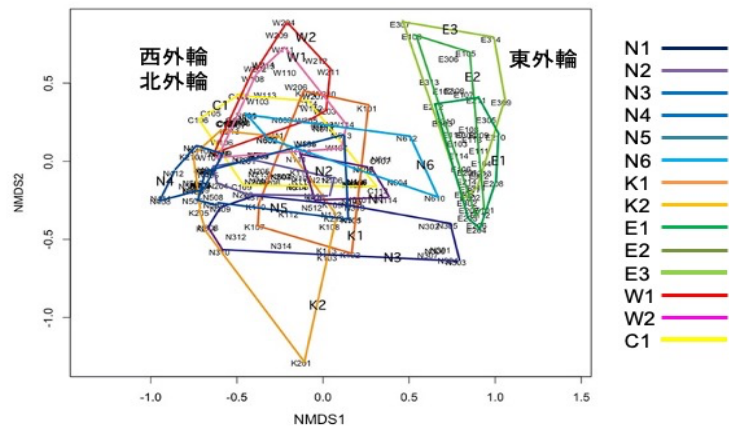


図10 NMDS法による阿蘇全域の草原のクラスター解析

東外輪地域は、偏西風の影響により火山灰が常に降灰し、東外輪のLATの火山灰層の厚さは西外輪の約10倍はある。これにより東外輪地域と他地域では成立する土壌が異なり、その結果そこに生える植物にも大きな影響が生じているものと思われる。今後、生物多様性の高い草原を維持していくためには、これまで行ってきた野焼きや採草によって継続的に攪乱を加えること、また地域によって成立する草原が異なることから、地域による違いを考慮に入れた草原管理が求められる。

## (6) 伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方の提示

本地域で行われてきた伝統的治水及び自然地形と浸水リスクとの関係性を評価し、これを踏まえ遊水地、水害防備林及び道路をかさ上げた横堤、田んぼダム導入による流出抑制や氾濫流抑制効果を評価し有効性を示した。さらに、田んぼダムは防災意識の向上に寄与すること、黒川に整備された5つの遊水地の氾濫原依存種の生育・生息場として機能していること、防災と生物多様性が両立した管理のあり方を示すとともに、これを発信・共有するための環境・防災教育副読本を作成し行政と地域住民に提供した。

### ①阿蘇地域における伝統的治水と土地利用

阿蘇カルデラ地域の自然地形の形成や加藤清正からこれまでに行われてきた自然地形を生かした治水対策、土地利用を資料やシミュレーションにより整理した。黒川流域においてはかつて湖や湿地帯が広がる氾濫原であったが、埋立、蛇行部の直線化を主とする河川改修、圃場整備及び排水工事等によって湿地は水田や畑地に転換された。しかし氾濫リスクは依然として高く、熊本県は7つの遊水地やダム整備による治水対策を計画した。これは黒川流域で氾濫した流量を遊水地に貯留させ、下流への流出量を増加させない治水方式であり、これらの遊水地はもともとの環境である氾濫原環境の一部の機能を再生し減災を図るものであり、自然を生かした減災防災（Eco-DRR）の事例として位置づけられる。集落は、氾濫リスクが小さい自然堤防上の微高地や山際に形成され、カルデラ床から水田―集落、山腹斜面下部に屋敷林・里山林―草原―外輪山上部。

### ②伝統的治水工法を活用した超過洪水対策の検討と提案

超過洪水に対してはさらなる流出抑制対策や氾濫流制御のための対策が必要である（図11）。遊水地の増設、水害防備林、道路かさ上げによる横堤の整備について治水効果をシミュレーションにより評価した。遊水地による流出抑制に加え、局所敵な氾濫流制御には、既設の道路をかさ上げた横堤により、氾濫流の低流速化、家屋被害の軽減に効果を発揮する可能性を示唆した（図13）。

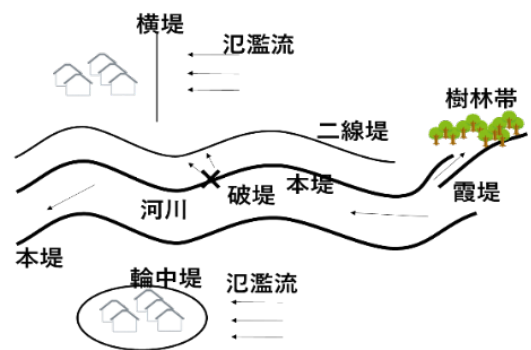


図11 横堤、水害防備林等伝統的治水工法概念図

### ③田んぼダム導入による流出抑制と防災意識の向上

浸水リスクが高い黒川流域における流出抑制対策としての田んぼ導入による流出効果を評価し、支川や本川でピーク流量が低減されることが確認できた（図14）。また、田んぼダムの実装にむけ、南阿蘇村と連携し4地区に田んぼダムを導入し（図15）、導入による課題や田んぼダム導入による防災意識への影響についてアンケート調査を実施した。その結果、降雨情報に対する意識、関心の高まり等が確認され、田んぼダムは防災意識の向上に寄与すること、さらに住民同士や住民と行政、上流域―下流域をつなぐコミュニケーションツールとして役立つものと期待される。

### ④遊水地を活用した生物多様性保全機能の強化策の検討、提示

5つの既設の遊水地すべてで湧水が確認され、これらの遊水地における湿地の形成は、計画時に意図されたものではないが、本地域一体は湧泉帯であることや地下水水位が高いことに起因するものと考えられた。遊水地における生物調査の結果、重要種27種を含む合計357種の氾濫原依存種を含む多様な生物のハビタットとして機能し、阿蘇地域の生物多様性を保全する上で高いポテンシャルを有していることが確認された。また、遊水地が計画されている旧河道ではオヤニラミ（環境省絶滅危惧種ⅠB類）が確認され旧河道を保全した遊水地設計を行う必要性が示されたため、情報を遊水地の計画を行う熊本県阿蘇地域振興局に2020年5月に報告し、その後、オヤニラミの生息場を残存させた遊水地計画が立案された。

遊水地における氾濫原依存種の生育生息場としての機能を維持するためには、貯水機能を担保しつつ、生物多様性の保全を両立させる管理を行うことが求められる。特に氾濫原生態系の保全が日本の生物多様性において重要であること等、行政や住民に対して情報を共有することが必要である。加えて、治水施設である遊水地は、防災教育の場として教育効果が高く、さらに環境教育と防災教育を組み合わせることでより教育効果を高めることができる可能性がある。これを踏まえ、環境・防災教育のための教材としての読本を作成した（図16）。読本を活用した現地での環境・防災教育やプログラムの実施に関しては、コロナウィルス拡大状況を踏まえ実施し、生物多様性の保全や環境保全・防災意識の向上を図り、住民、管理者などと情報を共有しながら、維持管理のあり方や地域の将来像を模索し、かつ、これをコミュニケーションツールとしても活用し、地域コミュニティ、地域防災力の強化を、環境省「気候変動適応における広域アクションプラン策定事業」災害分科会とも連携を図りながら進めていく予定である。

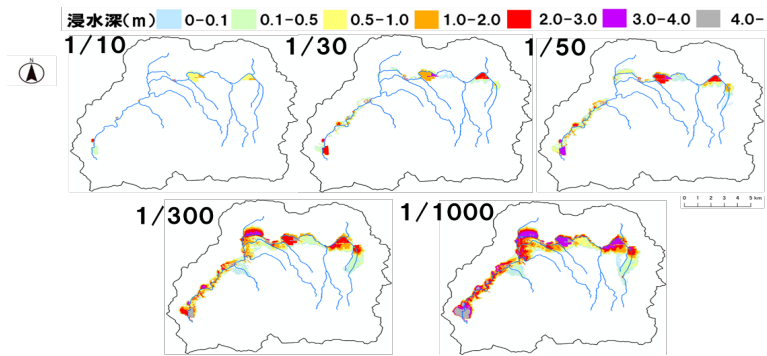


図12 超過洪水に対する氾濫予測（現状+計画遊水地整備後）

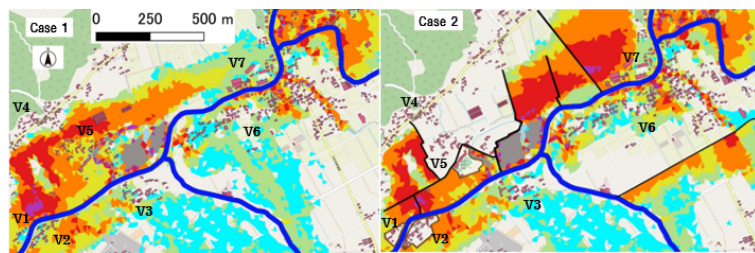


図13 道路を活用した横堤による氾濫流制御予測結果（左：現状、右：横堤あり）

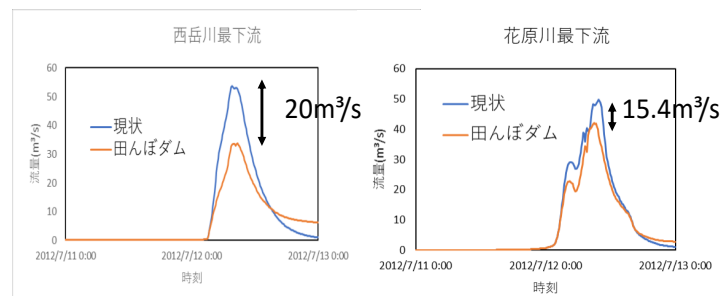


図14 田んぼダムによる流出抑制効果



図15 南阿蘇村と連携による田んぼダムの試験導入





図16 情報共有のための環境・防災教育副読本

サブテーマ 3

(7) 文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成

①災害復旧事業の現状把握調査

阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域を主対象として、近年の地震災害・豪雨災害後に実施された災害復旧事業の概要を、事業担当部局へのヒアリングや画像資料等の収集・分析等により把握した。また、工事本体はもちろん工事用道路のレイアウト、植生導入の有無等も含めて、どのような判断でどのような工法が選定されたのかについて、事業主体等関係者へのヒアリング等により把握した。ヒアリング等の対象には、砂防・治山関連事業、防災関連の道路整備事業、調整池を含む河川改修事業等が含まれている。

その結果、災害復旧事業のほとんどで景観や環境分野の専門家によるアドバイス等がほとんど行われておらず、事業主体の判断で事業手法・設計が選択されていること、それらの多くが発災前に存在していた阿蘇らしい風景から大きく変容してしまっており、文化的サービスの質を低下させていることが明らかになった。

②阿蘇固有の歴史的・文化的景観の特性を知るためのフィールドサーベイ調査

阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域を踏査することにより、河川流域の景観特性、田園集落周辺の景観特性、農地周辺の景観特性、森林周辺の景観特性、市街地周辺の景観特性、道路沿線の景観特性等の把握をおこなった。また、阿蘇地域の歴史関連資料を収集・精読すること、郷土史家等にヒアリングすることにより、阿蘇固有の歴史的・文化的景観の形成過程について把握に努めた。

その結果、阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域では、縦断的な地形の変化に対応して牧野、森林、集落、生活道路、農地等の土地利用が古くから分布しているが、それぞれのエリア内に牧野道、集落石垣、寺社石垣、石橋、農業利水施設、農地石垣等々、実に多様な歴史的・文化的構造物が多数分布し、阿蘇らしさの形成に重要な役割を担っていることが明らかになった。

一方で、こうした構造物の多くが被災後の復旧工事でコンクリート主体の従前とは大きく異なる姿に変容していることも明らかになった。

③砂防、治山分野での景観に配慮した災害復旧関連公共事業の先進事例調査

砂防、治山分野で国内に存在する景観に配慮した災害復旧関連の公共事業について、事例調査を

実施した。砂防、治山に重点を置いたのは、災害復旧事業の中でも景観への影響が大きいことによる。砂防、治山分野で景観に配慮した先進事例である広島県の紅葉谷川砂防庭園等を調査した結果、地域の石材を巧みに活用し周辺の環境と調和した空間を作り出すことが可能であることが明らかになった。

#### ④英国の湖水地方国立公園における災害復旧事業の状況についての調査

過酷な自然環境の中での人々の営みが評価され世界文化遺産に登録されている英国の湖水地方国立公園を対象に、災害復旧時にどのような考え方や手法で公共事業が実施されているかについての調査を実施した。同国立公園の管理運営計画を精査すると主に、管理主体の職員に対するemailでのヒアリングをおこなった。

湖水地方においても阿蘇同様にほぼ毎年洪水等の自然災害に見舞われているが、災害復旧においては従前の歴史的な姿に戻すことが原則となっていること、それが不可能な場合には事業主体だけでなく専門家と地域市民が参加して復旧のあり方やデザインについて協議し決定していること、そのプロセスにかかる時間をできるだけ短くする（早期に災害復旧を実現する）ためのメカニズムが存在していること等が明らかになった。

#### ⑤観光客に対するアンケート調査

阿蘇を訪れる観光客を対象に、阿蘇に存在する河川護岸、道路等の法面、砂防・治山構造物等どのような印象を持つかを問うアンケート調査を実施した。この調査は、景観や環境の専門家ではない一般の人々の意識を把握することを目的としている（同様の調査を地元居住者に対しても実施を予定していたが、新型コロナ禍のため行えなかった）。

阿蘇に存在する土木構造物の写真パネル（阿蘇に現存する道路脇の土留擁壁、道路脇の農地端部、黒川及び白川の河川護岸、砂防・治山堰堤等のそれぞれについて歴史的な構造物と近年整備されたものの写真を10枚前後混在させたもの）を、阿蘇神社や道の駅等で観光客600人に見ていただき、阿蘇に馴染んでいる写真とそうでない写真を選んでいただくとともに、その理由をコメントしていただいた。

全ての構造物に共通した傾向として、コンクリートを用いたものは「阿蘇らしくない」と評価され、歴史的な石積みや緑で覆われたものは「阿蘇らしい」と評価されるという結果になった。

特に砂防・治山堰堤に関しては「自然環境への悪影響を少なく」、「緑が早く戻るように」、「展望地や道路から見えないように」、「目立たない色に」、「小規模に」等のキーワードが多数を占め、現在の公共土木事業の方向性が観光客の意識とずれていることが明らかになった。

#### ⑥デザインガイドライン案の作成

上記の①から⑤までの調査結果等を参考に阿蘇における公共土木事業のためのデザインガイドライン案を取りまとめた。構造物それぞれについて望ましい設計手法と配慮すべき事項等を提示している。

### (8) 建設工事における自然資源活用手法の提案

#### ①地場産石材の採石状況・活用状況等の調査

地域行政組織及び地域土木建設業者等へのヒアリング等により、阿蘇地域で地場産石材の採石の有無や地場産石材の活用状況、地域外からの石材の使用状況等について調査を行った。また、地域内の各種土木工事で発生するいわゆる残土に含まれる石材の取り扱いについても調査を行った。

その結果、阿蘇地域は自然公園法により新規の採石が禁止されていること、以前は数カ所の採石場が存在していたが現在はほぼ全て閉鎖されていること、公共事業で石積みを採用するケース自体が極めて少ないが、採用する場合も地域外から搬入した石材を使用することが多く、地場産の石材を用いるケースは極めて限定的であること等が明らかになった。

一方、砂防・治山事業をはじめとして多くの公共事業で大量の石（野面石）が掘り出されていることが明らかになった。それらの一部は建設事業者が個々に確保している残土処分場に貯留されており、中には分別した上で空積みの石垣の材料として使用され、その中に土砂が貯留されている事

例もある。

## ②阿蘇地域に存在する歴史的石積み建造物の調査

阿蘇地域に多数存在する石垣や石橋等の石積み建造物を対象に、構築された時期、石積み手法の特徴、材料に用いられている石材の地質学的起源や調達方法等について調査を実施し、阿蘇固有の石積みは重要な歴史的・文化的資産、風景構成要素であることが明らかになった。

## ③阿蘇地域に適した地場産石材の利活用のあり方についての検討

阿蘇地域における文化的サービスの質を上げていく方策の一つとして、貴重な地域循環資源である地場産石材を今後効果的に利活用していくための手法について検討した。また、地場産石材を公共事業に活用することによる地域経済循環率や二酸化炭素排出量抑制への貢献の程度についても検証した。採石場がないことから当初地場産石材の確保は困難であると考えていたが、砂防・治山事業等で大量の石材が掘り出されている現状が判明したことで、それらを処分するのではなく阿蘇地域内で有効に活用するための手法を検討した。災害や公共事業で発生する地元の石材は貴重な地域資源であり、地域内循環の理念にも合致する。

その結果、阿蘇地域の公的な仕組みとして、現場発生石材を建設事業者から引き受け一時貯留し、石積みを含む事業が発生する都度そこから無償で支給するメカニズム（「ストーンバンク」と呼ぶことにする）が有効であるとの結論に至った。また、地場産石材を公共事業に活用した場合に、コンクリートを用いた場合と比較して、地域経済循環率と二酸化炭素排出量抑制への貢献の両方で大きなメリットが期待できることを確認できた。

## ④地場産木材の利用状況調査

現地踏査、地元林業関係者等へのヒアリング等により、阿蘇地域における木材資源量と分布状況、そして木材供給可能量と利用状況等について調査を行った。熊本県資料から、阿蘇でも戦後の拡大造林が実施され大量のスギ・ヒノキ林が造成されたこと、それらの多くが未利用のまま放置され大径木と呼ばれる巨木となっていることが明らかになった。また阿蘇森林組合へのヒアリングから、これら大径木は既存の受託用木材市場では価値が低く利活用の目処が立っていないこと等が明らかになった。

## ⑤地場産木材の土木分野における利活用方法についての検討

先進事例調査等を通じて阿蘇地域に存在する木材資源を有効活用する上で土木分野でどのような手法が考えられるかについての検討をおこなった。スギ大径木の活用には建築市場以外での使用を検討する必要があるが、土木・農林分野の先行研究等をあたって阿蘇地域で実現性の高い新規の活用方法は認められなかった。そこで従来から存在するものの価格競争力、不朽耐久性等で課題があり普及していない木製ガードレールに着目することにした。

## ⑥阿蘇地域に適した地場産木材の利活用手法の検討

スギ大径木を活用した木製ガードレールについて、材料となる丸太の伐出・加工・販売・施工の各段階でのコストや技術的課題について調査を実施し、実現可能性について検討した。また、地場産木材を公共事業に活用することによる地域経済循環率や二酸化炭素排出量抑制への貢献の程度についても検証した。スギ大径木を活用した木製ガードレールについて、材料となる丸太の伐出・加工・販売・施工の各段階でのコストや技術的課題について調査を実施し、実現可能性について検討した。

その結果、森林所有者の協力を得ること、現状の伐出・製作フローを効率化すること、耐久性の高い防腐処理を施すこと、製品を安定的に阿蘇地域の公共事業用材料で採用していくこと等の条件をクリアできれば、事業性が十分あることを確認できた。また、地場産スギ材を公共事業に活用した場合に、従来の鉄製ガードレールを用いた場合と比較して、地域経済循環率と二酸化炭素排出量抑制への貢献の両方で大きなメリットが期待できることを確認できた。

## ⑦地場産石材及び木材の活用手法の提案

以上を踏まえて、自然資源、循環型資源である地場産石材と木材について土木分野における利活用手法の提案を取りまとめた。

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

- ・阿蘇草原再生協議会が策定した「阿蘇草原再生全体構想<第3期>」（令和3年11月）において、本研究によって明らかとされた阿蘇草原に関する科学的知見が活用されている（水源涵養効果・水循環（P12～13）、防災・減災（P14）等）。
- ・阿蘇草原再生情報戦略会議：阿蘇草原再生協議会として検討を加えていく、あるいは実現をしていきたい政策目標や大事な点を抽出しながら協議会活動にどうやって活かしていくか、自由闊達に論議する場として環境省阿蘇くじゅう国立公園管理事務所およびメッツ研究所が事務局、座長が阿蘇草原再生協会の会長の高橋氏が務める戦略会議である。区・牧野組合等、学識経験者、NPO（阿蘇グリーンストック）、行政（環境省、農水省、熊本県、阿蘇市、阿蘇地域農業遺産推進協会）などが参加する戦略会議である。当研究グループからは代表の島谷が、本研究の成果を阿蘇草原再生協議会の活動に活かすために学識者の立場で参加している。これまで2回の会議が行われ、環境保全型農業直接支払制度の導入に向けた検討、水源涵養に着目した受益者を巻き込む仕組みづくり、水源涵養機能に着目した他事例集、などについて議論がなされており、本研究の成果が活かされている。
- ・環境省からの依頼を受け、第13回全国草原サミットシンポジウム阿蘇分科会（令和3年9月）、第4回阿蘇草原再生千年委員会（令和3年12月）において、特に阿蘇草原の水源涵養効果・水循環、地域循環共生圏等を中心とした本研究の成果を報告した。
- ・気候変動により深刻な水害が多発する中、調整サービスとしての災害の緩和機能が注目されている。環境省は、「生態系の保全・再生・維持管理を通して、危険な自然現象に人命・財産がさらされることを避け、生態系を緩衝帯・緩衝材として用いるとともに、食糧や水の供給などのさまざまな機能により、人間や地域社会の自然災害への対応を支える考え方」（2016）を示し、令和2年に「気候変動適応における広域アクションプラン策定事業」を開始した。本事業では、九州を対象とした災害対策分科会が設定され、本テーマを担当する2名がその立ち上げ時からアドバイザーとして加わり、阿蘇カルデラ地域を対象とした本課題で得られた研究成果を含め、生態系を活用した減災・防災の概念や事例等を、環境省のみならず広く九州地方の行政に対して、Eco-DRRの考え方を普及し、情報共有することができた。また、本課題では阿蘇カルデラ地域で頻発する斜面崩壊及び河川氾濫に対して、Eco-DRRの観点からの解決策について、植生を活用した斜面崩壊崩壊抑制機能を定量的に評価するとともに、災害リスク回避のあり方を提案することができた。頻発する水害被害に対して、自然地形を活用した伝統的治水工法や治水機能と生物多様性保全機能強化策について遊水地を対象に示すことができた。また、研究期間中に得られた重要種に関する情報を熊本県に提供し、生物の生息場を保全する遊水地計画が立案された。
- ・阿蘇くじゅう国立公園（阿蘇地域）管理運営計画策定検討会（令和2年度、令和3年度）に委員として参画し、本研究の成果を踏まえた科学的知見（石材・木材のインフラ活用、景観ガイドライン等）を提供した。今後より効果的な景観コントロールを実現する上で、阿蘇地域での国県市町村それぞれの景観コントロール（景観計画等）と阿蘇くじゅう国立公園管理計画の間でどのように整合性を持たせるかについての議論に際して、本研究の成果である現状の問題点の指摘が参考になった。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

- ・「気候変動適応における広域アクションプラン策定事業」において、九州を対象とした災害分科会では、「防災×環境」に関して、環境保全と防災教育を組み合わせることで相乗効果を発揮さ

せ、生物多様性の保全と防災力の強化を図ることが盛り込まれている。本課題では阿蘇谷を流下する黒川に設置された遊水地を対象に、生物多様性の保全と防災を扱った副読本を作成したが、これを用いた実践を令和4年度に行政と共同で実施する予定である。

- ・サブテーマ2では、阿蘇の生物多様性保全に資するため、草原と阿蘇北向谷原始林を対象に研究を行った。阿蘇の草原の生物多様性の維持には、地震や豪雨などの自然の攪乱も当然関わっていると考えられるが、採草や野焼きといった人為的な攪乱の重要性が改めて示された。今後阿蘇の半自然草原を守っていくためには、採草や野焼きなどの継続的な実施が必要である。さらに阿蘇地域の絶滅危惧植物や希少種が集中している東外輪地域とそれ以外の地域において、いわゆる採草地の種組成が異なっていることや種多様性に大きな違いがあることを明らかにすることができた。今後阿蘇の植物からみた生物多様性の保全を考慮した環境政策を推進する際には、こうした地域による違いがあることを考慮しながら行う必要があることを示した。森林に関しては、斜面崩壊の頻度は地形や地質の影響を受けており、長期間の間には繰り返し崩壊が起こる場所もある。そのような場所に生じる段階的な二次林の存在は、自然な生物多様性に重要な役割を果たしていることが示された。
- ・サブテーマ3で提案したストーンバンクのメカニズムについては、成立可能性について今後地元自治体と共に議論を進めていくことを予定している。また、同じく本研究で提案した木製ガードレールについても、阿蘇森林組合等と実現に向けて試作品の製作等を進めていくことを予定している。

### 5-3. 研究目標の達成状況

本研究では、冒頭に説明した研究目標に基づき、さらに深掘した以下の8つの骨子を定めて研究を実施した。サブテーマ1：（1）研究全体を総合化し創造的復興を地域循環共生圏につなげるための方法の提案、（2）草原の水共有サービスと経済的価値、（3）発災時の自然資源の活用手法（グリーンレジリエンス）、また、サブテーマ2では、（4）自然条件・社会条件と災害との関係性、（5）攪乱と生態多様性との関係性の解明、（6）土地利用の見直し、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法（Eco-DRR）の提案、さらに、サブテーマ3：（7）文化的サービス（特に景観）を考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成、（8）建設工事における自然資源活用手法の提案である。

サブテーマ1：（1）においては、プロジェクト全体の成果を総合的に俯瞰し、地域循環共生圏および創造的復興の考え方を整理した。また、地域資源の価値の再発見または発見し、共有することによって形成される自立・分散型社会の実現、さらに他地域との恵みとお返しとの連鎖を構築するプロセスの重要性について提案を行った。

（2）においては、草原の発散量を樹液流計で測定し、C4植物であるススキ草原の蒸散量はスギ・ヒノキやヤシャブシと比べ著しく小さいことを明らかにし、水資源の保全の観点から草原の維持が重要であることを示した。水による経済活動（GDP）への潜在的な貢献度に関しては、農業GDPのおよそ31%に水が寄与していることを示し、経済活動への水の寄与の高さを明らかにした。

（3）発災時の自然資源の活用手法（グリーンレジリエンス）の提案に関しては、主に熊本地震時の災害直後の状況に関するヒアリングを実施し、自然資源は災害発生直後のレジリエンス力を高める価値があり、自然資源である水や食料、燃料などのストック量の確保とともに、それらを災害時に活用できる活用力の向上が重要であることを示した。

サブテーマ2では、自然条件・社会条件と災害との関係性、攪乱と生態多様性との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法を提示するために設定した3つの目標について、下記の通り達成することができた。

(4) 斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示について、平成24年九州北部豪雨を対象とした斜面崩壊要因分析により、阿蘇カルデラのような特殊な火山地域においても樹木の根茎による緊縛力により崩壊抑制効果が認められることを示し、構築した斜面崩壊確率予測モデルを用いて阿蘇カルデラ内の斜面の崩壊確率を可視化し示した。また増加した人工林（針葉樹林）斜面を対象とした崩壊確率予測モデルから崩壊確率を可視し、これに基づき、崩壊確率が高いエリアにおける暴露低減、緩衝林として機能する可能性がある樹林帯の保全による暴露回避等、斜面崩壊に対する災害リスクの低減のあり方を提示した。

(5) 草原及び森林斜面における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示について、阿蘇北向谷原生林における攪乱（災害）後の経過時間、地形・地質と植生の関係を明らかにした。極相と自然二次林のモザイク状の存在は、頻繁に起こる災害による攪乱によって動的な平衡状態にあることを示すものであり、攪乱からの回復の段階が一様でないことによって、より豊かな生物多様性が維持されていること示した。草原に関しては、採草・野焼き等の人為的攪乱の頻度によって成立する草原が異なること、東外輪地域は他地域と比較し種構成が異なり、雨の日数、火山灰土壌が卓越していることが関与している可能性を定量的に示した。これらを踏まえ管理のあり方を提示した。

(6) 伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方に関しては、本地域で行われてきた伝統的治水及び自然地形と浸水リスクとの関係性を評価し、これを踏まえ遊水地、水害防備林及び道路をかさ上げた横堤、田んぼダム導入による流出抑制や氾濫流抑制効果を評価し有効性を示した。さらに、田んぼダムは防災意識の向上に寄与すること、黒川に整備された5つの遊水地の氾濫原依存種の生育・生息場として機能していること、防災と生物多様性が両立した管理のあり方を示すとともに、これを発信・共有するための環境・防災教育副読本を作成し行政と地域住民に提供した。

サブテーマ3：(7) 文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成に関して、阿蘇地域の歴史的・文化的景観特性の評価、地域循環型社会への適応性についての考察、来訪者の視点からの現状の景観に対する評価結果の検証等を総合的に用いて、災害復旧に関連する主な社会基盤（擁壁工、砂防工等）について、阿蘇地域における文化的サービスの質を維持・向上させることを意図した景観設計のガイドライン案を作成することができた。しかし新型コロナ禍の影響で、国県市町村の関係部局との間での本ガイドライン案についてのコンセンサスの形成までには至っていない。今後機会を設けて合意形成の場を持ち、同案の一部修正も含めて議論を積み重ね、実現性・実効性のあるものに収斂させ運用していく必要がある。

(8) 建設工事における自然資源活用手法の提案については、阿蘇地域の歴史的・文化的景観の主たる構成要素に阿蘇火山活動由来の地場産石材を用いた石積み構造物があり、その保全・再生は阿蘇地域の文化的サービスの質を維持し向上させていく上で大変に重要であることを示すとともに、「ストーンバンク」の仕組みを導入し地域内の様々な公共事業で発生する石材を地域循環資源として活用することを提案できた。

また本提案の他のメリットとして、コンクリート等を主材料とした従来の手法と比較して石材の活用が地域経済循環率や二酸化炭素排出量等の面で有利であることも示すことができた。

阿蘇地域で未活用のままストックされている膨大なスギ大径木について、貴重な地域循環資源として有効活用する上で土木公共事業分野での新たな発想がブレークスルーとなりうることを示し、その一つとして木製ガードレールの採用を提案することができた。

阿蘇地域におけるスギ大径木ストック量の概算、地場産木材の流通・加工実態の調査、木製ガードレール生産コストの試算等を実施することにより、阿蘇地域における木製ガードレールの生産及び実装の実現性は高いことを確認できた。

上記のように、初期目標をさらに深掘りした8つの骨子に対して目標を達成しており、当初目標を越える研究開発内容・成果を上げた。

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

10件

<主な査読付き論文>

- 1) 山下大佑, 皆川朋子: 浅田寛喜阿蘇黒川流域を対象とした土地利用の変遷に伴う浸水リスクの変化に関する研究、土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I\_61-I\_66, 2019.
- 2) S. MANAGI, and G. HALKOS: Journal of Forest Economics, 35 (2) Natural Capital and Ecosystem Service: Sustainable Forest Management and Climate Change, 2020.
- 3) I. A. JUMBRI, and S. MANAGI: Global Sustainability, 3, E5 Inclusive Wealth with Total Factor Productivity: Global Sustainability Measurement, 2020.
- 4) 平岡和真, 寺村淳, 田浦扶充子, 大津耕太, 島谷幸宏: 熊本地震発生後の自然資源を活用したレジリエンスの向上に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 77 (2), I\_84-I\_90, 2021.
- 5) Arachchi, J. I., & Managi, S. Preferences for energy sustainability: Different effects of gender on knowledge and importance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110767. (IF: 14.982) ,2021.
- 6) Halkos, G., S. Managi, and K. Tsilika. "Ranking Countries and Geographical Regions in the International Green Bond Transfer Network: A Computational Weighted Network Approach", Computational Economics. (IF: 1.876) ,2021.
- 7) Kurniawan, R., Y. Sugiawan, and S. Managi. "Economic growth - environment nexus: An analysis based on natural capital in inclusive wealth", Ecological Indicators 120: 106982. (IF: 4.958) ,2021.
- 8) Tolliver, C., H. Fujii, A. R. Keeley, and S. Managi. "Green Innovation and Finance in Asia", Asian Economic Policy Review 16 (1): 67-87. (IF: 1.455) ,2021.
- 9) Tsurumi, T., R. Yamaguchi, K. Kagohashi, and S. Managi. "Are cognitive, affective, and eudaimonic dimensions of subjective well-being differently related to consumption? Evidence from Japan", Journal of Happiness Studies. (IF: 3.852) ,2021.
- 10) 岸上 祐子, 馬奈木 俊介: サーキュラーエコノミーからの新国富の上昇: 人工資本・人的資本・自然資本, 化学工学, 第86巻第2号: 2-5, 2022.

### 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表 (査読なし)	1件
口頭発表 (学会等)	20件
「国民との科学・技術対話」の実施	10件
マスコミ等への公表・報道等	4件

本研究に関連する受賞	0件
------------	----

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

研究代表者

島谷 幸宏

九州大学大学院工学府修了、工学博士、現在、熊本県立大学特別教授

研究分担者

1) 皆川 朋子

山梨大学大学院工学専攻科修了、独立行政法人土木研究所主任研究員、現在、熊本大学大学院先端科学研究部准教授

2) 樋口 明彦

ハーバード大学 Graduate School of Design卒業、Doctor of Design、現在、九州大学工学研究院准教授



## II. 成果の詳細

### II-1 地域循環共生圏の確立と創造的復興の総合化

九州大学

工学研究院 島谷幸宏、馬奈木俊介、林博徳、田浦扶充子、大津耕太  
 キャンパス計画室 宮沢良行

第一工科大学 自然環境工学科 寺村淳

東京海洋大学 海洋生命科学部 若松美保子

#### [要旨]

本研究「地域循環共生圏の確立と創造的復興の総合化」は、研究全体を総括する研究とサブテーマ1として行われる研究からなる。前者は1、2、3のテーマを地域循環共生圏という視点で総括することを目的とし、地域循環共生圏および創造的復興の考え方を整理した。また、地域資源の価値の再発見または発見し、共有することによって形成される自立・分散型社会の実現、さらに他地域との恵みとお返しとの連鎖を構築するプロセスの重要性について提案を行った。

後者においては、阿蘇地域の生態系サービスの中で特に重要な草原の水供給サービスに着目し、阿蘇草原の優占群落であるススキの蒸発散量を求め、C4植物であるススキ草原の蒸散量はスギ・ヒノキやヤシヤブシと比べ著しく小さいことを明らかにした。水資源の保全の観点から草原の維持が重要であることを示した。

さらに、水による経済活動（GDP）への潜在的な貢献度を明らかにするため、農業における水を明示的に含む産業連関表を作成した。市場で価値づけられてこなかった水資源を一種の資本ととらえた場合、生産要素として投入することにより、農業GDPのおよそ31%に水が寄与していることを示し、経済活動への水の寄与の高さを明らかにした。草原および水の価値を明示し、大都市圏や沿岸域と共有することが重要である。

「グリーンレジリエンス手法の開発」では、主に熊本地震時の災害直後の状況に関するヒアリングを実施し、自然資源を活用することで災害発生直後の水不足、食料不足、エネルギー不足を補い、災害レジリエンスを高めることができることを明らかにした。自然資源は災害発生直後のレジリエンス力を高める価値があり、自然資源である水や食料、燃料などのストック量の確保とともに、それらを災害時に活用できる活用力の向上が重要である。

#### 1. 研究開発目的

サブテーマ1では、研究全体を総括する研究とサブテーマ1として行われる研究からなる。前者は1、2、3のテーマを地域循環共生圏という視点で総括することを目的とし、それぞれのテーマが有機的に連携するために、当初の目的に沿った研究が実施されるようにマネジメントする。特にテーマ1とテーマ3を関連付けることが重要であり、研究の様々な過程においてお互いの情報が交流する場を設定し、常に相互の状況を鑑みた研究内容へと深化させる。それらを総括し、阿蘇地域を対象に地域循環共生圏の概念、それを達成するための道筋、創造的復興を地域循環共生圏の形成に寄与させるための方法についてとりまとめる。また、阿蘇地域の生態系サービスの中で特に重要な草原の水供給サービスに着目し、阿蘇草原の優占群落であるススキの葉面積指数や樹液流を現地にて測定することにより蒸発散量を求め、野焼き草原の維持による水資源供給量を推定した。さらに、福岡都市圏に対する水供給サービスの経済的価値を見積もり、都市圏との経済的な関係を明示する。さらに、発災時に自然資源を有効に活用してレジリエンスを高めるグリーンレジリエンスの手法を開発することを目的とした。

#### 2. 研究目標

- ・プロジェクト全体の総括

プロジェクト全体を総括し、「地域循環共生圏の構築と創造的復興」に関する包括的提案を行う。

- ・草原の大都市圏への水供給サービスの定量的評価

阿蘇地域が大都市との共生圏を構築する際に重要な、草原の供給サービスの定量的評価を行う。また、発災時に自然資源を有効に活用してレジリエンスを高めるための手法を開発する。

### 3. 研究開発内容

#### (1) 研究の総合化

戦略課題S II-5における各テーマ・サブテーマから出てきた結果を横断的に俯瞰し総合化する。総合化を進めるにあたり、当該サブテーマと他の各サブテーマ、また、テーマグループの枠を越え、地域資源毎に横ぐしでのミーティングを複数回実施し俯瞰的に整理を図った。

#### (2) 草原の水資源の機能の定量化

阿蘇の草原が水資源をどれほど供給しているのか価値を明らかにするため、本研究では筑後川上流域の下笠・松原ダムの流域を対象とした(図1.1)。下流へ流れる水資源は、降雨から流域の蒸散や遮断蒸発を差し引いたものであり、水資源には主に表面流出や地面に浸透したのちに地下水として流出するものがある。対象地域ではダムが設置されていることからすべての水はここへ一度集まるものとして想定されるためこの地域を対象とした。松原ダム流域についてみると、1900年～1903年には松原ダム流域の草原面積は46.7%であったのに対して、2003年には27.3%まで減少し、樹林化が進んでいる。本研究では「蒸散」に着目し、草原の水資源量を推定することとした。

植生による水資源消費である蒸発散(降雨中・後に発生する植物体表面あるいは地表面からの蒸発と、光合成に伴う植物体内からの蒸発:蒸散)については数多くの研究が実施されており<sup>1)2)3)</sup>、こうした研究では降水量の植生同士の比較した場合には、草原で森林よりも蒸発散が低いことが報告されている。これらの研究には、樹木が生存し得ないような強烈な乾季の存在する地域の草原や、地中深くの湿った土壌や地下水帯まで根を伸ばすことができる深根性の樹木からなる森林が含まれている。上記研究を含め、草原の蒸発散が小さいとする研究には、草原しか成立しなかった乾燥した地域に、深根性の外来種が定着したことで河川流量が低下した現象を調べたもあり、それらの結果には森林と草原との違いである根の深さや生育期間(着葉期間)の違いが蒸発散の違いに直結する乾燥地特有の現象が色濃く反映されている。そのためこれら研究で得られた知見を、湿潤な日本の半自然草原とその放棄後に発達した森林のような、同じ環境下に隣り合って成立した草原と森林の蒸散の蒸発散の比較にそのまま適用することは難しい。蒸散については、葉面積あたりでは草(草本植物)で樹木よりも高いとする知見も世界各地で得られた研究結果で示されていることから(蒸散に関連する指標である気孔コンダクタンス<sup>4)</sup>)、乾燥の影響がない「湿潤環境下での蒸発散は草原で森林より低いのか?」という疑問に答えることは、現在の知見ではできない。実際の計測についても、農地や森林の蒸発散についての研究が非常に充実していることとは対照的に<sup>5)</sup>、湿潤地の自然および半自然草原の知見は乏しく、とりわけ日本についてはほとんど研究が進んでいない。半自然草原の多くが傾斜地に小面積で点在するなど、既存の有効な計測手法(微気象学的な技術を用いて数十～数百mの範囲の蒸発散を計測できる渦相関法や、分水嶺で囲まれた集水域からの河川流出量を計測する流域水収支法)に適していないことが一因と考えられる。本

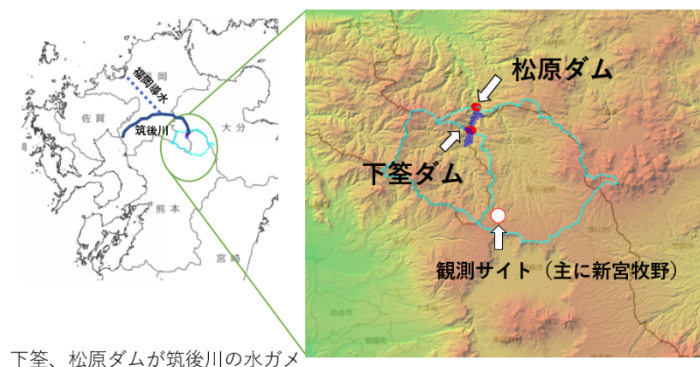


図1.1 下笠・松原ダム流域(筑後川)

下笠、松原ダムが筑後川の水ガメ

「湿潤環境下での蒸発散は草原で森林より低いのか?」という疑問に答えることは、現在の知見ではできない。実際の計測についても、農地や森林の蒸発散についての研究が非常に充実していることとは対照的に<sup>5)</sup>、湿潤地の自然および半自然草原の知見は乏しく、とりわけ日本についてはほとんど研究が進んでいない。半自然草原の多くが傾斜地に小面積で点在するなど、既存の有効な計測手法(微気象学的な技術を用いて数十～数百mの範囲の蒸発散を計測できる渦相関法や、分水嶺で囲まれた集水域からの河川流出量を計測する流域水収支法)に適していないことが一因と考えられる。本

研究の遂行に当たり、半自然草原での蒸発散の実測、そしてその手法の確立が必要とされていた。

本課題は、阿蘇草原の主要構成種であるススキを対象に、蒸発散の諸過程(降雨によって濡れた植物体表面からの蒸発である遮断蒸発と蒸散)のうち、草原と森林とで大きな違いが予想される蒸散に注目し、その計測に取り組んだ。光合成の際に葉から蒸散として漏出する全ての水が茎(幹)を通ることから、茎にその内部の流速を計測する樹液流センサーを取り付けて、高時間分解能(10分間隔)で計測することで算出を試みた。草丈や着葉量、周囲個体からの被圧・被陰の状況の大きく異なるススキからなる草原の蒸散(地上面積あたり)を、既存の観測機器が必要とする安定的な外部電源もない調査地で偏りなく計測するには、多数のセンサーが必要になる上、枯死などにより頻繁な取り替えも必要とされるため、装着や操作など扱いが容易で安価なセンサーが必要とされた。そこで、樹木の幹で計測用に開発された既存の熱パルス比法樹液流センサー(Heat Ratio Method<sup>9)</sup>)を改変した外部密着型HRMセンサー<sup>7)8)</sup>を自作し、計測および計測の信頼性の検証を実施した。

試験地は、阿蘇の草原を代表するススキおよびササの草原からなる、阿蘇外輪山の新宮牧野に設営された。外縁部の外輪山、中央部の山岳(五岳)とそれを囲む盆地からなる阿蘇カルデラにおいて、草原は五岳の中腹や外輪山など高標高の地域に広がっており、本試験地はそうした草原の代表的な気象条件に位置していると思われる<sup>9)</sup>。阿蘇の草原では、草原を維持するための火入れと刈り取りが行われているが、その頻度や強度には地点間で差異があり、事前の下見調査においては刈り取り頻度が高い地点でササの分布が多いという傾向が見られた。こうした地点間の差異や、今後の管理の推移がこの一帯の草原の蒸散量に及ぼす影響を評価できるよう、本課題ではススキとササそれぞれについて蒸散を推定できるようセンサーを設置した。設置されたセンサーからのデータは記録媒体(CR1000X, Campbell Sci, Logan, UT)により受信・記録された。草丈や周囲個体との混み具合(茎密度)の異なる多様な個体からなるススキ群落の蒸散を偏りなく評価できるよう、36個体にセンサーを取り付け、熱パルス輸送速度(heat pulse velocity, HPV, cm/h)を計測した。HPVは茎表面に設置された熱源から放出された熱パルス(0.6W×4s)の移動速度であり、熱源から茎の上下方向各6mmの距離の茎表面に設置された温度計での温度計測から算出される指標であり、類似したHRMについてはHPVから樹液流速( $F_d$ , g樹液 m<sup>2</sup>茎断面積 s<sup>-1</sup>)を算出することができる<sup>10)</sup>。センサーを設置した個体が枯死した場合、またセンサーが雨水により濡れた場合や故障した場合には取り替えを行い、常時28センサーによりススキの $F_d$ を監視した。

本計測から蒸散速度( $F_d$ ×総茎断面積/調査地面積)を算出するには、計測値から算出される数値(HPV)の $F_d$ への変換と、茎断面積密度の計測が必要となる。後者の計測には、樹液流観測地点付近のススキ群落で刈り取りを実施し(7地点、1m×1m)、刈り取り地点ごとに総茎断面積および茎断面積の頻度分布を計測した。

パルス状に発生した熱は茎の熱伝導度(細胞の構成物質や含水量など)で決まる熱の茎内移動に加え、茎内部を流れる樹液流によっても運ばれることから、熱伝導度と熱パルスの強度を基に $F_d$ を算出することができる(Burgess et al., 2001)。しかし熱パルスの移動が茎(幹)内に限られる通常のHRMセンサーと異なり、密着型HRMの場合には茎表面、そしてセンサー本体をも介するため、Burgess et al. (2001)<sup>10)</sup>で構築されたHPV-樹液流速関係を利用して樹液流速を算出することができない。そこで本研究では調査地に生育するススキに密着型HRMセンサーを設置した状態で基部から切断し、切断面からの吸水量と密着型HRMを同時に計測することで、HPV- $F_d$ 関係を構築し、観測で得られたHPVを $F_d$ に変換した。実験は福岡市内の試験地で実施し、計測に悪影響を及ぼすことが知られる日射や外気温の変動の激しい環境(直射光下および気温に複雑な影響を引き起こしうる地際)で実施することで、より安定した阿蘇の試験地での計測が正確に実施されたか検証した。

蒸散速度を樹木とススキで比較する場合、その差が生まれる(ススキで蒸散速度が低くなる)原因のうち、(1)着葉量は、開葉完了後には多いものの、開葉が遅く開葉完了まで長期間にわたって低く維持される、(2)節水型のC4型光合成を採るために蒸散速度が低い、(3)葉の老化が早い、に注目した。(1)を検証するために、着葉量の指標である葉面積指数(LAI, m<sup>2</sup>着葉面積 m<sup>-2</sup>地上面積)を非破壊的に定期的に計測した(LAI-2200C, Li-cor, Lincoln, NE)。

C3植物である多くの樹木やササ、草本植物とC4植物のススキでは、光合成の仕組みが大きく異なり<sup>11)</sup>、その違いが群落の蒸散速度、およびその環境変動への応答の違いを生み出していると考えられる。樹液流計測で得られた蒸散速度の違いの仕組みを理解し、また異なる気象条件下でのササ・ススキ・他の植生間の蒸散速度の比較を予測できるよう、個葉スケールでの蒸散および関連諸現象の計測も同時に行った(Li6400, Li-cor, Lincoln, NE)。光合成に関連する諸反応のうち、光強度およびCO<sub>2</sub>濃度の変化への応答と、一日の気象条件の変動下での光合成および蒸散の推移を調べることで、ススキとササの蒸散の諸過程の違い、および異なる気象条件下での蒸散の再現・予測に必要な情報を収集した。得られたデータを基に、ススキ群落内の光の透過、葉での光合成反応、葉面での光照射と加熱、蒸散による冷却といった諸現象を、ススキ群落を多層に分けた上で層ごとにコンピューター内で再現し(群落熱収支-植物生理多層モデル<sup>12)13)</sup>、樹液流速度とは別途蒸散速度を算出した。なおこのモデルでは群落内のCO<sub>2</sub>および水蒸気濃度は一定で大気外と同じ数値をとる、と設定している。得られた個葉スケールのデータの解析、および蒸散速度のモデル解析において、C4植物の光合成モデルの計算についてはR version 4.0.0のPlantEcophysパッケージ<sup>14)</sup>およびそこで引用されている数式や化学反応係数を参照した。

葉の老化による生育期間後半での蒸散速度の低下については、春-夏の葉の光合成計測結果を基に再現された蒸散速度のモデル推定値と樹液流計測による実測値との比較を通じて、モデルの過大評価を指標として評価した。

### (3) 水資源の価値

阿蘇の水資源の経済的な価値計測については、水・土地を明示的に含む産業連関表を作成し、応用一般均衡(CGE)モデルによる評価を行う。作業フローを図1.2に示す。STEP1の産業連関表の作成においては、農業GDPの経年変化に対して農業用水の利用と耕作地面積がどのように推移したかの関係性を基に農業GDPに対する水の貢献度を算出する。通常の産業連関表では水の貢献は明示的に含まれていない。そこで、本研究では資本、労働、その他の3つによって分類できる産業の付加価値額を水の使用量と耕作地の面積を加えた資本、労働、水、土地の4つの分類に再配分した。本研究では、阿蘇の水資源を抱える熊本県とその恩恵を受けて経済活動を行っていると考えられる福岡県の両県を対象に、特に各県の農業における水の価値の算出を目指す。STEP1にて作成した水・土地を明示的に含む産業連関表を図1.3に示す。その結果、水への支払いは経済活動への貢献という意味では、395億円の支払いがされていると言える。市場で価値づけされてこなかった水資源を一種の資本ととらえた場合、生産要素として投入することにより、およそ31%の農業GDPに結び付くと捉えることができる(図1.4)。

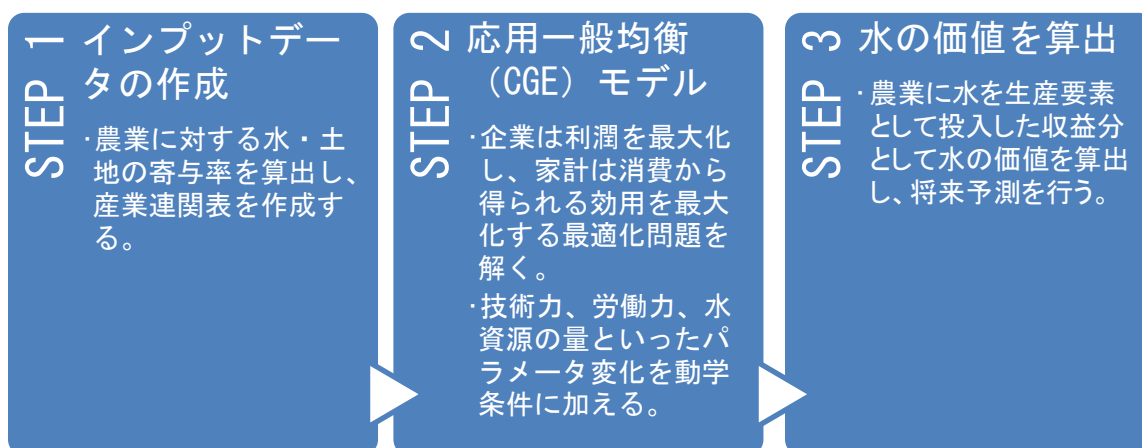


図1.2 水の経済的な価値算出の作業フロー

福岡県 農業	通常の産業連関表の 付加価値額 (%)	水・土地含む産業連関表 の付加価値額 (%)
資本	39,200 (30.6)	6,638 (5.19)
労働	30,490 (23.8)	74,796 (58.48)
その他	58,210 (45.5)	
農業用水		39,572 (30.94)
耕作地		6,894 (5.39)
合計	127,900	127,900

図1.3 福岡県農業の産業連関表

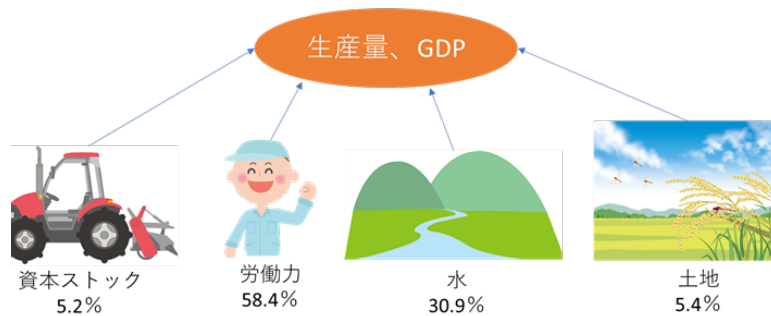


図1.4 水の貢献率のイメージ

STEP2では、STEP1で作成した産業連関表をインプットデータとして、他に水資源の量の変化を外生的に加えて経済における均衡を求める。ここで用いる応用一般均衡 (CGE) モデルは、政策評価のために経済学・工学において広く使われており、企業は利潤を最大化し、家計は消費から得られる効用を最大化するものとして経済の均衡を求める。本研究では、水を生産要素として明示的に取り入れた産業連関表を用いて、CGEによって水の価値の推移を計算した。シナリオでは、使用できる水量が今後減少していく想定のもと、計算をしている。この減少は、阿蘇の草原面積が過去100年に減少していることにより想定される飲用水の減少分とその他水田など水源涵養機能の減少により想定される湧水量分を想定している。STEP3は結果のアウトプットとなるため、次節にて説明する。

経済活動に対する貢献に加えて、阿蘇の水資源が持つより包括的な水の価値を算出するために、Contingent Valuation Method (CVM) を用いた研究も行った。CVMを用いることで、水資源の持つ利用価値、非利用価値を含めた阿蘇の水資源保全に対する marginal willingness to pay (MWTP) を明らかにすることができる。WTPに関する調査は、令和2年12月7日～21日の期間にweb上で実施した。対象地域は、日本全国を対象とした。

阿蘇の水資源保全に対する支払意思額を明らかにするために、(1)水資源が人々の生活にもたらす恩恵についての説明、(2)森林・草原・水田がもつ涵養機能の説明および、水資源涵養についての知識、今後想定される水資源涵養量の減少についての重要度の質問、(3)CVMシナリオの説明、(4)MWTPの質問という手順で回答者に質問を行った。

税金支払あり	税金支払なし
阿蘇による水資源供給量 (m <sup>3</sup> /年)	阿蘇による水資源供給量 (m <sup>3</sup> /年)
約629億m <sup>3</sup> を維持	毎年約400万m <sup>3</sup> 減少
※現在と変わらない水資源量を確保	※毎年約5.2万人分の飲用水相当量が減少

図1.5 水資源保全シナリオ

図1.5は、回答者に提示したシナリオを示している。現在の阿蘇山から各地域への水資源供給量を629億 $m^3$ であるとし、保全活動を行うか行わないかによって、今後の水資源供給量が維持されるか減少するかが決まる、というシナリオを設定している。保全活動を行う場合は、各世帯が税金を負担する必要があるが、阿蘇による水資源供給量を現状のレベルで維持することができる。保全活動を行わない場合は、税金の支払いは発生しないが、毎年約400万 $m^3$ の水資源供給量の減少が生じる。補足情報として、支払いは10年間続くという仮定を提示した。

上記のシナリオを提示したうえで、回答者に水資源保全のWTPについての質問を行った。回答者に「水資源を維持する活動のために、年間最大いくらまであなたの世帯から支払ってもよいですか」という質問を行い、支払いカード形式によって回答を行わせた。この質問によって、阿蘇による水資源供給量の減少が起きないようにするために、回答者が提示するWTPをとらえることができる。

主な質問項目は、阿蘇を水源とする水の量が減ることに対する保全事業としての支払い意思額であるが、本研究では、「阿蘇」という言葉の持つブランド力や影響力の大きさを検証するため、質問文の中に「阿蘇」という文言を入れたグループと、入れないグループの2つに分けてWTPに関する質問を行った。阿蘇の情報を入れないグループについては、「山林」の保全事業に対して支払う意思について質問している。

#### (4) 発災時の自然資源の活用（グリーンレジリエンス）

グリーンレジリエンス研究では、南阿蘇の農村地域と、熊本市（椿ヶ丘地区）の市街地において、熊本地震発災時の水や自然資源の利活用についてのアンケート調査（各20世帯）を行い、その差異からグリーンレジリエンスについて検討した<sup>15)</sup>。

対象：都市部…熊本市内椿ヶ丘地区（熊本市北区龍田5丁目の自治会単位のコミュニティであり、周辺は住宅街が広がり、局地的に住宅被害が多かった地域）

農村部…南阿蘇村両併地区（椿ヶ丘地区より被害は少ないが、同規模コミュニティであり、椿ヶ丘同様に2～3日の断水があった。）

アンケート方法は、対面またはgoogle formによるWEB入力、内容は発災時の避難行動、避難生活の仕方や、各家庭の備蓄の数量・利活用実績、その地域内での自然資源の存在と距離を図るため、①基本情報、②避難状況、③水の調達、④食料の調達、⑤生活にかかわるエネルギーの調達の5つの項目を設け、選択肢方式と自由回答方式を組み合わせた。

また、農村部におけるレジリエンス拠点の一つの要素案として、電力の自立化に着目し、Jet水車による約1.5kWの発電パッケージを持ち込み、南阿蘇村両併地区住民の協力を得て、発電デモを実施した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 研究の総合化

得られた結果を総合化すると以下のとおりである。詳細は全体成果報告書にて説明する。

- ・創造的復興とは地域資源に新たな価値を発見あるいは再発見し、その新たな価値を地域内外と共有し、自立分散型の社会を構築することこそが創造的復興としてとらえ（すなわち価値創造の復興）た。
- ・本研究では草原、樹林地・木材、河川・湿地・遊水地・水田、地質・石材、社会関係資本などの地域資源を対象として、水資源、防災機能、災害レジリエンス、生物多様性、風景・文化、地域経済循環、カーボンニュートラルなどの新たな価値を創造するために、9つの小課題を設定し、それらの価値創造に基づき自働分散型の社会を構築するための、制度、社会の仕組み、社会関係資本の再構築、地域資源活用の工夫や技術開発などについて研究したものである。
- ・それぞれの小課題は地域資源を対象に様々な方法論・様々な視点から資源の価値創造に迫り、その

活用方法などについて研究を実施した。それぞれの小テーマは複雑に絡み合い、全体像が構築されていった。特に社会関係資本はすべての項目と関連している。

- ・地域資源の価値の再発見または創造には過去、現在、未来の視座が重要であり、さらに循環共生圏のサイズ（圏域）は地域資源によって異なることを考慮することが重要であることが示された。

## （２）草原の水資源の機能の定量化

### ①センサーの稼働確認

ススキから得られたHPVは明確な日・日々変化パターンを示した（図1.6）。樹液流計測はセンサーの設置が可能となった7月中旬（下草高が20cm以上）、葉が枯れきった11月下旬まで実施した。HPVは夜間にゼロとなり、日射とともに増加し、午後には低下を示した。蒸散が、日射や大気の乾き具合の指標（飽差）により引き起こされる葉内の蒸発現象であり、蒸散による水蒸気流が通過する気孔の通気性（コンダクタンス。開閉に依存）が日射と関係することから、本センサーは樹液流およびそれを引き起こす蒸散を精度よく捕捉できていることが示唆された。HPVは、特に晴れた日の日中について、9月以降に明確に低下を示し、10月中旬までにほとんどの個体において無視しうるほどに低くなった。樹液流速度には、同所的に生育するササと比べても、明確な差がなかった。

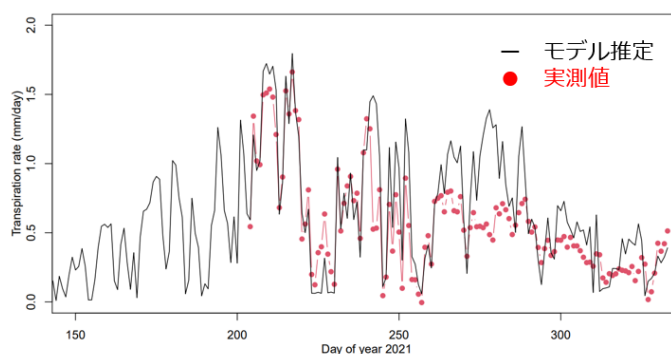


図1.6 モデルおよび実測の蒸散速度

吸水量は同時に計測されたHPVと強い相関を示した（図1.7）。熱源から放出された熱パルスによる温度変化を計測する密着型HRMは外気温の変動や、センサー部位の温度を激変させる日射により計測が阻害されることが知られているが<sup>16)17)</sup>、既存文献で推奨された断熱材に加え、日射を効果的に遮蔽するとともに自身の高温下を抑制する寒冷紗を使用したこと、そして外気温の変動に対する補正式を導入することで、阿蘇の試験地よりも環境変動の大きな実験環境においても高精度かつ正確に樹液流速度を計測できていることが明らかとなった。

葉面積指数(LAI)は芽吹きが始まる5月半ば以降に上昇を開始し、7月下旬には最大値に到達した（図1.8）。それ以降も開葉は続いたものの、基部では老化した葉の枯死が確認され、LAIはほぼ一定の数値を採った。最大値は $7\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$ を越え、この付近の灌木林（ヤシャブシ）や針葉樹人工林（スギ）、広葉樹植栽地（クヌギ<sup>13)</sup>よりも高い数値を採った。蒸散はLAIの関数であることが知られているが<sup>18)</sup>、LAIの増加に伴う蒸散速度の上昇は飽和することが知られており、ススキの非常に高いLAIは必ずしも高い蒸散速度に直結するわけではない。なおLAIが $3\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$ を越えると地表面蒸発の寄与は検出できないほど小さくなることが他計測では知られており<sup>19)</sup>、ススキ群落での地表面蒸発についても無視しうると考えられる。

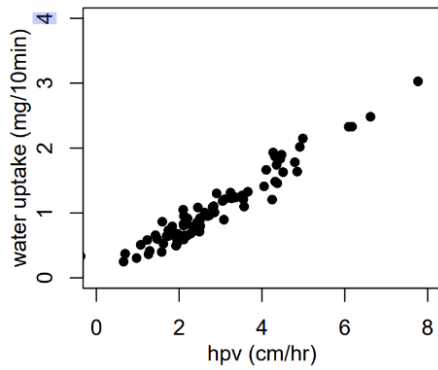


図1.7 Gravimetricによる校正式

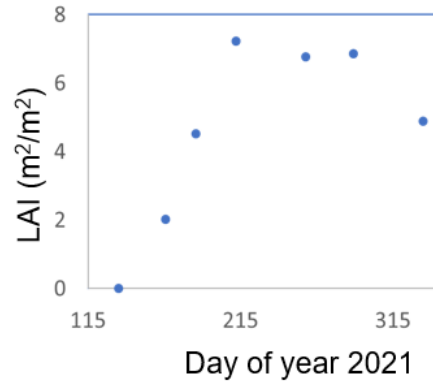


図1.8 葉面積指数(LAI)の推移

光飽和下の光合成速度はススキはササやスギと同程度の数値を採り、五岳付近に分布するヤシヤブシよりも低い数値を採った<sup>13)</sup>。光合成の際の葉外部からのCO<sub>2</sub>取り込み口である気孔の開き具合(通気性、コンダクタンス)は、他の種よりも極めて低く(図1.9)、気孔を介した葉内から大気への水蒸気の漏出:蒸散も限定的であることが明らかとなった。気孔コンダクタンスは光合成速度の高い種ほど高いことが知られ<sup>4)</sup>、光合成速度が同程度のスギやササよりも葉内のCO<sub>2</sub>濃度が低い水準となっていた。このことはススキがC<sub>4</sub>型光合成回路を持つことで葉緑体に供給されるCO<sub>2</sub>濃度を高く維持することができるために葉内CO<sub>2</sub>濃度を高く維持する(そのために気孔コンダクタンスを高く維持する)必要がなく、蒸散による水の損失を抑制している<sup>20)</sup>ことを示している。

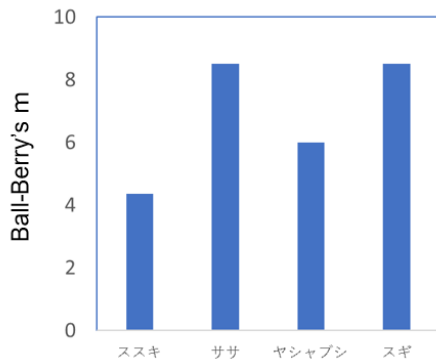
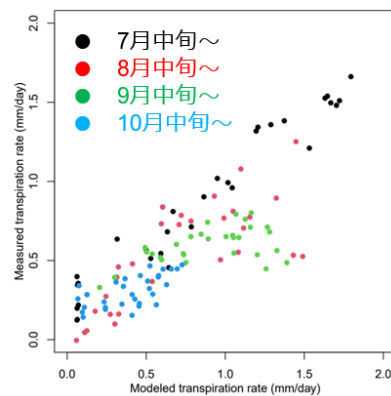
図1.9 気孔調節の指標の種間差。低いほど気孔は閉じ気味となる<sup>21)</sup>

図1.10 モデル推定および実測の蒸散速度の比較

蒸散速度のモデル推定値と実測値とは非常に強い相関が見られた。特に蒸散速度の低下が顕著となる9月半ば以前については相関が強く、モデルが蒸散および蒸散を決める主要な現象を捕捉できていたことが示唆された(図1.10)。しかし9月半ば以降、特にモデル推定値が高い数値を採った(図1.6)、乾燥した日射の強い日には、モデルは実測値を過大評価するようになった。このことはモデルが考慮できていない、葉の老化が進行して蒸散速度を抑制したと考えられる。この時期はススキが穂を出す時期にも当たり、葉の退色も見られた時期に該当する(宮沢ら、Personal observation)。樹液流センサーの設置前である7月以前についても、LAIと気象条件の計測地を入力値に蒸散速度を推定したところ、LAIの増加に伴い蒸散速度も上昇することが明らかとなった(図1.6)。開葉が遅く、その後のLAIの増加に2ヶ月以上を要することで、年中葉を保有して光合成能力も維持する常緑針葉樹のスギや、開葉が早いヤシヤブシとは対照的に<sup>13)</sup>、その間のススキの蒸散速度が抑制される実態が明らかとなった。異なる地域に成立したヤシヤブシ群落とスギ群落が本研究のススキ群落と隣り合った場合の蒸散を推定して比較すべく、それぞれの個葉スケールの生理特性と



LAI<sup>13)</sup>、そして新宮試験地の気象条件を入力値に蒸散速度を推定した(図1.11)。これはそれぞれの群落、そのLAIや葉の生理特性を変えることなく、新宮試験地に出現した場合に採る蒸散速度に該当する。ススキについては、センサー設置前の7月以前についてはモデル推定値、その後はセンサーによる実測値を用いて蒸散速度を推定した。2021年の5月下旬から11月上旬の蒸散速度は、ススキ群落で110mmであったのに対して、ヤシヤブシ林は約200mm、スギ林は約250mmを示し、ススキ群落の蒸散速度が明確に低いことが明らかとなった。実際にはヤシヤブシ林は5月半ばには展葉を完了し、11月末まで蒸散速度を維持すること、ススキ群落は真冬の短い期間を除いて蒸散速度を維持することから、ススキ群落との年間蒸散量の差はさらに大きく異なると考えられる。

ススキ群落の蒸散速度が低かった原因には、気孔コンダクタンスが光合成速度の割に低かったこと(C4植物特有の気孔調節)、開葉が遅くLAIの増加に時間を要したこと、葉の老化が早くに進行したこと、が考えられる。そこで群落多層モデルでは、Case-1「5月以降、LAIが年間の最大値を採る」、Case-2「Case-1かつ葉は老化しない」の条件で蒸散速度を推定した(図1.11)。Case-1ではLAIの入力値を最大値(7.7)で固定してモデルを計算し、Case-2では9月以降も樹液流計測による実測値ではなく、春-秋に計測された葉の生理特性を基に計算された蒸散速度の推定値を用いた。上記のススキ群落の蒸散速度の推定値はControl-caseとした。その結果、蒸散速度はControl-case、Case-1、Case-2の順で高くなったが、いずれもヤシヤブシ群落より低い数値を採った。ControlとCase-1の差は開葉の遅れの寄与、Case-1とCase-2の差は老化の寄与を、そしてCase-2とヤシヤブシ群落の差はC4植物特有の気孔調節を含む他の原因の寄与を示している。このように、ススキ群落は、草原特有の開葉の遅さと葉の老化の早さ、そしてススキに特有のC4植物ならではの気孔調節により、この付近の森林よりも著しく低い蒸散速度を採ることが明らかとなった。

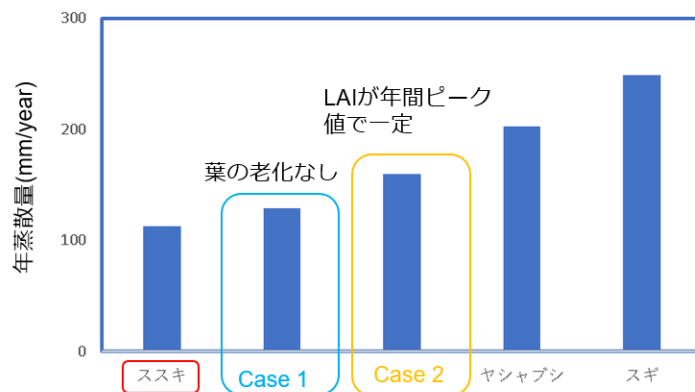


図1.11 各植生の年蒸散とシミュレーション結果

松原ダム流域の2003年の草原面積は83.5km<sup>2</sup>であるが、この範囲がすべてススキの場合と、森林(スギ・ヒノキ)の場合を比較すると、年間1002万m<sup>3</sup>の水資源量の差があることになる。なお、得られた蒸散速度等を用いた面的な水資源量を推計するスケールアップは、テーマ2において実施した。

### (3) 水資源の価値

図1.2のSTEP3では、STEP2で最適化されて求められた経済の均衡から水の価値の推移をアウトプットした。図1.12に農業における水の価値の推移を福岡、熊本について示している。ここで言う価値とは、水を生産要素として投入した際にリターンとして得られる収益の追加分を指す。結果から、今後水の価値が上昇していくことが予想される。一般的には、資本集約的な産業では、水資本の価値は上昇する傾向にあり、そうでない産業では、下落する傾向をもつ。これは、経済成長に伴い資本集約的な産業は要素市場(生産要素となる財を取引する市場)において一層競争的になるため、生産要素である水に対する価値が高くなる状況を生み出しているといえる。日本の農業は労働集約

的であるが、製造業の方がより労働集約的であるため、生産要素である水の獲得においてより競争的（有利）であり、水の価格の上昇につながっていると予想される。また、こうしたトレンドは水の使用可能量が減少していく想定によっても加速されているだろう。他には、資源を使う産業が経済全体にとってどの程度重要かどうかも水の経済的価値に影響を及ぼすため、福岡と熊本のトレンドはよく似ているが、熊本の数値の方が福岡よりも大きい結果となったと思われる。

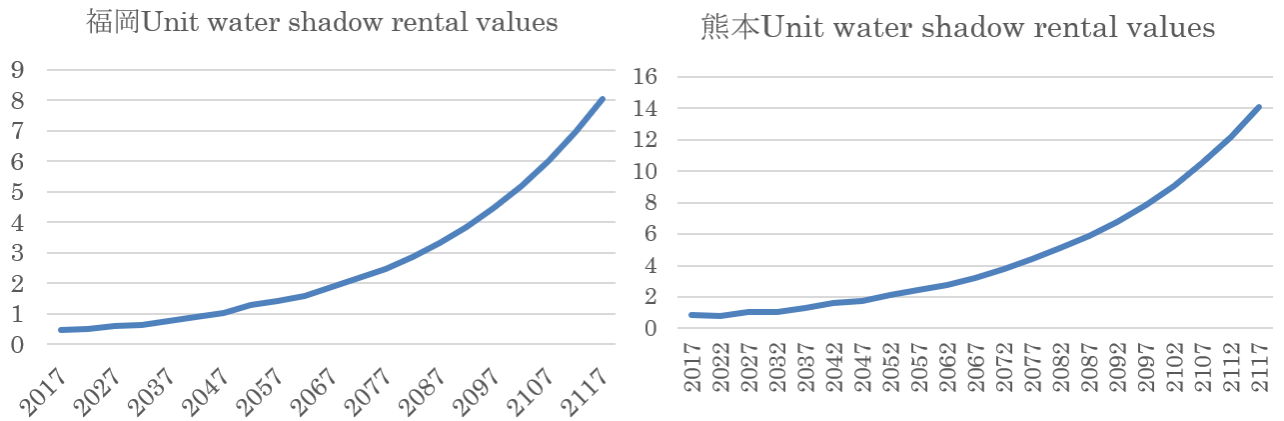


図1.12 農業における水の価値（円／m³あたり）の予測

次に、CVMによる水の包括的な価値の推計結果を紹介する。表1に、水資源の保全に対する平均支払意思額(WTP)を、グループ別に推定した結果を示す。

表1.1 ノンパラメトリック手法を用いた平均支払い意思額

平均WTP	ノンパラメトリック手法 (世帯年間支払額：円)	
	Turnbull LBM	Kristrom mean
WTP (全国・阿蘇情報あり)	343.09	515.78
WTP (全国・阿蘇情報なし)	369.63	565.44
WTP (九州・阿蘇情報あり)	339.42	509.81
WTP (九州・阿蘇情報なし)	377.23	566.07
WTP (九州除く全国・阿蘇情報あり)	362.26	536.95
WTP (九州除く全国・阿蘇情報なし)	337.04	474.60

本結果は、阿蘇の情報を入れたグループと阿蘇の情報を入れないグループのそれぞれのWTPを示している。Turnbull lower bound meanによるWTPよりもKristrom meanによる計算結果が大きくなることは、計算方法や既往研究からも明らかである。抵抗回答調整済みのWTP（全国）に関して、阿蘇情報の有無間で平均WTPを比較すると阿蘇情報を入れないグループのWTPが大きいという結果が出た。しかしながら、本研究で実施されたアンケートは主に九州地方の人々に重きを置いたアンケート調査だったため、九州地方と九州地方を除いた全国での比較も行った。その結果、九州地方においては、阿蘇の情報を入れたグループよりも阿蘇の情報を入れないグループのほうが平均WTPは大きいという結果が出た。さらに、九州を除く全国においては、阿蘇の情報を入れたグループのほうが阿蘇の情報を入れないグループよりも平均WTPが大きいという結果が出た。

主な結果としては、九州地方では阿蘇の情報を含める場合と含めない場合とでは後者の方が高いWTPを示すことがわかった。この両者の間には、母平均の差があることも裏付けられており、九州の人々にとって山奥の水源地は気軽に訪れることが難しく意識されることが少ないためか、日常に使う水ほどには大切さが認知されていない結果が得られた。

表1.2に九州内の県別で水資源保全に対するWTPを推定した結果を示す。福岡県以外の県で、阿蘇情報なしのグループの方が阿蘇情報ありのグループより高いWTPを示している。中でも、佐賀県と長崎県では阿蘇情報ありとなしの場合のWTPの差が大きい。一方で、熊本県、宮崎県は阿蘇情報あり・なしの差が小さいことが示された。

表1.2 県別平均支払い意思額 (Turnbull LBM : 円)

	阿蘇情報あり	阿蘇情報なし	差
福岡県	355.00	311.90	43.10
佐賀県	355.85	486.16	-130.31
長崎県	362.54	378.97	-16.43
熊本県	396.75	397.23	-0.48
大分県	404.38	542.50	-138.12
宮崎県	445.67	449.01	-3.34
鹿児島県	337.00	426.05	-89.05

次に、水資源保全への支払意思額の決定要因分析の結果を表1.3に示す。

表1.3 区間回帰分析結果

被説明変数：WTP (阿蘇情報有り, なし混合)			
説明変数	(1)	(2)	(3)
男性ダミー	0.0059	0.006429	0.003579
年齢	0.00727***	0.006998***	0.007331***
阿蘇の情報ダミー×年齢	-0.0020	-0.001918	-0.00221
大卒ダミー	0.1987***	0.2008***	0.2032***
阿蘇の情報ダミー×大卒以上ダミー	-0.1702***	-0.1663***	-0.1667***
ln(世帯年収)	0.3785***	0.3780***	0.3779***
阿蘇の情報ダミー×ln(世帯年収)	-0.0791	-0.0784	-0.07867
涵養機能の認知度	0.09684***	0.09561***	0.1025***
阿蘇の情報ダミー×涵養認知度	-0.0007	-0.002370	-0.00554
訪問頻度			
川	0.0171	0.01525	0.01681
阿蘇の情報ダミー×川	0.0175	0.0191	0.0167
森	0.04651**	0.04724**	0.04497**
阿蘇の情報ダミー×森	-0.0177	-0.01974	-0.01724
水源	0.07098***	0.07104***	0.07208***
阿蘇の情報ダミー×水源	-0.0088	-0.008251	-0.00861
九州ダミー	-0.0587	-0.06248	-0.05914
親の職業			
農業		0.07577	
建設業		0.04727	

鉱業・石油石炭		0.22591	
電力・ガス・水道業		0.04360	
官公庁		0.04248	
あなたの職業			
農業			0.02848
建設業			0.1232
鉱業・石油石炭			0.5932
電力・ガス・水道業			-0.1824
官公庁			-0.1246
定数項	3.544	3.550	3.529
ln(sigma)	0.2443	0.2438	0.2434
sigma	1.277	1.276	1.275

この結果は、被説明変数に阿蘇情報有のグループとなしのグループのWTPを統合した場合の区間回帰分析を示している。モデル(1)は阿蘇情報ダミー、個人属性、およびそれらの交差項を含めており、モデル(2)はモデル(1)に親の職業を追加し、モデル(3)はモデル(1)に自分の職業を追加したものである。モデル(1)を見ると、社会経済学的属性の中で、年齢が高く、大卒で、世帯年収が高い人は、水資源保全に対する支払意思額が有意に高くなるのが分かる。また、涵養機能の認知度が高い場合、森や水源への訪問頻度が高い人も支払意思額が高い。これは、自然環境に知識や親しみを持っている人は、その他の社会経済学的特性をコントロールしたうえでより高い水資源へのWTPを表明することを示している。交差項については、阿蘇の情報ダミー×大卒以上ダミーのみ統計的に有意に負の効果を持ち、阿蘇山の保全であると伝えられたグループは、山林の保全と伝えられたグループに比べて大卒の効果が低くなっていることが分かる。モデル(2)、(3)を確認すると、回答者の現在の職業や親の職業は、WTPに対して有意な影響を持たなかった。

#### (4) 発災時の自然資源の活用（グリーンレジリエンス）

アンケートの結果、熊本市内と南阿蘇村の同程度の規模のコミュニティを対象に、熊本地震発災時の水や食料の備蓄・利用などについて質問を行った。この結果、下記の様な結果が得られた<sup>15)</sup>。

特徴的であったのは、水資源の利用において、熊本市内では給水車や配給によって水を得ていたことに対し、南阿蘇では湧水の利用が顕著に見られた。逆に、水の備蓄は熊本市内の方が多く、これらは、南阿蘇では地域内に湧水資源が豊富にあり、日常的な利用や認知があるため、地域ストックとして水資源が確保されているといえる。

また、南阿蘇では概ね5km以内の場所で水を確保したことがアンケートで明らかになったが、南郷谷の主要な湧水から5km圏内は、南郷谷の人口分布をほぼ網羅しており、湧水と生活圏の重複が、発災時に有効に働いたといえる。

食料備蓄は、圧倒的に熊本市内より南阿蘇の方が多くのストックがあることが明らかになったが、熊本市内でも数日程度の生存に必要な食糧備蓄は見られた（図1.13）。一方で、被災後の食料備蓄の活用には大きな差が見られた。南阿蘇では炊き出し等による備蓄の活用が見られ、75%の世帯が備蓄を利用し、80%の世帯が地震直後(3日ほど)食料調達に困らなかったと回答したが、熊本市内では、自宅内の備蓄の利用があまり見られなかった（図1.14）。これは南阿蘇での地域コミュニティの行事などで炊き出しなどが日常的に行われてきた結果、被災時も変わらず備蓄利用や炊き出しなどが行われたことが推察される。

このことから、南阿蘇は自然資源が豊富であることもさることながら、その資源を活用できる日常的な技術や機材を有していることが明らかになった。

熊本地震発災時の南阿蘇から、グリーンレジリエンスは、地域の自然資源が日常的に利用できる状態で維持されていること、また、自然資源を活用できる技術を有していることが重要であることが明らかになった。

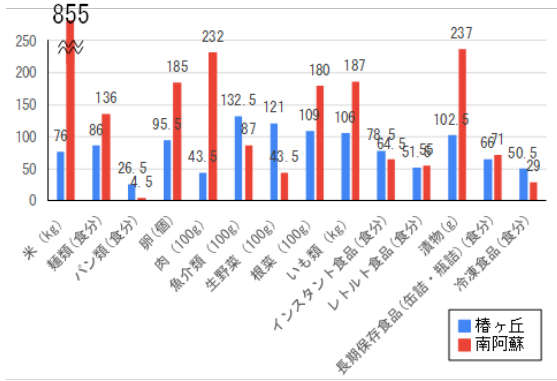


図1.13 食料備蓄量

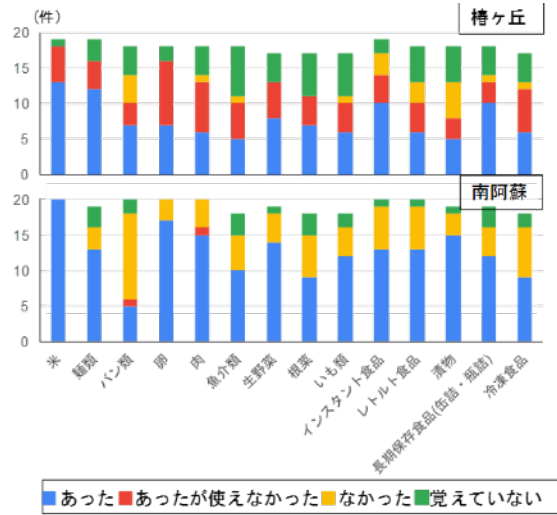


図1.14 備蓄の利用

加え、特に湧水について着目すると、阿蘇南郷谷の江戸時代の集落形成史は湧水に依存している<sup>22) 23)</sup>。白水地区は湧水が豊富で用水が発達せず、且つ湧水が多く湧出するエリアより標高の高い位置には集落・水田が形成されなかつた。湧水資源が乏しい久木野と長陽では外輪山久木野側では用水開発、長陽ではため池開発が行われ、この水資源より低いところで集落・水田が発達した。阿蘇谷でも湧水と集落位置の関係は相関性があり、湧水資源に依存して集落が形成されてきたことがうかがえる。これらの自然資源の活用をベースとした集落形成が熊本地震時の湧水利用につながったと考えられる。自然と共生してきた地域社会の履歴が災害レジリエンスに大きく寄与したといえ、これがグリーンレジリエンスの根幹をなしているといえる。

また、別の研究にて開発中のJet水車による約1.5kWの発電パッケージを利用し、発災時の電源確保を想定したデモ発電を実施した。デモは、南阿蘇村両併地区の農業用水路の水をお借りし、地域住民とともに行った(写真1.1)。参加された方からは、災害時だけではなく、日常時の農作業への電気の利用についても可能性があるとのことであった。水の自立化に関し、地区内に雨水タンクを設置している家庭において、発災時だけではなく日常的な雨水の利用可能性を確認した。ただしコロナ禍が影響し、拠点の設置までは実現ができなかつたものの、グリーンレジリエンスに必要な要素や可能性を確認することができた。



写真1.1 Jet水車による発電デモ

### 5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1における目標は、(1) プロジェクト全体の総括および(2) 草原の大都市圏への水供給サービスの定量的評価である。下記のように、当初の目標に対しては概ねの成果が得られた。

(1) においては、プロジェクト全体の成果を総合的に俯瞰し、地域循環共生圏および創造的復興の考え方を整理した。また、地域資源の価値の再発見または発見し、共有することによって形成される自立・分散型社会の実現、さらに他地域との恵みとお返しとの連鎖を構築するプロセスの重要性について提案を行った。

(2)においては、草原の発散量を樹液流計で測定し、C4植物であるススキ草原の蒸散量はスギ・ヒノキやヤシブシと比べ著しく小さいことを明らかにした。概算値で年間120mm程度はスギに比べて水資源量は多いと予測された。遮断蒸発についてもススキは森林に比べて小さいと考えられ、結果として年間蒸散・蒸発量はススキ<ササ<ヤシブシ<スギの順に小さいことが示唆され、水資源の保全の観点から草原の維持が重要であることを示した。

水による経済活動（GDP）への潜在的な貢献度に関しては、農業における水を明示的に含む産業連関表を作成した。市場で価値づけされてこなかった水資源を一種の資本ととらえた場合、生産要素として投入することにより、農業GDPのおよそ31%に水が寄与していることを示し、経済活動への水の寄与の高さを明らかにした。草原および水の価値を明示し、大都市圏や沿岸域と共有することが重要である。

さらに、発災時の自然資源の活用手法（グリーンレジリエンス）の提案に関しては、主に熊本地震時の災害直後の状況に関するヒアリングを実施し、自然資源を活用することで災害発生直後の水不足、食料不足、エネルギー不足を補い、災害レジリエンスを高めることができることを明らかにした。自然資源は災害発生直後のレジリエンス力を高める価値があり、自然資源である水や食料、燃料などのストック量の確保とともに、それらを災害時に活用できる活用力の向上が重要である。

上記のように、おおむね研究目標を達成した。

## 6. 引用文献

- 1) Bosch, J.M. and Hewlett, J.D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55, 3-23
- 2) Farley, K.A., Jobbagy E.G., Jackson R.B. (2005) Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biol* 11, 1565-1576.
- 3) Zhang, L., Dawes W.R., Walker G.R. (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour Res* 37, 701-708.
- 4) Reich, P.B., Walters M.B., Ellsworth D.S. (1997) From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, 13730-13734.
- 5) Komatsu et al. 2007 小松 光 (2007) 日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係. *日林誌* 89:217—220
- 6) Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Beverly, C.R., Ong, C.K., Khan, A.A.H., Bleby, T.M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol* 21(9), 589-598.
- 7) Clearwater, M.J., Luo Z.W., Mazzeo M., Dichio B. (2009) An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems. *Plant Cell Environ* 32, 1652-1663.
- 8) Skelton, R.P., Brodribb T.J., McAdam S.A.M., Mitchell P.J. (2017) Gas exchange recovery following natural drought is rapid unless limited by loss of leaf hydraulic conductance: evidence from an evergreen woodland. *New Phytol* 215, 1399-1412.
- 9) 宮沢良行 (2015) 平成25年度環境研究総合推進費「阿蘇を構成する植生の蒸発散の比較研究：草原の維持は水資源涵養に寄与するか？」による研究委託業務委託業務報告書
- 10) Burgess, S.S.O., Adams M.A., Turner N.C., Beverly C.R., Ong C.K., Khan A.A.H., Bleby T.M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol* 21, 589-598.
- 11) Larcher, W. (2003) *Physiological Plant Ecology*. Springer Verlag, Berlin.
- 12) Miyazawa, Y., Du S., Taniguchi T., Yamanaka N., Kumagai T. (2018) Gas exchange by the

- mesic-origin, arid land plantation species *Robinia pseudoacacia* under annual summer reduction in plant hydraulic conductance. *Tree Physiol* 38, 1166-1179.
- 13) Miyazawa, Y., Inoue A., Maruyama A., Otsuki K., Giambelluca T.W. (2017) Transpiration of trees in a cool temperate forest on Mt. Aso, Japan: comparison of model simulation and measurements. *Ecol Res* 32, 547—557.
  - 14) Duursma, R. (2021) R package "plantecophys"
  - 15) 平岡和真, 寺村淳, 田浦扶充子, 大津耕太, 島谷幸宏 (2021) 熊本地震発生後の自然資源を活用したレジリエンスの向上に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 77 (2), I\_84-I\_90.
  - 16) Clearwater, M.J., Luo Z.W., Mazzeo M., Dichio B. (2009) An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems. *Plant Cell Environ* 32, 1652-1663.
  - 17) Van de Put, H., De Pauw D.J., Steppe K. (2020) Evaluation and optimization of a 3D-printed external heat pulse sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 173, 105413.
  - 18) Baldocchi, D.D., Wilson K.B., Gu L.H. (2002) How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest—an assessment with the biophysical model CANOAK. *Tree Physiol* 22, 1065-1077.
  - 19) Kelliher, F.M., Leuning R., Raupach M.R., Schulze E.D. (1995) Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric For Meteorol* 73, 1-16.
  - 20) Jones, H.G. (2014) *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* Second Edition. Cambridge University Press, New York, USA.
  - 21) Ball JT, Woodrow IE, Berry JA (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In J Biggens, ed, *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands, 221-224.
  - 22) 寺村淳 (2020) 近世から近代前期にかけての阿蘇南郷谷に見る湧水と農業利水の関係: 土木史研究. 講演集 40, 135-140.
  - 23) 寺村 淳, 田浦 扶充子, 島谷 幸宏 (2020) 阿蘇地域における水資源としての草原と山, 第 62 回土木計画学研究発表会講演集.

## II-2 自然災害と生態系サービスの関係性から見た創造的復興の提案

熊本大学大学院先端科学研究部 皆川朋子

副島顕子

〈研究協力者〉 熊本大学大学院先端科学研究部 藤井紀行  
アジア航測（株）

### 〔要旨〕

本研究は、自然条件・社会条件と災害との関係性、攪乱と生態多様性との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法の提案を目指すものである。災害に関しては阿蘇カルデラ地域で頻発する斜面崩壊と水害、攪乱と生物多様性に関しては、草原及び阿蘇北向谷原始林を研究対象とし、(1) 斜面崩壊リスクの評価と低減策の提示、(2) 草原及び森林斜面における人為的攪乱や災害による攪乱と生物多様性との関係性の解明と管理のあり方の提示、(3) 伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方の提示を目的とした。得られた成果を以下に示す。

(1) 平成24年九州北部豪雨を対象とした斜面崩壊要因分析により、阿蘇カルデラのような特殊な火山地域においても樹木の根茎よる緊縛力により崩壊抑制効果が認められることを示し、構築した斜面崩壊確率予測モデルを用いて阿蘇カルデラ内の斜面の崩壊確率を可視化し示した。また増加した人工林（針葉樹林）斜面を対象とした崩壊確率予測モデルから崩壊確率を可視し、これに基づき、崩壊確率が高いエリアにおける暴露低減、緩衝林として機能する可能性がある樹林帯の保全による暴露回避等、斜面崩壊に対する災害リスクの低減のあり方を提示した。

(2) 阿蘇北向谷原生林における攪乱（災害）後の経過時間、地形・地質と植生の関係を明らかにした。極相と自然二次林のモザイク状の存在は、頻繁に起こる災害による攪乱によって動的な平衡状態にあることを示すものであり、攪乱からの回復の段階が一樣でないことによって、より豊かな生物多様性が維持されていること示した。草原に関しては、採草・野焼き等の人為的攪乱の頻度によって成立する草原が異なること、東外輪地域は他地域と比較し種構成が異なり、雨の日数、火山灰土壌が卓越していることが関与している可能性を定量的に示した。これらを踏まえ管理のあり方を提示した。

(3) 本地域で行われてきた伝統的治水及び自然地形と浸水リスクとの関係を評価し、これを踏まえ遊水地、水害防備林及び道路をかさ上げした横堤、田んぼダム導入による流出抑制や氾濫流抑制効果を評価し有効性を示した。さらに、田んぼダムは防災意識の向上に寄与すること、黒川に整備された5つの遊水地の氾濫原依存種の生育・生息場として機能していること、防災と生物多様性が両立した管理のあり方を示すとともに、これを発信・共有するための環境・防災教育副読本を作成し行政と地域住民に提供した。

### 1. 研究開発目的

阿蘇地域では、平成24年（2012年）九州北部豪雨、2016年熊本地震において斜面崩壊や氾濫被害等の甚大な被害が発生した。また、平成30年（2018年）西日本豪雨災害などの深刻な水害が多発する等、気候変動による災害リスクはさらに高まることが予想されている。環境省はこのような災害リスクの増大、人口減少・少子高齢化、地方からの人口流出等の社会情勢の変化に対応するため、「生態系の保全・再生・維持管理を通して、危険な自然現象に人命・財産がさらされることを避け、生態系を緩衝帯・緩衝材として用いるとともに、食糧や水の供給などのさまざまな機能により、人間や地域社会の自然災害への対応を支える考え方」（2016）を示した。さらに、2018年第5次環境基本計画において、地域循環共生圏の創出による持続可能な地域づくりの必要性が示され、阿蘇地域においても生態系を活用した減災・防災、地域循環のコンセプトを盛り込んだ創造的復興が求められる。テーマ I サブテーマ (2) では、自然条件・社会条件と災害との関係性、攪乱と生態多様性との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法を提案することを目的とする。



## 2. 研究目標

攪乱と生物多様性との関係性を把握すること、および自然条件・社会条件と災害との関係性を把握し、土地利用の見直し、伝統的な手法、自然環境の適切な管理などにより災害リスクを低減する創作的復興手法の提案を目標とする。

斜面崩壊によって植生が頻繁に破壊される箇所では、植生遷移が中断されることでいわゆる二次林が自然植生として成立する。このような自然のサイクルが生物多様性にもたらす影響について解析し、現在の植生構造と自然災害の分布や頻度との関係を明らかにする。一方、潜在自然植生が森林である日本において、草原は人為的な半自然環境として維持されてきた。そこには草原特有の生態系があり、独自の生物多様性が存在している。阿蘇を代表する草原生態系の生物多様性が、草原管理方法、地形や気候とどのように関連し、維持されてきたのかを解明することを目的とした。

## 3. 研究開発内容

本研究課題では、災害リスクについては阿蘇カルデラ地域で頻発する斜面崩壊による土砂災害と水害、攪乱と生物多様性に関しては、草原及び国の天然記念物である阿蘇北向谷原始林を研究対象とする。

研究目標に基づき、以下の3つの項目を設定した。

- ①2012年九州北部豪雨により発生した斜面崩壊を対象に、地形・地質、植生、土地利用・集落構造などの要因と災害リスクとの関係性を評価し、斜面崩壊による災害リスク低減のあり方を提示する。
- ②草原及び森林斜面（阿蘇北向谷天然林）を対象に、人為的攪乱（草原・森林管理方法）や災害による攪乱と生物多様性との関係性を評価し、防災と生物多様性が融合した草原・森林管理のあり方を提示する。
- ③氾濫に対する伝統的治水技術（遊水地など）、生態系サービス（防災、生物多様性の保全）、地域コミュニティと減災との関係性を評価し、伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方を提示する。

### （1）斜面崩壊による災害リスクの低減のあり方

阿蘇地域の地質は阿蘇火山噴出物により構成されているため、地震や豪雨に対する斜面崩壊リスクが高い地域である。また、地形的にも中央部の中央火口丘群、外輪山により急斜面が多い。そのため本課題では、阿蘇カルデラ地域として白川流域（図2.1）を研究対象とする。

本課題では、植生の根茎の緊縛力による斜面崩壊抑制機能、流出土砂からの暴露を回避・低減する森林の緩衝機能を活用した土砂災害の低減策を提示するために必要な基礎知見を得るため、まず斜面崩壊に対する植生の寄与を一般化線形モデルにより評価した。

斜面崩壊要分析は平成24年7月九州北部豪雨による一次谷における崩壊地を対象に実施した。斜面崩壊地を防災科学技術研究所による「平成24年7月九州北部豪雨に伴う土砂移動分布図」（以下、土砂移動図とする）を用いて、浅田ら<sup>1)</sup>の方法により斜面崩壊地を判読した。崩壊地は、植生の根茎による緊縛力が斜面崩壊に関与すると考えられる崩壊深が2m以下の表層崩壊、植生が関与しない崩壊深が2m以上の深層崩壊に区分し、前者を解析対象とした。解析は、斜面単位として斜面ユニット（SU）を作成し、表層崩壊地が含まれるSUを崩壊SU、崩壊地が含まれないSUを非崩壊SUとし、崩壊の有無を応答変数、説明変数は崩壊に寄与すると考えられる素因として、標高、傾斜、方角、SPI（Stream Power Index= $\ln(CA \cdot \tan G)$ 、集水面積CAと傾斜角Gの関数）<sup>2) 3)</sup>、TWI（Topographic Wetness Index,  $=\ln(A/\tan B)$ 、流れ方向に直行する

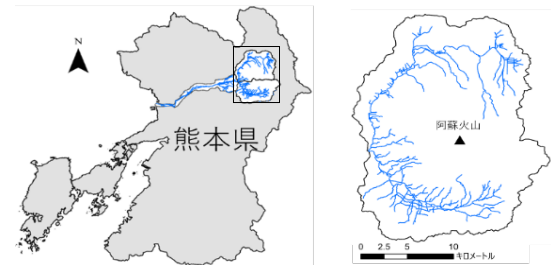


図2.1 対象地域とした白川流域



図2.2 植生の斜面崩壊抑制機能による脆弱性の低減と緩衝林による暴露の回避

単位幅あたりの傾きBと面積Aの関数)<sup>2) 3)</sup>、表層地質、植生、誘因として、1時間最大雨量、1.5時間短期実効雨量を選定し、一般化線形モデル (GLM) を用いて分析した。GLMの確率分布は二項分布、リンク関数はlogitとし (ロジスティック回帰分析)、誘因である1時間最大雨量と1.5時間短期実効雨量についてはそれぞれ1つずつ説明変数に組み込みを行った。なお、カテゴリ変数である方角は北を基準とし、地質と植生はそれぞれ分布面積が最大であった火山砕屑物と針葉樹林を基準として解析した。また、GLMによって算出された植生の各カテゴリの回帰係数に対して多重比較検定 (Tukey-Kramer法) を行った。また、GLMと同様のデータセットを用いてランダムフォレスト分析 (RF) を行い、崩壊に寄与する説明変数の重要度を評価した。

また、本地域では人為により維持されてきた草原が減少する一方で森林が増加し、現在、一次谷斜面の植生の約35%が人工林 (針葉樹林) を占めている。樹木は斜面抑制や緩衝林としての機能を有する一方で、斜面崩壊が発生した場合、崩壊深や流下する立木の量は他の植生と比較して大きく、その斜面下部に集落等により甚大な被害を引き起こす恐れがあるため、これを考慮する必要がある。針葉樹林が立地する一次谷を対象に崩壊SU、非崩壊SUを作成し、崩壊・非崩壊を応答変数、標高、傾斜、SPI、TWI、標高、表層地質、針葉樹林の立木密度、収量比数、平均樹高、及び収量比数と平均樹高の二乗項目、誘因として、1時間最大雨量としてGLM及びRFにより解析した。なお、針葉樹林の立木密度、樹高に関しては、アジア航測 (株) が行った空中写真を用いた判読結果を用いた。収量比数とは、森林が理論上最も密に生育している場合の蓄積量に対する現実の森林の蓄積量の割合であり、1に近づくと林の中は暗く、枯れ木が目立つようになり、0.7 前後の森林が健全であるといわれており、間伐の目安になるとされている。

暴露回避として機能する緩衝林の条件に関しては、平成24年九州北部豪雨及び平成28年熊本地震を対象に、災害前後の空中写真を用いて、斜面崩壊による集落への被害を回避した可能性がある樹林帯を抽出し評価した。

以上の結果を踏まえ、災害リスクの回避・低減が期待できる斜面管理のあり方を検討した。

## (2) 山地斜面及び草原における災害・人為的攪乱と生物多様性との関係性と管理のあり方

森林斜面については、阿蘇北向谷原始林を対象に、災害攪乱である自然植生の崩壊箇所と植林地の崩壊箇所を中心に、現在と震災前の植生図及び微地形図を作成し、これを基に植生調査及び地形調査を行った。森林構造について、種組成や樹高のデータを得て細かい林分を比較することにより、遷移のサイクルと攪乱頻度についての考察を行い、その頻度と地形的特徴の関係を明らかにする。北向谷原生林域内において、31地点のコドラートで植生調査を行い、また、主尾根沿いや斜面上部から立野ダム造成地にかけての崩壊地で簡易的な地質調査を行う。植生調査で得られたデータと地理院航空写真、ドローンによる空撮写真から作成したオルソ画像を用いて現存植生図を作成し、その後31地点の植生データを用いてクラスター分析などを行った。

草原に関しては人為的攪乱や微地形と生物多様性の関係解明のために、過去6年間における人為的攪乱の程度が異なる4つの処理区において、ライントランセクトを設置し、出現する植物の種組成や被度を調査した (熊本県阿蘇郡高森町にある阿蘇花野トラスト地内にて設置)。4つの処理状況は以下のとおりである。S1処理区; 野焼き2回・採草3回、S2処理区; 野焼き2回・採草2回、S3処理区; 野焼き4回・採草1回、S4処理区; 野焼き4回。さらに比較のために人為的な攪乱が近年行われていない放棄地 (L1~3) や近くのスギ植林地内 (P1~3) でも調査を行った。

また、阿蘇地域における採草型草原の地理的変異の解明のために、阿蘇全域の14カ所においてライントランセクトを設置し、2m×2mのコドラート計196個の植生調査 (種名、被度) を行った。そのデータをもとにTWINSpan解析およびNMDS解析を用いて、クラスター解析を行った。さらにクラスター解析で得られた地理的な傾向がみられる要因を特定するために、各ライントランセクトにおける気象要因 (気温や湿度、降水量、降水日数、日照時間など9要因)、土壌要因 (容積重や炭素含量、石灰含量、水素イオン濃度 (PH)、火山灰層の厚さなど11要因) を用いて、CCA (Canonical Correspondence Analysis: 正準対応分析) と呼ばれる解析を行った。この手法は、直接環境勾配分析とも呼ばれ、種組成のデータと環

境のデータを同時に解析・視覚化することで、種組成の違いがどの環境要因と関連性があるのかを推定することができる。要因間の多重共線性をチェックした後、気象要因に関して、以下の4つの要因（OPR（年間降水日数）、RH（相対湿度）、TMP\_mea（年平均気温）、APCP（年間降水量））に絞り込み、土壌要因に関しては、以下の4つの要因（PH（水素イオン濃度）、CA（炭素集積度）、BS（塩基飽和度）、LAT（始良Tnテフラ）～AK（鬼界アカホヤテフラ）間の地層の厚さ）に絞り込み、CCAの解析を行った。

**(3) 伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方**

氾濫被害に対する脆弱性の低減と暴露回避、生態系サービスが強化される治水対策を検討・提案することを目的に、①伝統的治水工法及び自然地形と浸水リスクとの関係性を評価し、これを踏まえ、②伝統的治水工法を活用した超過洪水対策の検討、③田んぼダム導入による流出抑制効果と防災意識の向上について評価した。生物多様性の強化に関しては、遊水地を対象に、④遊水地を活用した生物多様性保全機能の強化策を検討した。①に関しては、伝統的治水工法の整理及び加藤清正が行った治水の考え方を整理するとともに、河川流出から洪水氾濫までを一体的に解析できるRRI(Rainfall-Runoff-Inundation)モデルを用いたシミュレーションにより浸水域及び浸水深を予測し、土地の脆弱性を評価した。②に関しては、黒川流域を対象に、遊水地、水害防備林、横堤による流出抑制や氾濫流制御の効果についてシミュレーションを行い検討した。③の田んぼダムに関しては、黒川流域に田んぼダムを導入した場合の流出抑制効果をシミュレーションにより予測し評価した。また、南阿蘇村と連携し、4地区に田んぼダムの導入し実証実験を行い、導入に対する課題や防災意識への影響を評価した。④については、阿蘇カルデラ内の河川、旧河道及び既設の5つの遊水地を対象に生物調査を行い、遊水地の生物多様性保全に対するポテンシャルを評価するとともに、生物多様性保全機能を強化する植生や土砂管理のあり方を検討した。さらに、これを広く普及し情報共有するための環境・防災教育読本を作成した。

**4. 結果及び考察**

**(1) 斜面崩壊による災害リスクの低減のあり方**

平成24年九州北部豪雨で崩壊した2944箇所の崩壊地のうち、1次谷における崩壊地は2038ヶ所で、崩壊深が2m以下の表層崩壊地は1347ヶ所であった（図2.1）。表層崩壊斜面を崩壊SU（1278ヶ所）、崩壊していない非崩壊SU（85,553ヶ所）を設定しGLMによる解析を行った結果、標高、傾斜、方角、TWI、標高、地質、植生、及び1時間最大雨量により構成されるベストモデルが構築された。斜面崩壊に正に寄与する有意な説明

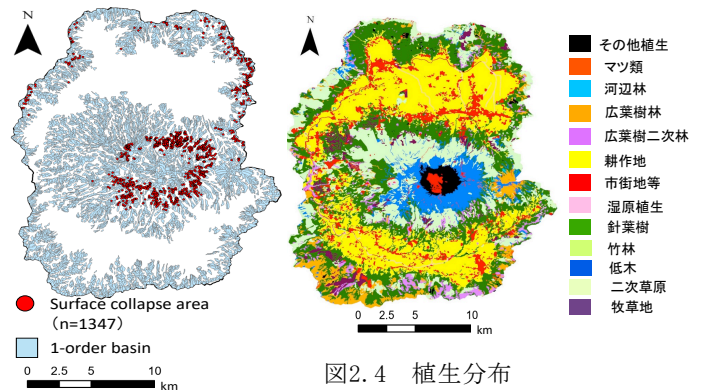


図2.3 一次谷と表層崩壊地

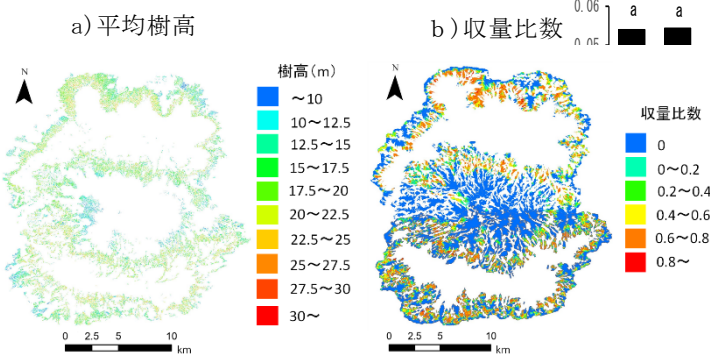


図2.7 空中写真から判読された平均樹高及び算出された収量比数

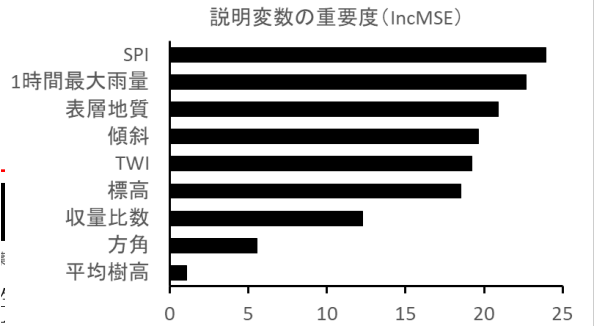


図2.8 針葉樹林斜面における崩壊に寄与する説明変数の重要度（RFの結果）  
斜面崩壊崩リスク予測結果

変数として、傾斜、起伏量、1時間最大雨量が選択され、負に寄与する有意な説明変数として、標高、TWIが選択された。表層地質に関しては先阿蘇火山岩、溶結凝灰岩は、火山破屑物と比較して崩壊しにくいこと、植生に関しては、針葉樹、広葉樹、広葉樹二次林等が二次草原、低木と比較して崩壊しにくいことが示された。植生の回帰係数に対して多重比較検定を行った結果、複数のカテゴリー間で有意な差が認められ、二次草原、低木の崩壊確率は、針葉樹林、広葉樹林、広葉樹二次林と比較して有意に高く（図2.5）、阿蘇カルデラ地域のような火山地域においても、森林の根系による斜面崩壊抑制機能が働くことを示している。また、RFの結果、説明変数の重要度は1時間最大雨量が最も大きく、次いでSPI、標高、表層地質の火山砕屑物、傾斜と続いた。植生のカテゴリーのうち重要度が大きかったのは二次草原、針葉樹林であり、1時間最大雨量の1/3程度、火山破屑物の1/2程度であり、比較的大きかった。図2.6にGLMより得られたモデルを用いて、1時間最大雨量120mmの場合の斜面崩壊確率を4ランクに区分し示した。中央火口丘群及び阿蘇谷北部の外輪山斜面のほとんどが崩壊確率が大きいランク4に該当していることが読み取れる。

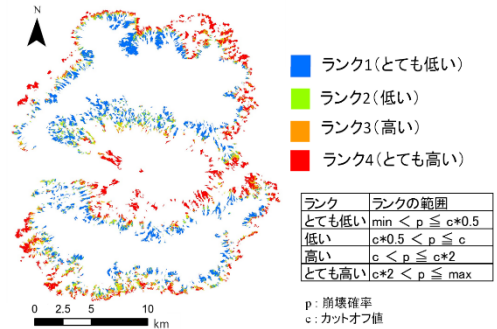


図2.9 1時間最大雨量120mmにおける針葉樹林斜面の崩壊リスク予測結果

針葉樹斜面（1次谷斜面の35%）を対象とした崩壊要因分析については、針葉樹斜面で表層崩壊したSU（237箇所）、崩壊していない斜面として非崩壊SU（34142箇所）を設定し、同様の方法で解析した結果、崩壊には、傾斜、標高、SPI及び1時間最大雨量が正に有意に寄与、平均樹高、収量比数が有意に負に寄与する説明変数として選択された（図2.7）。表層地質については、同様に先阿蘇火山岩、溶結凝灰岩は、火山破屑物と比較して崩壊しにくいことが示された。また、RFの結果から、説明変数の崩壊に対する重要度はSPIが最も大きく、次いで1時間最大雨量、表層地質、傾斜の順であった（図2.8）。針葉樹に関する変数として収量比数は最も大きい変数であるSPIの重要度の1/2程度であり、減災を考慮した針葉樹林の管理においても指標になる可能性がある。GLMより得られた得られたベストモデルを用いて、時間雨量120mmにおける斜面崩壊確率を4ランクに区分し示したマップを図2.9に示す。崩壊確率が高い斜面は、図2.6で示されていた場所に加え、南郷谷側の外輪山においても存在していること、また、中央火口丘群山腹下部においては阿蘇谷側よりも南郷谷側の崩壊確率が高いランク4が多く分布していることが読み取れる。

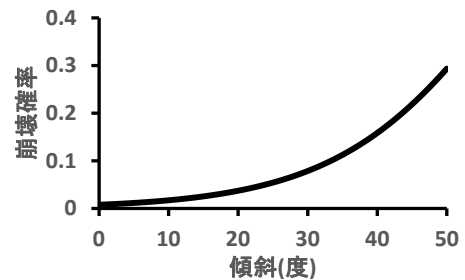


図2.10 傾斜

緩衝機能に関して、平成24年九州北部豪雨及び平成28年熊本地震により発生した斜面崩壊に対し緩衝林として機能していた可能性がある樹林帯（写真2.1）を抽出した結果、傾斜15～17度に立地するスギ壮齢林及び広葉樹壮齢林であった。傾斜15度未満の緩傾斜区間に抵抗力が高い樹木を配置することで緩衝機能が働くとされる。また、GLMから得られた図2.9からも傾斜が小さい場所の崩壊確率はランク1に評価されており、緩衝林としての機能が期待される。図2.10には、GLMから得られた傾斜に対する応答曲線を示した。

以上より、斜面崩壊リスクに関しては阿蘇カルデラのような火山地域においても針葉樹や広葉樹等の斜面の方が二次草原や低木斜面より崩壊しにくいこと、斜面崩壊確率を予測するためのモデル式を構築し、これによりカルデラ内の斜面の崩壊確率を示すことができた。さらに針葉樹林に着目した崩壊確率予測モデルから崩壊確率を示し、崩壊確率が高いエリア、緩衝林として機能する可能性がある樹林帯を選定することができる。

得られた知見と伝統的土地利用を踏まえ、斜面崩壊による災害リスク軽減のための斜面植生のあり方について検討する。本地域の伝統的な土地利



写真2.1 緩衝林として抽出された樹林帯

用として、山腹斜面下部が里山林、斜面は草原として一体的利用が図られてきた。1902年の地形図からも、平地から山腹にかけて、水田—集落—屋敷林—草原の横断的構造が読み取れる（図2.11）。図2.9に示した針葉樹林斜面の崩壊確率と1902年の森林の分布（図2.11）を比較すると、崩壊確率が低いランク1の樹林帯は1902年の森林位置と重なる部分が多い。山腹は1902年においては草原として利用されていたが、草原は斜面崩壊を抑制する機能は樹木より小さい。一方で、崩壊した場合の集落への被害について、流出する可能性のある土砂量や立木の量を評価しておく必要がある。図2.12は、流出土砂量に係わる崩壊深を示した。崩壊深は二次草原や低木よりも針葉樹や広葉樹の方が大きい可能性がある。図2.13には立木の量を樹高、立木密度等を用いて算出した結果を示した。立木の量が大きいランク4のエリアでかつ図2.9に示した崩壊確率が高い地域においては暴露の低減を図るための森林管理を行うことが必要である。ただし、本地域の場合、立木の量が大きいランク4のエリアは崩壊確率ではランク1として評価されているところが多く、むしろ緩衝林として機能する可能性が高いため、緩衝林としての保全や維持管理を行っていく必要がある。また、崩壊確率が低く緩衝林として機能する樹林帯がないエリアとして阿蘇谷東部の手野地区が抽出された（図2.13）。本地区は1902年から2018年までの間に森林が山腹上部に拡大し（図2.11参照）、崩壊による流出土砂量や立木の量は増加し暴露は増大していると評価されるため、図2.14に示すような斜面における立木の量の低減、緩衝林の配置による暴露の低減、回避を図るための植生管理が望まれる。

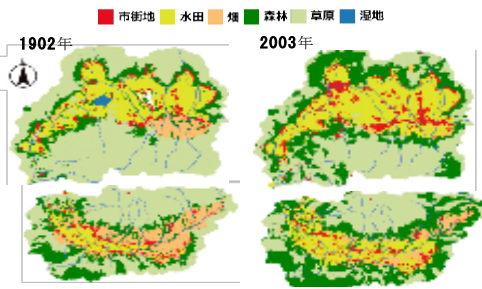


図2.11 土地利用の変化（左1902年、右2003年、国土地理院地形図より作成）

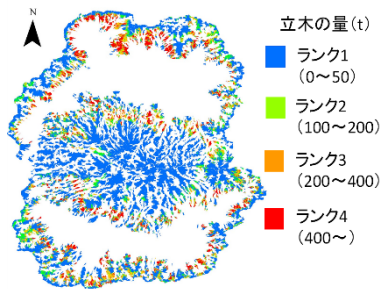


図2.13 立木の量

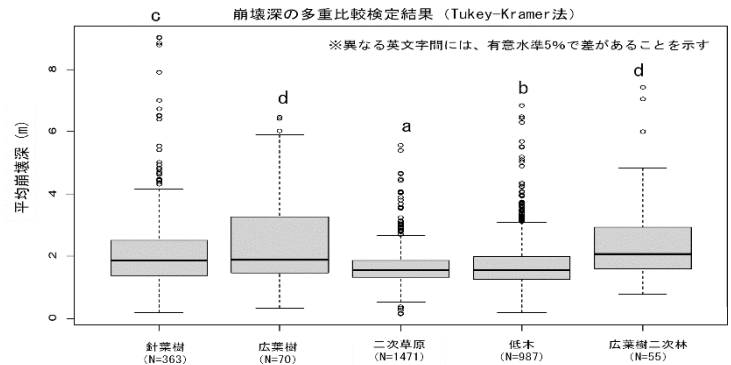


図2.12 H24九州北部豪雨時の崩壊地の植生毎の平均崩壊深（異なる英文字間には $P < 0.05$ で有意差, Tukey-Kramer法）

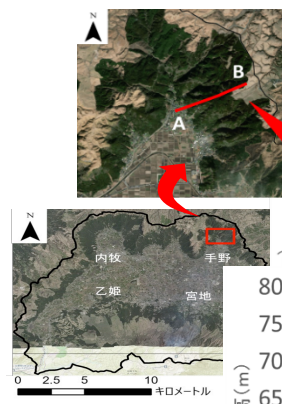


図2.13 崩壊リス

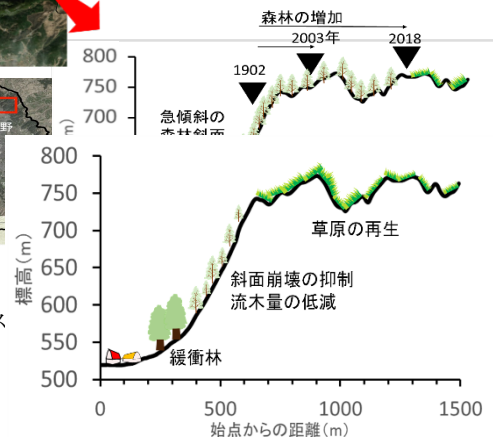


図2.14 斜面管理の一例

(2) 山地斜面及び草原における災害・人為的攪乱と生物多様性との関係性と管理のあり方

① 森林における攪乱と生物多様性の関係性

(a) 周期的な攪乱による植生の変化

地すべりや崩壊などの地形を変化させるような攪乱は、地形と同時に植生も大きく破壊することがある。一般に、攪乱によって破壊された植生は長い年月の植生遷移を経て、やがてその土地の環境に合った極相に至ると考えられている。しかし、植生遷移は単調に一方向へ進むのではなく、長い年月の間に繰り返し起こる攪乱によって中断されることがある。植生の遷移段階は攪乱からの時間経過を示すので、攪乱頻度が高い場所では植生は初期段階に止まることになり、遷移途中の植生に見られるさまざまな遷移段階は攪乱の頻度を反映している可能性がある。

阿蘇外輪山の北向谷原始林は、西日本暖温帯域の極相である常緑樹林として国の天然記念物に指定されているが2016年の熊本地震で斜面上部の複数箇所に崩壊が生じ、植生が大きく破壊された。崩壊地の周囲には、それ以前の崩壊跡に成立したと考えられる二次林的な落葉樹植生がモザイク状に成立しており、斜面崩壊による攪乱が比較的頻繁に生じていると考えられる。そのような二次林植生を詳細に調べることにより、過去の攪乱の頻度を推測し、異なる遷移段階の存在による生物多様性への影響について考察した。

クラスター分析の結果、31地点のコドラートは落葉樹主体の二次林からなるクラスターと常緑樹林からなるクラスターの大きく2つに分けられた(図2.17)。二次林のクラスターには、崩壊地植生(コドラートNo. 5、6)、ネザサー・ススキ群落(コドラートNo. 15)、スギ・ヒノキ植林地(コドラートNo. 4、9)、クヌギ植林地(コドラートNo. 18)、イスノキ-ウラジロガシ群集の混交林(コドラートNo. 1、12、13、30、31)、低木林(コドラートNo. 2)、クマシデ群落(コドラートNo. 3)、ミズキ群落(コドラートNo. 7、8)、ヒメウワバミソウ-ケヤキ群集(コドラートNo. 16、17、20、21、22)、イスノキ-ウラジロガシ群集の一部(コドラートNo. 11、19)が含まれた。常緑樹林のクラスターにはイスノキ-ウラジロガシ群集(コドラートNo. 10、11、14、23、24、25、26、27、28)が含まれた。二次林クラスターに含まれたコドラートには、遷移初期段階の崩壊地植生から、遷移後期と考えられるイスノキ-ウラジロガシ群集(混交林)までの幅広い植生がみられた。

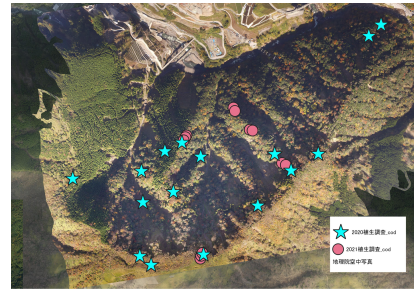


図2.15 コドラート位置

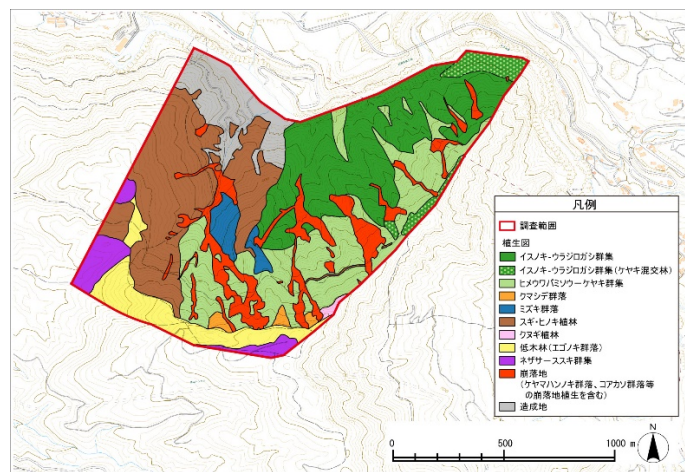


図2.16 北向山現存植生図

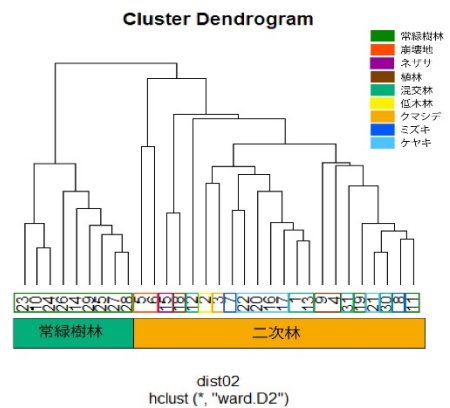


図2.17 クラスター分析結果  
Bray-Curtis距離、Ward法

Bray-Curtis 距離を用いた NMDS の結果に群落名を反映させたものが図2. 18である。崩壊地植生とネザサ-ススキ群落という遷移の最初期段階の植生が、その他の植生のまとまりから大きく外れた位置に配置された。クラスター分析では二次林のクラスター含まれたコードラート No. 11、19はその他の常緑樹林と近い位置に配置され、遷移後期の段階であることが示唆された。また、他の樹林コードラートの配置では、右下に位置するほど落葉樹林から混交林、混交林から常緑樹林へと遷移段階が移行していることがわかる。クラスター分析と NMDS によるこれらの結果から、遷移途中にあたる二次林は遷移が進行するにしたがって、その組成を変化させながら、極相へと近づいていることが示された。すなわち、北向谷原生林の中にモザイク状に存在する二次林は、繰り返し起こる攪乱によるさまざまな遷移段階から成立しているのである。二次林といえども自然植生であり、北向谷の原生林はその中にさまざまな遷移段階の二次林が存在する動的平衡状態にあること、またさまざまな遷移段階が含まれることにより、相乗的な生物多様性が維持されていることが理解される。

#### (b) 攪乱頻度に影響する地質学的要因

北向谷では落葉樹林である二次林が斜面上部に集中しており、斜面上部ほど崩壊の頻度が高いことが推測される。斜面上部には、傾斜が急であるという地形的要因だけでなく、板状節理を形成する崩壊性の高い岩石の地層が露出している（図2. 19、20）という地質学的要因もあり、崩壊が起きやすいのであろう。地質図によると、斜面上部には安山岩溶岩の層があり、またこの層が板状節理を呈して崩壊しやすくなっていることがみてとれる（図2. 21、22）。植生図と比較すると、崩壊しやすい地層と二次林がよく対応していることがわかる。このことは植生に過去の崩壊が反映されていることを意味しており、その遷移段階から崩壊の頻度を類推することができる可能性が示唆される。

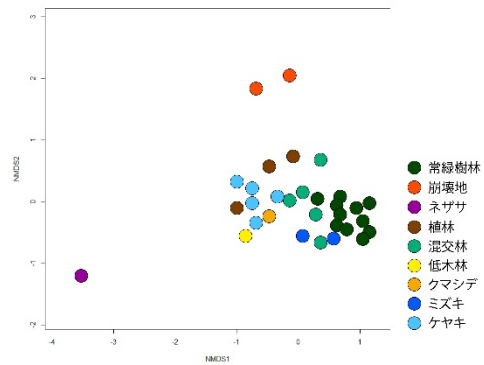


図2. 18 NMDS結果（群落名）

Bray-Curtis距離

Stress値 0.08177731



図2. 19 斜面上部でよくみられる板状節理



図2. 20 保護林外の落葉樹林で見つけた板状節理の一部1片の厚さは1cmほどで、素手で簡単に分離する事が出来る。

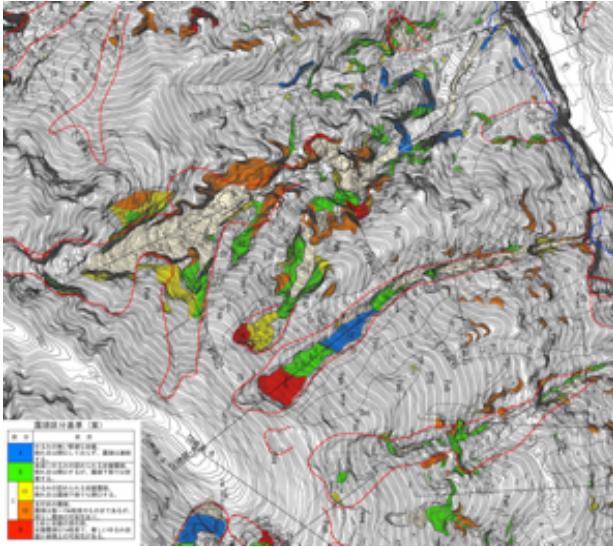


図2.21 北向谷の露頭区分図  
2016年の熊本地震で崩壊した露頭の様相。赤、  
緑、黄色は著しい緩みのある箇所を示す。

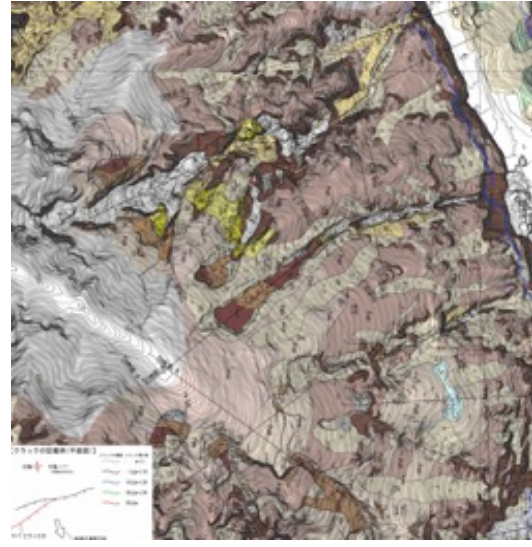


図2.22 北向谷の地質図  
図2.8で著しい緩みがみられる部分に崩壊しやすい凝塊角礫岩や板状節理を呈する安山岩溶岩の層があることがわかる。

### (c) 森林の管理について

繰り返り起こる崩壊は、攪乱からの回復の段階が一様でない二次林の成立に寄与している。それは地形や地質などの自然状況に応じたものであり、そこに生じる段階的な二次林の存在は自然な生物多様性に重要な役割を果たしていると考えられる。繰り返される遷移の初期化は自然の動的平衡というべきものであり、崩壊地などへの安易な緑化などは避けるべきであろう。

## ② 草原の生物多様性

### (a) 人為的攪乱や微地形と生物多様性の関係性の解明

阿蘇には国内最大面積の草原が存在するが、一口に草原といっても採草や野焼きの程度によって、様々な種組成からなる草原があることが予想される。そこで採草や野焼きの程度が異なる処理区間で植生が異なるのかどうかを調べた。TWINSPAN法を用いて、植生分類を行った結果、9つのクラスター（グループ1～9）が認められた（図2.24）。グループ1、2は、草原のライントランセクトであるS1処理区において、グループ3はS4処理区において、グループ4、5はS2、S3、S4処理区において観察された。一方、グループ6、7のほとんどは、放棄地のライントランセクトであるL1～3において観察され、グループ8、9は、スギ植林地内のライントランセクトであるP1～3において観察された。



以上の結果から、まずはS1~S4処理区の草原と放棄地、スギ植林地内における種組成は明瞭に異なることが明らかとなった。放棄地ではヘクソカズラといったつる植物が増え、ミツバツチグリやタカトウダイが人為的攪乱地における指標となることが分かった。S1~S4処理区の草原においては、5つのグループが認められ、採草(草刈り)の回数が多いS1処理区は一つのクラスターを形成していた。野焼きの比率が高

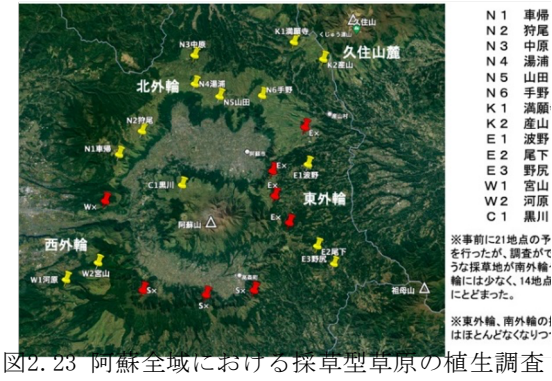
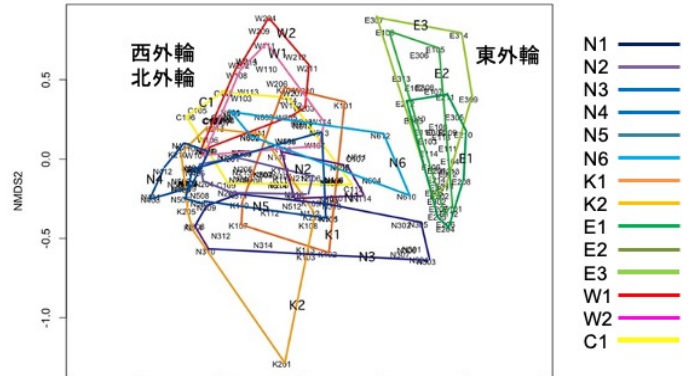


図2.23 阿蘇全域における採草型草原の植生調査

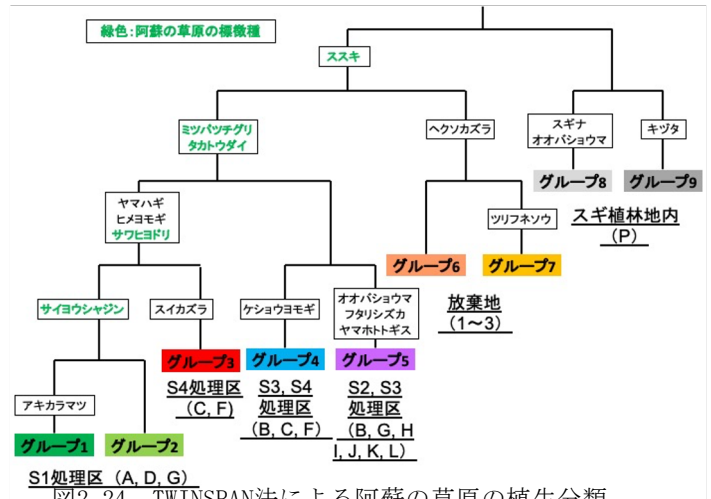


図2.24 TWINSpan法による阿蘇の草原の植生分類

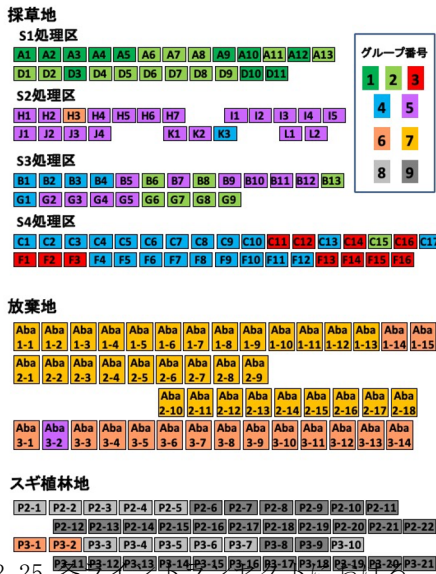


図2.25 各ポイントアンケートにおけるグループ1~9までのクラスターの分布

く、採草回数が少ないS2~4処理区ではグループがやや混在していたが、S1処理区とは明らかに異なる種組成の草原が成立していた。これらの結果は、人為的攪乱の種類や頻度の違いによって、成立する草原の種組成が異なることを示唆している。また今回の調査地のような限られた場所の中において、種組成が異なる草原が混在しているということは、阿蘇の草原における種多様性を高めている要因の一つに、草原維持のための人為的攪乱の程度の違いが関係していると考えられる。

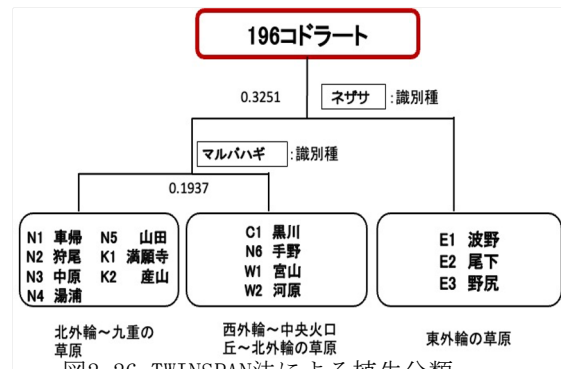


図2.26 TWINSpan法による植生分類

### (b) 阿蘇地域における採草型草原の地理的変異の解明

ここでは前項で扱った草原の中で適度に採草を行った草原のことを「採草型草原」と称する。採草型草原には多くの絶滅危惧種が含まれ、種多様性が高いことから、その成立要因についての解析が重要であると考えられる。採草型草原の種組成の研究から、阿蘇地域内でも場所によって優占種が異なっていたり、特定の種の分布に偏りがみられるが知られていた。実際に多くの絶滅危惧植物は阿蘇の東外輪地域に集中しており、なぜこうした地理的変異が見られるのか明らかではなかった。そこで本研究では、地域によって成立する採草型草原の種組成が本当に異なるのかをはっきりさせること、さらに違いがあるとしたら、どのような要因が関与しているのかを解明することを目的として研究を行った。

解析の結果、TWINSPLAN解析では3つ、NMDS解析では2つのクラスターが認められ、TWINSPLAN解析では東外輪を除く地域において、2つのクラスターが認められたが、NMDS解析ではそのクラスターは認められなかった(図2.27)。しかし、両解析とも東外輪とその他の地域の草原が異なるという共通する結果が得られた。この結果は、東外輪の草原とその他の地域の草原の種組成が明瞭に異なっていることを示唆している。さらにCCAによる要因解析の結果、気象要因に関しては、東外輪の植生とOPR(年間降水日数)が関連していると示された。また土壌要因に関しては、東外輪の植生とCA(炭素集積度)を除く3つの要因(PH(水素イオン濃度)、BS(塩基飽和度)、LAT(AT(始良Tnテフラ)~AK(鬼界アカホヤテフラ)間の地層の厚さ))が関連していることが示された。つまり、東外輪地域は他地域よりも雨の日数が多く、火山灰土壌が卓越していることで、他地域とは異なる草原が成立している可能性が示唆された。阿蘇の東外輪地域は、偏西風の影響により火山灰が常に降灰し、東外輪のLATの火山灰層の厚さは西外輪の約10倍はある。これにより東外輪地域と他地域では成立する土壌が異なり、その結果そこに生える植物にも大きな影響が生じているものと思われる。このように同じ人為的攪乱を受けた採草型草原においても地理的変異による相違が存在することが明らかとなった。それらはおそらく人間の関わりとは関係なく、阿蘇地域の気候や火山の歴史が大きく関わっているものと思われる。こうした情報は阿蘇の生物多様性の重要性を高め、適切に保全していくための基礎資料にもなると考える。

### (c) 草原の管理について

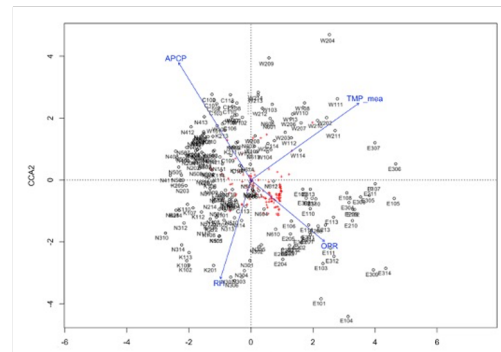


図2.28 CCAによる環境傾度分析(気象要因)

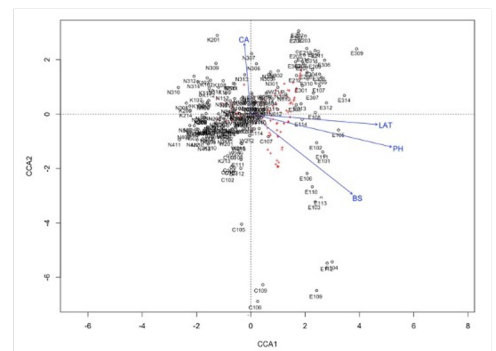


図2.29 CCAによる環境傾度分析(土壌要因)

草原の生物多様性に関わる解析を通して、阿蘇の草原は人の手による野焼きや採草といった人為的な攪乱だけでなく、阿蘇の気候や火山の歴史も関係しながら、その生物多様性が維持されていることが明らかとなった。今後の生物多様性の高い草原を維持していくためには、これまで行ってきた野焼きや採草によって継続的に攪乱を加えること、また地域によって成立する草原が異なることから、地域による違いを考慮に入れた草原管理が求められる。

(3) 伝統的治水技術を活用した減災・防災、生態系サービス強化策のあり方

① 伝統的治水及び自然地形と浸水リスクとの関係

黒川が流下する阿蘇谷には、約9000年前には湖が形成されており(図2.30)<sup>4)</sup>、その後、土砂流入により平らな谷底平野がつくられ、自然堤防上には集落が形成され、後背地には「牟田」と呼ばれる湿地帯が広がっていた。1902年の地形分類図においても一部湖沼が確認でき、谷底平野の狭い下流区間の河道は著しく蛇行していたことが確認できる(図2.11)。また、阿蘇地域の年間降水量は日本の平均値の約2倍である。このような氾濫しやすい地形、気象条件をもつ黒川流域では、しばしば氾濫被害が発生し、平成24年九州北部豪雨被害においても谷底平野部のほとんどが冠水した。これに対し、南郷谷を流下する白川は浸食によって形成された地形の底面を流れ下る。加藤清正は、谷底平野を蛇行してゆっくり流れ、かつ、氾濫域(遊水機能)をもつ黒川と勾配の急な白川の流れの違いを利用し、下流域の氾濫を低減させる治水を行った。その後、黒川流域の湿地帯の多くが、埋立、河川改修、圃場整備及び排水工事等によって消失し、現在は水田や畑地として利用されるようになった。

河川改修については、1953年6月に発生した大洪水以降、蛇行部のショートカットを主とした改修が行われ、現在でも本川と切り離された河道が黒川下流部に残存している。その後も1990年、2012年にも大規模な氾濫被害が発生し、川幅拡幅等の河川改修工事や中、下流に遊水地が設置され、1994年に内牧遊水地、2005年に小野遊水地、2011年に無田遊水地が完成した。その後、平成24年九州北部豪雨により再び甚大な被害を受け、輪中堤、小倉遊水地及び手野遊水地が建設された。このように黒川は治水や耕作地拡大のため氾濫域を縮小させてきたが、再び加藤清正が行った自然地形による遊水機能を活かした治水を受け継いだ遊水地の整備による流出抑制対策が行われている。黒川における遊水地整備は自然地形を活かした治水対策であり、もともとの環境である氾濫原環境を再生するものとしても捉えるこ

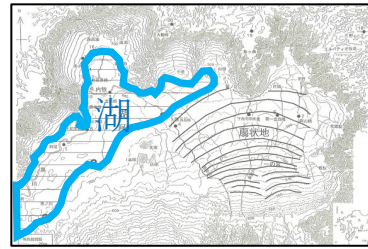


図2.30 9000年前の阿蘇谷<sup>4)</sup>  
(長谷川ほか(2010)<sup>4)</sup>に加筆)

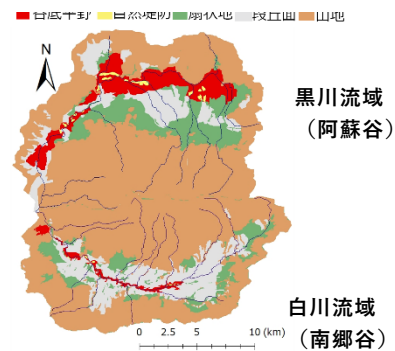


図2.31 地形分類図(河川は2003年河道)  
(国土地理院地形分類図を基に作成)

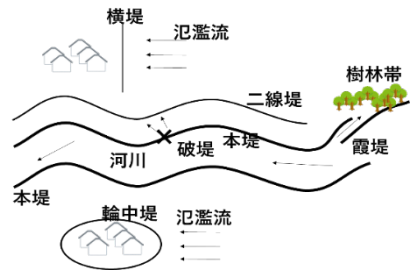


図2.32 輪中堤、横堤、二線堤の概念図

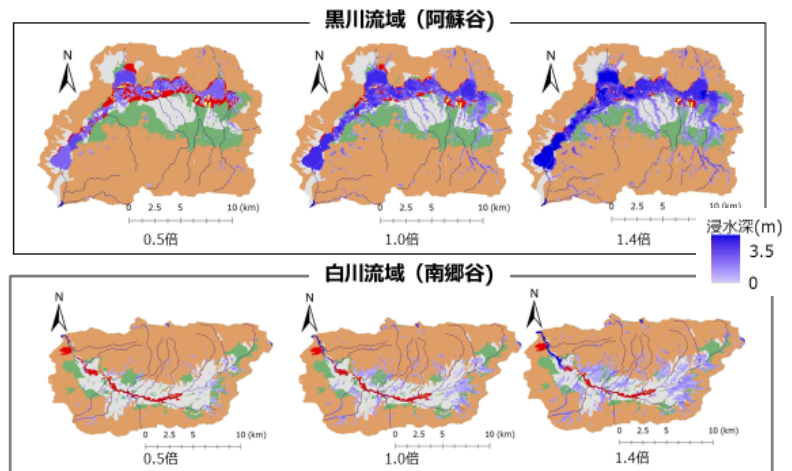


図2.33 黒川流域と白川流域における氾濫水リスクの違い

とができ、Eco-DRR（生態系を活用した減災・防災）の事例として位置づけられる。この他、伝統的治水工法（図2.32）として、熊本県は遊水地に加えて輪中堤による治水対策を行っている。また、黒川沿いにはタケ類による水害防備林が残存しているが、過去の空中写真と比較すると大きく減少している。

現在の浸水リスクを評価するため、平成24年九州北部豪雨の0.1倍～1.4倍の雨量に対する浸水域及び浸水深をシミュレーションにより予測した結果を図2.33に示す。その結果、特に黒川流域において土地利用の変化や氾濫域が大きく、平成24年九州北部豪雨やその1.4倍の超過高水によって、自然堤防、谷底平野及び段丘面（主に低位段丘面）では浸水深が2.0mを越える家屋数が増加し、特に谷底平野及び低位段丘面では2012年九州北部豪雨では見られなかった3.0mを越える浸水家屋が生じることが予測された。

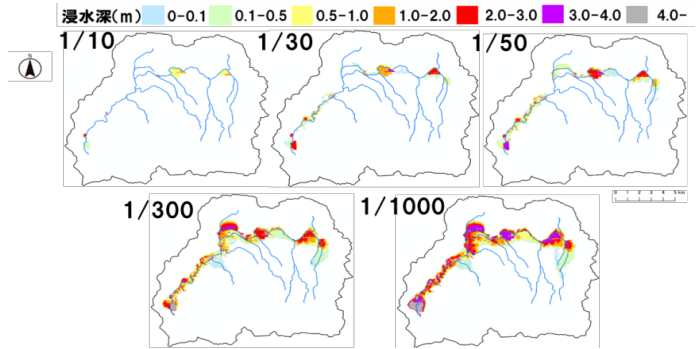


図2.34 黒川流域における1/10～1/1000年確率降雨時の浸水深の予測結果

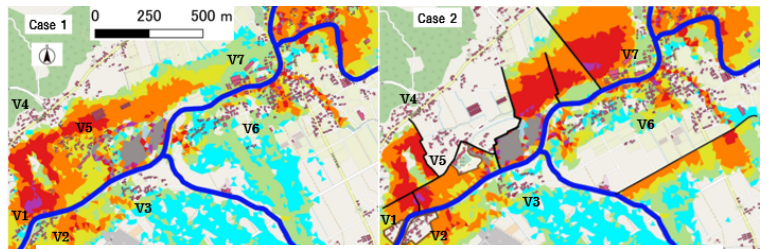


図2.35 道路を活用した横堤による氾濫流制御予測結果

②伝統的治水工法を活用した超過洪水対策の検討と提案

①を踏まえ、黒川流域を対象とした超過洪水対策として、遊水地、田んぼダム、水害防備林、横堤による治水対策の効果をシミュレーションにより評価した。その結果、遊水地に関して、2つの新設遊水地が整備された場合、1/50確率の降雨では市街地の浸水被害が生じないが、平成24年九州北部豪雨と同程度の1/300確率の降雨では甚大な被害を受けることが示された（図2.34）。そのため、既存遊水地の拡充とさらなる新設遊水地整備した場合の効果を評価した。また、氾濫流コントロール水害防備林の整備、横堤などを導入した場合の効果を評価した結果、水害防備林のみでは浸水家屋の減少は大きくないこと、既設の道路をかさ上げた横堤を整備することにより、浸水域の制御、氾濫流の低流速化を図り、家屋被害を大幅に軽減できる可能性が示唆された（図2.35）

③田んぼダム導入による流出抑制と防災意識の向上

浸水リスクが高い黒川流域における流出抑制対策として田んぼダム導入の効果を評価するため、図2.34の結果を踏まえ、図2.36に示す3エリアに田んぼダムを導入した場合の1/50年確率降雨に対する流出抑制効果をシミュレーションにより評価した。その結果、図中の①西岳川最下流地点では20.0m<sup>3</sup>/s、②花原川最下流地点では15.4m<sup>3</sup>/s、③花原川合流後黒川では22.8 m<sup>3</sup>/sのピークカットが見込まれることが示された（図2.37）。黒川の既設の5つの遊水地と2つの新設遊水地では100 m<sup>3</sup>/sのピークカット量が設定されていることを踏まえると、ここで設定した田んぼダム導入による効果は遊水地1～2ヶ所分の流出抑制効果があると評価される。

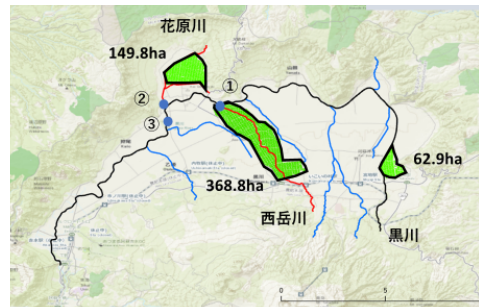


図2.36 黒川流域に流出抑制効果（シミュレーション）を把握するための設定した田んぼダムn（黄緑色表示、①、②、③は流量予測評価地点）

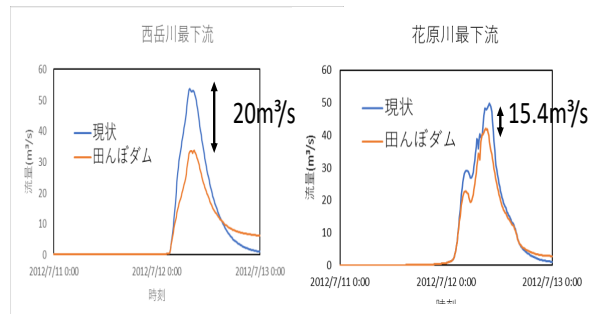


図2.37 田んぼダムにより支川における流出量低減予測



図2.38 南阿蘇村における田んぼダム導入実証実験地と掲載新聞記事（2021.6）

また、田んぼダムの実装にむけ、南阿蘇村と連携し、4地区に田んぼダムを導入し（図2.38）、導入時の課題、田んぼダム導入による防災意識への影響について、アンケート調査を行い評価した。その結果、導入に対して流出口におけるゴミにより詰まりへの懸念が多くあげられ、流出口にゴミ除けスクリーンを設置する等の必要性が示され22年度の導入にむけ準備を進めている。防災意識については、降雨情報に対する意識、関心の高まりが確認され、田んぼダムはソフト面のみでなく、防災意識の向上に寄与していること、さらに住民同士や住民と行政をつなぐコミュニケーションツールとして役立つことが確認された。

#### ④遊水地を活用した生物多様性保全機能の強化策の検討

##### (a) 遊水地の生物相の評価

阿蘇地域における生物多様性保全に対する遊水地のポテンシャルを評価するとともに、生物多様性に寄与する遊水地管理のあり方を検討した。黒川及び白川流域の河川、遊水池及び旧河道、合計31地点を対象に魚類、湿性植物、水生昆虫調査を行った（図2.39）。その結果、魚類については保全上重要なオヤニラミ（環境省絶滅危惧種ⅠB類）やミナミメダカ（絶滅危惧Ⅱ類）を含む魚類計18種が確認された。このうち、特にオヤニラミの確認地点は、遊水地予定地を含む旧河道3地点のみであったことから、新設遊水地は、旧河道を保全した遊水地設計を行う必要性が示された。これらの旧河道は、いずれも農業用水が流入することで流水域が維持されており（図2.41）、これを担保した設計が必要である。得られた情報を遊水地の計画を行う熊本県阿蘇地域振興局に2020年5月に報告し、その後、オヤニラミの生息場を残存させた遊水地計画が立案された。

遊水地に関しては、5つの既設の遊水地（図2.38）すべてで湧水が確認された。特に無田、小倉、手野遊水地は、湧水量が多く、排水のために人為的に掘削された水域以外の自然発生的な水域が常時形成されていた（写真2.2）。これらの遊水地における湿地の形成は、計画時に意図されたものではないが、本地域一体は湧泉帯であることや地下水位が高いことに起因するものと考えられた。遊水地における生物調査の結果、魚類11種うち氾濫原依存種8種、環境省や熊本県により選定されている絶滅危惧種（以下、重要種とする）2種、植物212種うち湿性植物118種重要種10種、昆虫類56種うち重要種12種、貝類5種うち重要種3種、甲殻類6種、両性類8種うち重要種2種、鳥類56種うち重要種5種、哺乳類3種、合計357種の氾濫原依存種を含む多様な生物のハビタットとして機能し、阿蘇地域の生物多様性を保全する上で高いポテンシャルを有していることが確認された。

次に管理手法について検討するため、重要種数が多く確認された水生昆虫に着目し、生物相と建設からの年数、管理との関係を見ると、最も出現種数が多かったのは、建設から間もない手野遊水地と小倉遊水地であり、それぞれ24種、22種、うち重要種はそれぞれ7種、6種であった。これらの遊水地における遷移初期の一・二年草本の割合はいずれも54%であ



図2.39 黒川に整備された5つの遊水地

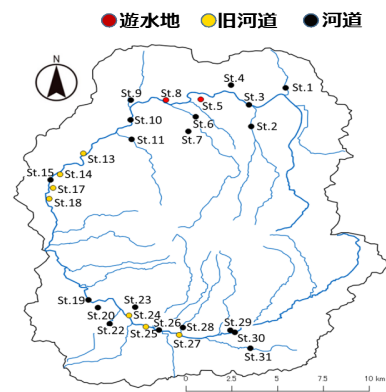


図2.40 魚類調査地点



図2.41 用水路の流入により流水域が維持されている旧河道



写真2.2 湧水や地下水により水域が形成されている遊水地

り、建設から約10年経過した無田49%、約15年経過した小野34%と比較して高かった。水生昆虫は、植生の遷移段階が進行すると、水生昆虫等の種多様性が減少することが知られている。遊水地内では、洪水時に越流し冠水するが、強い攪乱は受けず、ヨシ原等に遷移し、水生昆虫の生息場としてのポテンシャルが低下していくと考えられる。そのため、水生昆虫の生息場としての機能を維持しようとする、人為的に攪乱を与える



写真2.3 乾燥化処理前後の小倉遊水地（左）及び除草・土砂搬出前後の小野遊水地（右）

等の維持管理が必要となる。植生に関しても同様で、多様な植生が生育するためには、一部は除草や裸地化等の攪乱を与える等の働きかけが必要となる。親水公園として阿蘇市が水際域から陸域部の除草を行っている内牧遊水地では、建設から約26年が経過するが、一・二年草本の割合が47%と比較的高く、カワヂシャ、ホシクサ、ミズマツバ、リュウキンカなどの重要種が確認されている。これらは湧水が湧き出ている陸域で確認されたが、除草がこれらの種の生育に正に作用したものと考えられた。

### (b) 遊水地の管理と生物多様性の保全

遊水地においては、本来の目的である洪水調整機能を維持するための流入土砂の搬出や植生管理は必要不可欠である。小倉遊水地では、土砂搬出のための作業車両がスムーズに移動できるよう、遊水地に溝を掘り、地面を乾燥化させる工事が行われ、湿地が消失した（写真2.3）。小野遊水地においては、全域で植生と表層土砂が一斉に取り除かれ裸地となり、ほとんどの生物が一次的に姿を消した（写真2.4）。小野遊水地における植生と土砂除去に関して管理者である熊本県にヒアリングを行ったところ、県内で発生した令和2年7月球磨川豪雨災害を受け、地域住民から要望があったとのことであった。土砂管理による裸地化は、植生遷移を初期に戻し、1・2年生草本や水生昆虫の生息場として機能するようになるが、生物供給源（ソース）としての機能の一時的な低下や、一部の生物に負の影響を与える可能性がある。また、遊水地の乾燥化は樹林化の進行を早め貯水容量の減少につながる可能性がある。

洪水調整機能維持のための管理と生物多様性の保全に関しては、基本的に対立するものではないが、車両による効率的な管理の優先や環境保全に関する情報の不足等、効率性やコストを含めた管理のあり方やしくみづくりの検討、情報発信や共有化の必要性が挙げられる。貯水機能を担保しつつ、生物多様性の保全や環境教育の場としての多面的機能が発揮される管理が実践されている神奈川県境川遊水地にヒアリングを実施したところ、植生管理における配慮事項として、生物が繁殖する場所は避ける、時期をずらして刈る、冬期に水を人為的に入れ湿地を維持する、が実施されており、これらは黒川における遊水地管理においても適用可能な管理方法である。

静岡県巴川流域麻機遊水地では、攪乱のタイプや強度が異なるモザイク的な景観を形成する<sup>3)</sup>ことで麻機湿地にかつてみられた種の保全や再生が行われている。また、広大な土地に対して少人数で効率的に植生を管理する方法として火入れを行い、樹林化を遅らせる効果等が検討されている。

黒川に設置された遊水地における植生・土砂管理においても、多様な環境が形成されるよう、時期をずらした管理や、平坦な遊水地の一部を掘り下げる等多様な湿地環境を形成することで氾濫原依存種生息場としての機能を高めることができると考えられる。さらに、阿蘇谷に配置された7ヶ所の遊水地それぞれの環境特性を踏まえ、阿蘇谷や阿蘇地域全体の生物多様性の保全を考慮した整備のあり方の検討も今後の課題と考えている。神奈川県境川遊水地や静岡県麻機遊水地では、環境教育の場や健康増進の場としても活用されている。境川遊水地においては、環境教育に加えて防災教育も実施されている。治水施設である遊水地は、防災教育の場として教育効果が高く、さらに環境教育と防災教育を組み合わせることでより教育効果を高めることができる可能性がある。これを踏まえ、環境・防災教育のための教材としての読本を作成した（図2.42）。これには、地域住民のみならず、遊水地を管理する行政にとっての情報にもなるよう、植生や土砂管理に関する事例についても紹介している。読本を活用した現地での環境・防災教育やプログラムの実施に関しては、コロナウィルス拡大状況を踏まえ実施し、生物多様性の保全や環境保全・防災意識の向上を図り、住民、管理者などと情報を共有しながら、維持管理のあり方

や地域の将来像を模索し、かつ、これをコミュニケーションツールとしても活用し、地域コミュニティ、地域防災力の強化を図っていく予定である。

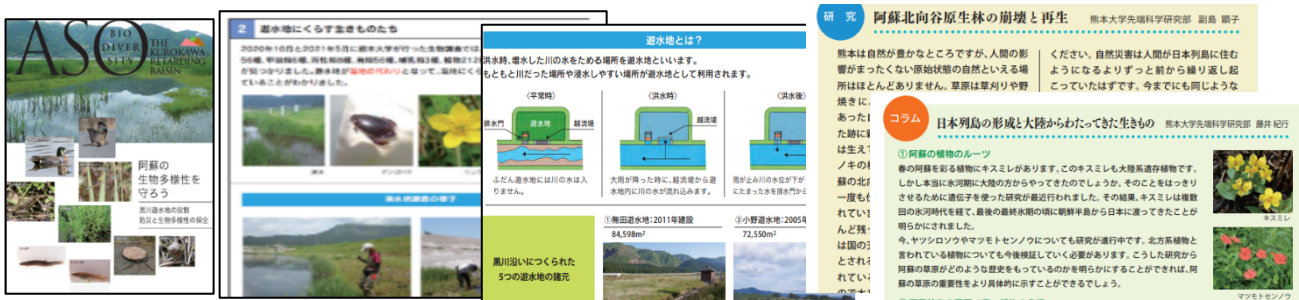


図2.42 情報発信・共有のための環境・防災教育副読本（研究成果も持ち込まれている）

## 5. 研究目標の達成状況

本研究では、攪乱と生態多様性との関係性、自然条件・社会条件と災害との関係性を明らかにし、自然環境の適切な管理、伝統的な手法などによる災害リスクを低減する創造的復興手法を提示すること目標とし、下記の通り達成することができた。

平成24年九州北部豪雨を対象とした斜面崩壊要因分析により、阿蘇カルデラのような特殊な火山地域においても樹木の根茎による緊縛力により崩壊抑制効果が認められることを示し、構築した斜面崩壊確率予測モデルを用いて阿蘇カルデラ内の斜面の崩壊確率を可視化し示した。また増加した人工林（針葉樹林）斜面を対象とした崩壊確率予測モデルから崩壊確率を可視し、これに基づき、崩壊確率が高いエリアにおける暴露低減、緩衝林として機能する可能性がある樹林帯の保全による暴露回避等、斜面崩壊に対する災害リスクの低減のあり方を提示した。

阿蘇北向谷原生林における攪乱（災害）後の経過時間、地形・地質と植生の関係を明らかにした。極相と自然二次林のモザイク状の存在は、頻繁に起こる災害による攪乱によって動的な平衡状態にあることを示すものであり、攪乱からの回復の段階が一樣でないことによって、より豊かな生物多様性が維持されていること示した。草原に関しては、採草・野焼き等の人為的攪乱の頻度によって成立する草原が異なること、東外輪地域は他地域と比較し種構成が異なり、雨の日数、火山灰土壌が卓越していることが関与している可能性を定量的に示した。これらを踏まえ管理のあり方を提示した。

本地域で行われてきた伝統的治水及び自然地形と浸水リスクとの関係を評価し、これを踏まえ遊水地、水害防備林及び道路をかさ上げした横堤、田んぼダム導入による流出抑制や氾濫流抑制効果を評価し有効性を示した。さらに、田んぼダムは防災意識の向上に寄与すること、黒川に整備された5つの遊水地の氾濫原依存種の生育・生息場として機能していること、防災と生物多様性が両立した管理のあり方を示すとともに、これを発信・共有するための環境・防災教育副読本を作成し行政と地域住民に提供した。

## 6. 引用文献

- 1) 浅田寛喜, 皆川朋子, 小山彰彦, 一柳秀隆 (2020) 平成29年7月九州北部豪雨による斜面における表層崩壊の要因分析, 応用生態工学会, 23(1), pp. 185-196.
- 2) Pourghasemi.H.R (2012) Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability, CATENA. 97. pp71-84.
- 3) Jaafari.A. (2018) LiDAR supported prediction of slope failures using an integrated ensemble weights of evidence and analytical hierarchy process, , Environmental Earth Sciences. 77: 42.
- 4) 長谷義隆, 宮縁育夫, 春田直紀, 佐々木尚子, 湯本貴和 (2010) 中部九州阿蘇カルデラ北部阿蘇谷の最終氷期後期以降の層相変化と地形形成, 御所浦白亜紀資料館報, 第11号, pp. 1-10.

## II-3 災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法

九州大学 工学研究院 樋口明彦

荒巻祥太（令和元年～2年度）

野口雄太（令和2年～3年度）

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 榎本碧

### 【要旨】

現在阿蘇で実施されている災害復旧他の土木事業の多くは、阿蘇固有の歴史的・文化的景観とは関係なく全国一律的・画一的なものであり、「阿蘇らしさ」に十分配慮しているものは少ない。これでは阿蘇の文化的サービス(景観)の劣化を止めることはできない。一般観光客を対象に阿蘇に実在する幾つかの土木構造物について意識調査を実施したところ、観光客が阿蘇に期待するものと現在のコンクリート主体の土木構造物の姿とが相容れないものであることが読み取れた。災害復旧を文化的サービス強化の機会として位置付けるためには、阿蘇の景観の成り立ちをしっかりと理解した上で阿蘇にふさわしいオリジナルの土木工法・設計等を開発・導入していくことが不可欠である。

国、熊本県、地元市町村の土木関連担当者等へのヒアリングから、環境省の管理計画、国交省のいわゆる「美山河方針」、県及び市町村の景観計画等が存在するものの、阿蘇固有の景観特性に最適化した景観マネジメントルールは存在せず、個別事業での対応が場当たりのこと、特にカルデラ床部分について問題が多いこと等が明らかになった。

国、熊本県、地元市町村が連携し、景観・環境分野の専門家も参加して、文化的サービス(景観)の向上に寄与する土木事業の「理念・原則」と実効性のある景観マネジメントルール(ガイドライン等)を早急に作成することが強く望まれる。それらを共有しつつ社会状況の変化に対応してアップデートするメカニズムを構築・運用していくことも重要である。本研究ではそうした取り組みに関する議論のたたき台となりうる災害復旧デザインガイドライン案を作成した。

阿蘇地域固有の歴史的・文化的資産として無数の石積み構造物が存在するが、これ等の保全・再生には大量の地場産石材が必要となる。これを担保する仕組みとして本研究では「ストーンバンク(石材地域循環の仕組み)」の仕組みを提案した。今日、環境保全の視点から新規石材産出は困難であるが、災害復旧事業や砂防事業等の現場から日々大量の石材が発生しており、これら発生材を一時貯蔵し公共工事等の需要に応じて無償提供する「ストーンバンク」を構築できれば、今後長期にわたり地場産石材の利活用サイクル確立が可能となる。地元自治体、熊本県等で実現可能性について検討されることを期待する。

長期の林業不振の結果、阿蘇地域では未利用すぎ大径木が大量に存在している(阿蘇に限らず全国的な傾向)。本研究では、土木事業でのこれらの有効活用策として木製ガードレールが有望であることを提案した。従来の鉄製品と比較して、単価で同等、地域内経済循環率、環境負荷コストで優れていることが把握できている。実現すれば阿蘇の林業振興とCO2抑制への貢献に寄与しうる。

### 1. 研究開発目的

本サブテーマ「災害による文化的サービスの変容とマネジメント手法」では、以下の二点を主たる目的としている。

イ) 文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成

ロ) 建設工事における自然資源活用手法の提案

まずイ)についてであるが、その背景には、地震や洪水、土砂崩れなど、様々な自然災害が頻発する中であって、発災後に実施される災害復旧事業(所謂公共土木事業)の多くで、「緊急性」、「即応性」が優先され、対象地域固有の生態系サービス、とりわけ文化的サービスの質、例えば景観的・文化的質)に対して十分な配慮がなされないことがあげられる。

阿蘇地区のように豊かな文化的サービスが存在する場においては、災害復旧を生態系サービス・文



化的サービスをむしろ強化する機会として捉え、一般的な災害復旧手法とは異なる、まさに「創造的復興」にふさわしいアプローチを創出することが求められている。

本研究では、阿蘇地区を景観の視点から区分した上で、各区分の特性に合わせて、景観に大きな変容を与えない復旧工事用道路の適正配置の考え方、景観修復に適した崩落斜面復旧工法選定の考え方、復旧時における植生導入において配慮すべき事項等を、体系的かつ個別具体的に研究することにより、阿蘇地区での災害復旧時の環境・景観配慮手法に関するガイドラインを作成する。

次にロ)であるが、日常の様々な建設工事の場においても、全国画一的に実施されている無機的な構築物を中心とした工事手法を無思慮に継続していけば、景観をはじめ阿蘇地区の文化的サービスの質は衰退してしまう恐れが大きい。本研究では、地場産木材や石材等、地元の自然資源、循環資源を暮らしの中で巧みに利用してきた知恵の蓄積から学ぶこと、阿蘇地区が有する自然資源、循環資源の建設工事における活用量と供給可能量を把握すること、そして近年進みつつあるグリーンインフラ関連技術を応用すること等により、法面保護構造物、砂防堰堤、橋梁、ガードレール、転落防止柵等様々な構築物について、土木工学的な要件を満たしつつ、さらに文化的サービスの強化にもつながる工法を開発・提案する。

図3.1に本研究の背景・問題意識と主なアウトカムの関係を示す。

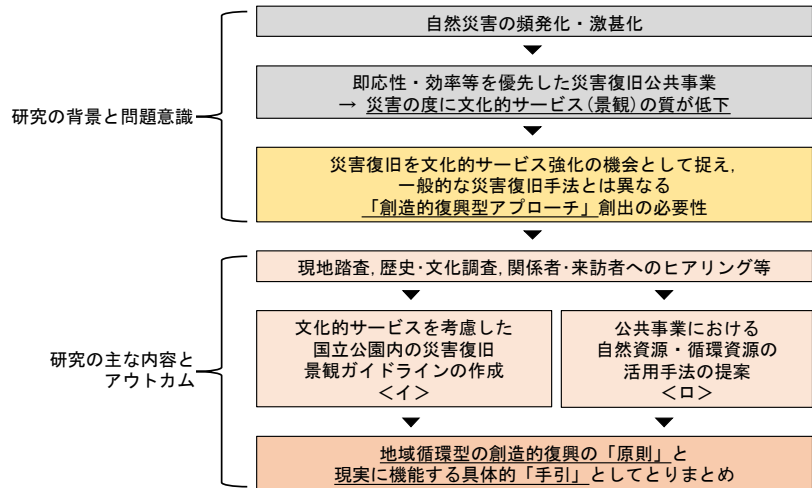


図3.1 本研究の背景・問題意識と主なアウトカムの関係

## 2. 研究目標

- ・文化的サービス、地域の資源循環に配慮した災害復旧・基盤整備手法の開発

阿蘇地域固有の生態系サービス・文化的サービスに特に景観の視点から光を当て、ともするとこれらに負の影響を及ぼしかねない土木的災害復旧の現在の方法論の見直しにつながるガイドラインを構築すること、そして、自然を適切に管理し、自然との関係性を考慮した土地利用を進める上で効果的な、阿蘇地域固有の自然資源を活用した工事手法を提案することを、目標としている。

## 3. 研究開発内容

### (1) 文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成

#### ① 災害復旧事業の現状把握調査

阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域を主対象として、近年の地震災害・豪雨災害後に実施された災害復旧事業の概要を、事業担当部局へのヒアリングや画像資料等の収集・分析等により把握した。

また、工事本体はもちろん工事用道路のレイアウト、植生導入の有無等も含めて、どのような判断でどのような工法が選定されたのかについて、事業主体等関係者へのヒアリング等により把握した。ヒアリング等の対象には、砂防・治山関連事業、防災関連の道路整備事業、調整池を含む河川改修事業等が含まれている。さらに災害復旧事業ではないが立野ダムについても掘削斜面部での工法や発生土砂の処理状況等を工事事務所にヒアリングした。

さらに、国県市町村に対して、既存の景観関連指針やルール等にどのようなものがあり、どのように運用されているかについてヒアリングを実施した。

## ②阿蘇固有の歴史的・文化的景観の特性を知るためのフィールドサーベイ調査

阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域を踏査することにより、河川流域の景観特性、田園集落周辺の景観特性、農地周辺の景観特性、森林周辺の景観特性、市街地周辺の景観特性、道路沿線の景観特性等の把握をおこなった。

また、阿蘇地域の歴史関連資料を収集・精読すること、郷土史家等にヒアリングすることにより、阿蘇固有の歴史的・文化的景観の形成過程について把握に努めた。

## ③砂防、治山分野での景観に配慮した災害復旧関連公共事業の事例調査

砂防、治山分野で国内に存在する景観に配慮した災害復旧関連の公共事業について、事例調査を実施した。砂防、治山に重点を置いたのは、災害復旧事業の中でも景観への影響が大きいことによる。

## ④英国の湖水地方国立公園における災害復旧事業の状況についての調査

過酷な自然環境の中での人々の営みが評価され世界文化遺産に登録されている英国の湖水地方国立公園を対象に、災害復旧時にどのような考え方や手法で公共事業が実施されているかについての調査を実施した。同国立公園の管理運営計画を精査すると主に、管理主体の職員に対するemailでのヒアリングをおこなった。

## ⑤観光客に対する阿蘇の景観に関する印象評価アンケート調査

阿蘇を訪れる観光客を対象に、阿蘇に存在する河川護岸、道路等の法面、砂防・治山構造物等のような印象を持つかを問うアンケート調査を実施した。この調査は、景観や環境の専門家ではない一般の人々の意識を把握することを目的としている。同様の調査を地元居住者に対しても実施を予定していたが、新型コロナ禍のため行えなかった。

## ⑥デザインガイドライン案の作成

上記の①から⑥までの調査結果等を参考にしながら、阿蘇地域の文化的サービスの質を低下させず、むしろ向上させうる災害復旧事業のあり方を河川護岸、道路等の法面、砂防・治山構造物等主な土木構造物について検討し、その結果をガイドライン案として取りまとめた。

## (2) 建設工事における自然資源活用手法の提案

### ①地場産石材の採石状況・活用状況等の調査

地域行政組織及び地域土木建設業者等へのヒアリング等により、阿蘇地域で地場産石材の採石の有無や地場産石材の活用状況、地域外からの石材の使用状況等について調査を行った。また、地域内の各種土木工事で発生するいわゆる残土に含まれる石材の取り扱いについても調査を行った。

### ②阿蘇地域に存在する歴史的石積み構造物の調査

阿蘇地域に多数存在する石垣や石橋等の石積み構造物を対象に、構築された時期、石積み手法の特徴、材料に用いられている石材の地質学的起源や調達方法等について調査を実施した。

### ③阿蘇地域に適した地場産石材の利活用のあり方についての検討

阿蘇地域における文化的サービスの質を高めていく方策の一つとして、貴重な地域循環資源である地場産石材を今後効果的に利活用していくための手法について検討した。また、地場産石材を公共事業に活用することによる地域経済循環率や二酸化炭素排出量抑制への貢献の程度についても検証した。

### ④地場産木材の利用状況調査

現地踏査、地元林業関係者等へのヒアリング等により、阿蘇地域における木材資源量と分布状況、そして木材供給可能量と利用状況等について調査を行った。

### ⑤地場産木材の土木分野における利活用方法についての検討

先進事例調査等を通じて阿蘇地域に存在する木材資源を有効活用する上で、土木分野でどのような手法が考えられるかについての検討をおこなった。

### ⑥阿蘇地域に適した地場産木材の利活用手法の検討

スギ大径木を活用した木製ガードレールについて、材料となる丸太の伐出・加工・販売・施工の各段階でのコストや技術的課題について調査を実施し、実現可能性について検討した。また、地場産木

材を公共事業に活用することによる地域経済循環率や二酸化炭素排出量抑制への貢献の程度についても検証した。

#### ⑦地場産石材及び木材の活用手法の提案

以上を踏まえて、自然資源、循環型資源である地場産石材と木材について土木分野における利活用方法の提案を取りまとめた。

### 4. 結果及び考察

#### (1) 文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成

##### ①災害復旧事業の現状把握調査

災害復旧事業のほとんどで景観や環境分野の専門家によるアドバイス等がほとんど行われておらず、事業主体の判断で事業手法・設計が選択されていること、図3.2に示すように、それらの多くが発災前に存在していた阿蘇らしい風景から大きく変容してしまっており、文化的サービスの質を低下させていることが明らかになった。以下に主な課題を示す。

##### (a) 砂防施設の大型化および修景方法の課題

砂防・治山施設、特に堰堤の建設事業の場合、従来よりも大型の構造物が導入される傾向にあるが、効果に疑問のある堤体への着色（かえって目立ってしまう）がなされている事例、工事用道路を含め緑化によるカモフラージュがほとんどなされていない事例など景観への負の影響が懸念されるものが多い。

##### (b) 河川の石積み護岸のコンクリート化

白川・黒川の護岸、また近年整備が進む黒川調整池においては、土羽や地場産の石積みが一般的であり冬季を除いて緑に覆われていた護岸がほぼ全域にわたってコンクリートブロックに置き換えられており、一部石積みの部分についても地域外から持ち込んだ切り石が使用され阿蘇の景観とは調和していない。

##### (c) 道路法面のコンクリート化

道路脇の斜面崩落部分や切土部分に設けられた擁壁には、法枠工やグラウンドアンカー工の姿が剥き出しのままであるものや、コンクリートブロックを積み上げたものが多数存在している。それらの異質で無機的な表情は、中高木に覆われた土留めや石積み擁壁を主とした阿蘇の風景と調和していない。また、法面緑化工を整備した場合の植生回復までに要する期間の長期化も課題である。

##### (d) 景観コントロールルールの未整備

阿蘇地域は図3.3に示すように、国立公園区域（特別保護地区、特別地域、普通地域）、景観法における景観計画区域、景観農業振興地域整備計画区域に指定されているが、(a)～(c)に示す災害復旧事業の実施時等に、景観に関して実効性のある具体的なルールは定まっていない。また、上記の制度を所管する組織には、環境省、国土交通省、阿蘇市、南阿蘇村、高森町、南小国町、西原村、大津町などの自治体が含まれる。そのため、例えば図3.4に示すような阿蘇地域全体の統一的な景観ルールづくりにおいては、実施を視野に入れた複数団体の連携によるルールづくりの枠組みが重要である。とりわけ、阿蘇地域を対象とする阿蘇くじゅう国立公園の管理運営計画の見直しや、環境省、国土交通省、農林水産省が共同で所管する景観法に基づく景観計画の見直しなどが有効と考えられる。

##### ②阿蘇固有の歴史的・文化的景観の特性を知るためのフィールドサーベイ調査



図3.2 阿蘇らしさに馴染まない復旧による文化的サービス(景観)の質の低下

阿蘇のカルデラおよびカルデラ床地域では、縦断的な地形の変化に対応して牧野、森林、集落、生活道路、農地等の土地利用が古くから分布しているが、それぞれのエリア内に牧野道、集落石垣、神社石垣、石橋、農業利水施設、農地石垣等々、実に多様な歴史的・文化的建造物が多数分布し、阿蘇らしさの形成に重要な役割を担っていることが明らかになった。（写真3.1、3.2）一方、こうした建造物の多くが被災後の復旧工事でコンクリート主体の従前とは大きく異なる姿に変容していることも明らかになった。（図3.2、写真3.3）これについては公共事業にとどまらず民間の部分でも同様であ

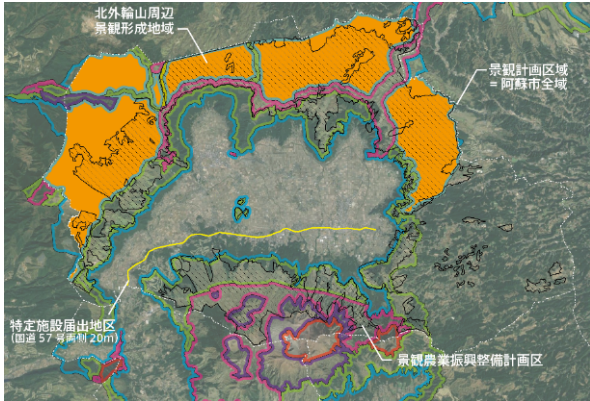
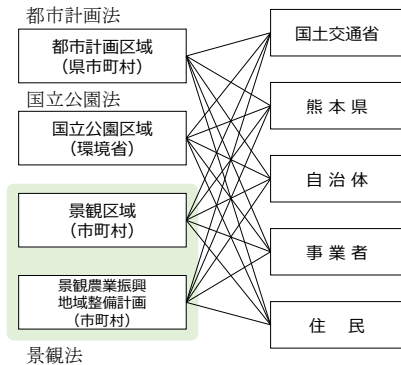


図 3.3 カルデラ床を中心に景観コントロールのルールが未整備



写真 3.1 牧野道

現在



このほか、森林法、砂防法、河川法等に関連する事業において環境や景観への配慮が求められる場合がある



写真 3.2 農業用水路

将来

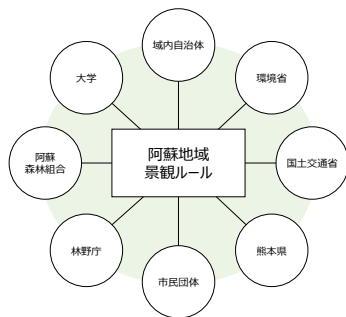


図 3.4 多様な組織の連携による阿蘇地域における景観コントロールルールづくりの枠組み



写真 3.3 周辺護岸や高欄部の地覆をコンクリートで補修補強された石橋

る。

③砂防、治山分野での景観に配慮した災害復旧関連公共事業の事例調査

砂防、治山分野で景観に配慮した先進事例である広島県の紅葉谷川庭園砂防施設、葛川火山砂防施設を調査した結果、地域の石材を巧みに活用し周辺の環境と調和した空間を作り出すことが可能であ

ることが明らかになった。

### (a) 紅葉谷川庭園砂防施設

紅葉谷川庭園砂防施設は、1945年9月の枕崎台風による土石流被害からの復興を目指して、1948年から1950年にかけて工事が行われ、巖島の名勝に相応しい優れた景観の創出のため実施された砂防事業である。(写真3.4、3.5) 事業の特徴を以下に示す<sup>1), 2)</sup>。

- ・工事の計画、設計、施工の特徴を砂防関係者だけでなく、造園の専門家が参加し、「庭園砂防」というコンセプトのもと日本庭園風の砂防施設が計画された。
- ・岩石公園築造趣意書を作成し、以下の五箇条を示し、工事の基本指針とした。
  - 巨石大小の石材は絶対に傷つけず、また、割らない。野面のまま使用する。
  - 樹木は切らない
  - コンクリートの面に触れないように野面石で包む
  - 石材は現地にあるものを使用する
  - 庭師に仕事をしてもらう。所謂、石屋さんものみと金槌は使用しない(写真3.6)
- ・計画絵図により設計コンセプトの共有をはかった。(図3.5)
- ・上流部には巨石の発生を防ぐ砂防堰堤を15基、下流部には土砂の発生を防ぐ水路工を設置し、一体的な施設として機能させ、下流の庭園の砂防空間を作り出している<sup>2)</sup>
- ・また、堰堤の上流部はコンクリート堤防と野面積みの石積みを採用し、管理道からの眺望にも配慮している
- ・流路は複数の段差を設けることで、自然な景観を維持している
- ・溪流に流出した花崗岩の巨石は移動・破壊せず、そのまま利用して土石流を防止している



写真3.4 現在の紅葉谷川庭園砂防施設



写真3.5 竣工当時の川庭園砂防施設<sup>1)</sup>

### (b) 蔦川火山砂防

蔦川火山砂防は、1992年に整備された青森県蔦川上流の砂防施設で、景観に配慮した砂防工事が行われ、紅葉谷川庭園砂防施設にならい「庭園砂防」と呼称されている。以下に工事の特徴を示す<sup>3)</sup>。

- ・現場発生材を使用し、日本庭園の石組み技術を用いて溪流護岸の修景整備が行われた<sup>3)</sup>。
- ・造園家により現場での設計監理が実施された<sup>3)</sup>。

現在の砂防施設と比較し、上記(a)(b)に示した現場発生材を使用した景観に配慮した砂防施設を実現する課題として、写真3.6、3.7に示すような流出した石材を活用した工事を実施できる職人の必要性、また造園と砂防、河川の専門家の連携の必要がある。また砂防事業の多くは、震災後の復旧・復興工事の一環として実施されるため、1～2年という短期間で地権者の確認や施設の計画・設計を行う体制が必要となる。この点で、紅葉谷川砂防施設のように多数の堰堤を建設する場合、計画・設計の前例が少



写真3.6 災害時に流出した巨石をそのまま利用した流路



写真3.7 当時の工事状況。かぐらを使用した巨石の移動<sup>1)</sup>

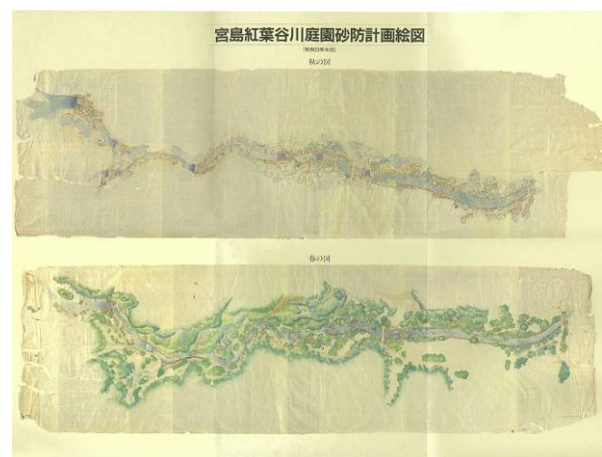


図3.5 庭園砂防のコンセプトを示した計画絵図<sup>1)</sup>

ない場合、現場発生材の使用により施工コストが有利であっても、計画・設計の手間は、大規模で標準的なコンクリートの砂防施設よりもマイナスであると考えられる。そのため、景観ガイドライン等により、現場発生材を使用した砂防施設等の計画、設計方法や施工方法、修景方法がある程度、標準化することや、設計監理やデザインビルド方式など一部の公共事業で行われている事業実施方法等の活用も必要である。

#### ④英国の湖水地方国立公園における災害復旧事業の状況についての調査

湖水地方においても阿蘇同様にほぼ毎年洪水等の自然災害に見舞われているが、災害復旧においては従前の歴史的な姿に戻すことが原則となっていること、それが不可能な場合には事業主体だけでなく専門家と地域市民が参加して復旧のあり方やデザインについて協議し決定していること、そのプロセスにかかる時間をできるだけ短くする（早期に災害復旧を実現する）ためのメカニズムが存在していること等が明らかになった。これらの多くは阿蘇でも考慮すべきものであると考えられる。

#### ⑤観光客に対するアンケート調査

阿蘇に存在する土木構造物の写真パネル（阿蘇に現存する道路脇の土留擁壁、道路脇の農地端部、黒川及び白川の河川護岸、砂防・治山堰堤等のそれぞれについて歴史的な構造物と近年整備されたものの写真を10枚前後混在させたもの）を、阿蘇神社や道の駅等で観光客600人に見ていただき、阿蘇に馴染んでいる写真とそうでない写真を選んでいただくとともに、その理由をコメントしていただいた。図3.6に結果の一例を示す。全ての構造物に共通した傾向として、コンクリートを用いたものは「阿蘇らしくない」と評価され、歴史的な石積みや緑で覆われたものは「阿蘇らしい」と評価されるという結果になった。特に砂防・治山堰堤に関しては「自然環境への悪影響を少なく」、「緑が早く戻るように」、「展望地や道路から見えないように」、「目立たない色に」、「小規模に」等のキーワードが多数を占め、現在の公共土木事業の方向性が観光客の意識とずれていることが明らかになった。

#### ⑥デザインガイドライン案の作成

上記の①から⑥までの調査結果等を参考に阿蘇における公共土木事業のためのデザインガイドライン案を取りまとめた。構造物それぞれについて望ましい設計手法と配慮すべき事項等を提示している。

- ・ 阿蘇固有の美しい自然景観、祖先たちの手で守られてきた田園景観に内在する「作法」を大切にする
- ・ 工作物は出来るだけ目立たないように配慮する
- ・ 石材や木材などの地域循環資源を有効に活用する
- ・ CO2排出を抑制し地球環境に優しい手法を用いる
- ・ 地域経済に貢献する仕組みを盛り込む

デザインガイドライン案は表3.1に示す構成とした。このうち第三部における個別の構造物のガイドライン案は、以下の構成となっている。図3.7に河川護岸を例にした場合のイメージを示す。

- ① 現状と課題についての解説
- ② 個写真等過去の資料を用いた歴史的・文化的景観との関係性についての分析
- ③ 地域循環資源の概念の反映の可能性
- ④ 観光客の視点への対応

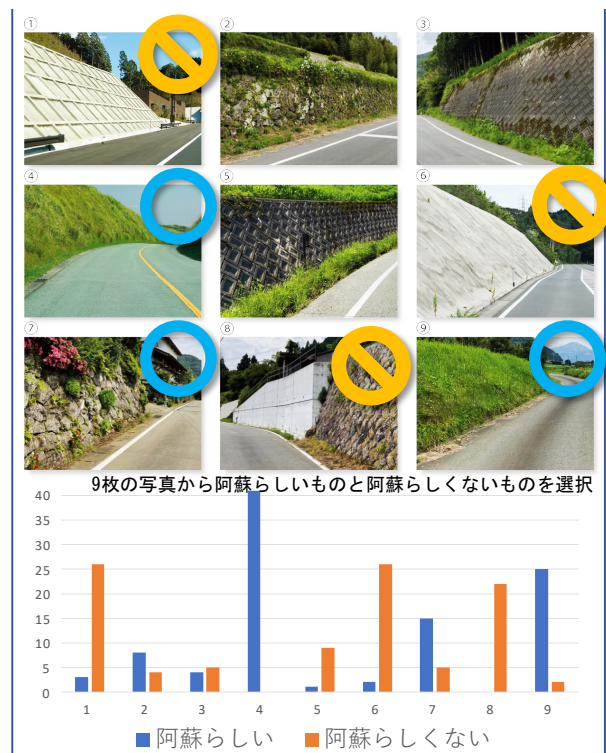


図3.6 観光客アンケート結果（道路法面について）石や緑については高評価で、コンクリートについて低評価であった。

- ⑤ 優れた先進事例の考え方・手法等の応用の可能性
- ⑥ 今後の望ましい設計手法等のあり方の提案

**(2) 建設工事における自然資源活用手法の提案**

**①地場産石材の採石状況・活用状況等の調査**

阿蘇地域は自然公園法により新規の採石が禁止されていること、以前は数カ所の採石場が存在していたが現在はほぼ全て閉鎖されていることが明らかになった。

公共事業で石積みを採用するケース自体が極めて少ないが、採用する場合も地域外から搬入した石材を使用することが多く、地場産の石材を用いるケースは極めて限定的であることが明らかになった。

近年実施された道路拡幅に伴う寺社の石垣の移設事例が一例認められたが、歴史的石積みの作法が必ずしも尊重されていないなど問題があることが明らかになった。

砂防・治山事業をはじめとして多くの公共事業で大量の石（野面石）が掘り出されていることが明らかになった。それらの一部は建設事業者が個々に確保している残土処分場に貯留されており、中には分別した上で空積みの石垣の材料として使用され、その中に土砂が貯留されている事例もある。

**②阿蘇地域に存在する歴史的石積み構造物の調査**

阿蘇固有の石積みは重要な歴史的・文化的資産、風景構成要素であることが明らかになった。

(1) ②の阿蘇地域のフィールド調査の結果、石積みの形式として石工集団の存在など一定の特徴を示す形式などは見られなかったが、用途によって以下 (a) ~ (b) に示す特徴が見られた。

**(a) 集落石積み**

カルデラ床に多数存在する集落には、住宅の石垣等様々な空積みの石積み構造が夥しい数で存在し、この地域の歴史的・文化的景観の必要な構成要素となっている。それらの多くはいわゆる野面石の比較的小ぶりなものが用いられており、を農地開墾で出てきたものや水無川等集落近くで採取したものと推察される。いくつかの集落で実施したヒアリング調査では、集落内で石積み作業をする際に、専門とする職人はいなかったが、地域の中で特に積み方が上手い住民が指導役となり中心となって作業を実施していたことが明らかになった。そのため、積み方には集落ごとの特徴がみられる可能

表 3.1 景観ガイドライン案の構成

<p>第一部：阿蘇国立公園における景観設計の基本的な考え方</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 阿蘇の景観保全にまつわる歴史</li> <li>2. 地域にとって「風景」を良くすることの価値と必要性</li> <li>3. 現行の土木構造物が阿蘇にもたらしている課題</li> <li>4. 地域循環共生圏の考え方を取り入れた土木構造物のあり方</li> </ol> <p>第二部：エリア別の景観特性と課題</p> <p>第三部：工種別の景観設計上の課題と方針</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 牧野系 牧野道・牧柵</li> <li>2. 治山系 斜面崩壊防止工・谷止工（治山ダム）・山腹工</li> <li>3. 河川系 護岸工、護床工・砂防工、工事用道路・遊水池・橋梁</li> <li>4. 道路および道路付属物 道路法面工・標識、案内板・落石防護工</li> <li>5. 農地系（農地復旧、水路復旧） 農地法面・水路工</li> <li>6. 集落系 宅地造成、宅地復旧</li> </ol> <p>第四部：阿蘇の風景を守っていくために（提言）</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 官民一体の合意の必要性</li> <li>2. 国立公園総合型協議会とビジョンの働き</li> <li>3. 関係する計画のアップデートについて</li> </ol>
---

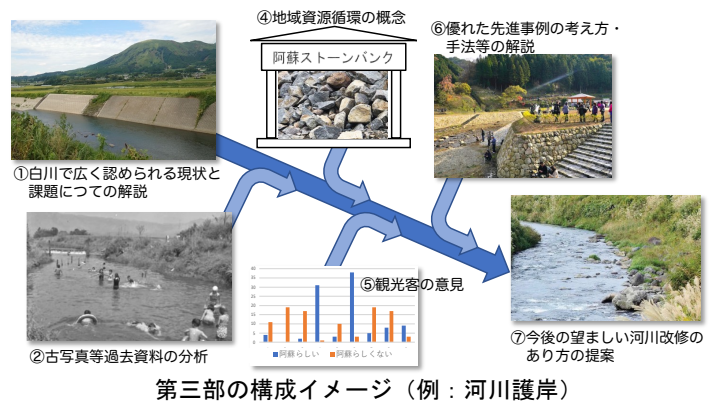


図 3.7 景観ガイドラインの構成イメージ（例：河川護岸）

性が高い。また一方で、石積みのノウハウが少数の住人の技術力に依存するため、技術が失われやすく、石積みの形の変化も起こりやすいと考えられる。(写真3.8、3.9)

#### (b) 寺社の石積み

寺社の古い石垣には阿蘇カルデラ内ではほぼ産出されない要溶結凝灰岩切り石を用いた精緻な石積みがいわれているのが一般的である。寺社のように公共性があり格の高い場所では、わざわざ質の高い石を遠方から取り寄せたと推察される。

大分へ抜ける旧街道沿いに存在する天神橋も同様の理由から溶結凝灰岩が用いられていると推察される。この橋の場合、伝承により通潤橋の築造で知られる種山石工の棟梁が推察される。(写真3.10) 熊本周辺の歴史的石積み文化との往来が阿蘇に存在していたことの証と言える。

#### (c) 河川石積み

今回の調査で黒川沿いには古い石積み構造の護岸は確認できなかったが、古写真からは昭和の時代までは石積み護岸が存在していたことを確認できた。

現在黒川沿いに存在する石材を用いた護岸は全て最近作られたものである。積み方や形態等まちまちであり、歴史的な石積みとの関連性を認められるものはなかった。

白川流域では、いわゆる間知石を谷積みの谷積みにした護岸が多数確認できた(小河川等が合流する隅角部では練積みあり)。地域住民の方々へのヒアリングでは、昭和28年の水害後に築造されたものが中心ではないかとのことであった。使用されている石材については阿蘇地域で加工・生産されたものではなく外部からの搬入物と推察される。これらについて河川管理者の熊本県では資料が残されていないことも確認した。

それ以前から存在すると考えられる石積み護岸は確認できなかったが、黒川同様に古写真からは昭和の時代までは石積み護岸が存在していたことを確認できた。

#### (d) その他の石積み

上記の他にも、農地法面や道路法面、砂防施設等様々な構造物で空石や半練積みの石積み構造物を確認することができ、阿蘇地域においては現地で採取できる火山起源の石材が重要な建設材料として広く用いられてきたことが読み取れる。(写真3.11)

写真3.12に示すように、石積み構造の多くがコンクリートブロック構造等に置き換えられていることも、本調査で確認できた。これは阿蘇地域の歴史的・文化的景観が損なわれていることを意味しており早急な対応が必要であるが、地場産石材の安定的な確保、歴史的石積み技術の継承等課題は大きい。



写真 3.8 集落内の既存の野面石積み



写真 3.9 集落内の既存の野面石積み(写真右)と練り積み(写真左)で修復された例



写真 3.10 寺社の凝灰岩の石積み



写真 3.11 現場発生材を利用した砂防堰堤



写真 3.12 コンクリートブロックに置き換えられた道路沿いの擁壁



③阿蘇地域に適した地場産石材の利活用のあり方についての検討

採石場がないことから当初地場産石材の確保は困難であると考えていたが、砂防・治山事業等で大量の石材が掘り出されている現状が判明したことで、それらを処分するのではなく阿蘇地域内で有効に活用するための手法を検討した。

災害や公共事業で発生する地元の石材は貴重な地域資源であり、地域内循環の理念にも合致する。その結果、阿蘇地域の公的な仕組みとして、現場発生石材を建設事業者から引き受け一時貯留し、石積みを含む事業が発生する都度そこから無償で支給するメカニズム（「ストーンバンク」と呼ぶことにする）が有効であるとの結論に至った。（図3.8）また、地場産石材を公共事業に活用した場合に、コンクリートを用いた場合と比較して、地域経済循環率と二酸化炭素排出量抑制への貢献の両者で大きなメリットが期待できることを確認できた。



図 3.8 阿蘇ストーンバンクによる地元石材の地域資源化のイメージ

表 3.2 コンクリート工と石積み工の直接工事費、環境コスト、地域内循環率の比較（黒川のコンクリート護岸 24 万 m<sup>2</sup> を石積み工に置き換えた場合）

項目	コンクリート利用工法	石材使用工法
直接工事費[千円]	480	624
環境コスト[千円]	36.41	23.74
地域内経済循環額[千円]	152.16	413.35

表 3.3 石積み工とコンクリートブロック工の直接工事費および工期の比較

	石積み護岸（練積み）	コンクリート護岸
		平野ブロック(株)HPより
単価	約 26000 円/m <sup>2</sup> *1 (直接施工費)	約 20000 円/m <sup>2</sup> *2 (直接施工費)
日当たり作業量	19 m <sup>2</sup> /日*3 (積工のみの作業量*4)	41 m <sup>2</sup> /日 (積工のみの作業量*4)

※1 石材の採取費用も含む  
 ※2 材料費も含まれた値  
 ※3 この値は最大値であり、積み方の難しい部分や上部になってくるとより、値は小さくなり10~12 m<sup>2</sup>/日ほどになる  
 ※4 裏込めのコンクリートを入れるので、それが固まるまで待たないといけない時間があるので実際はもう少し値が小さい

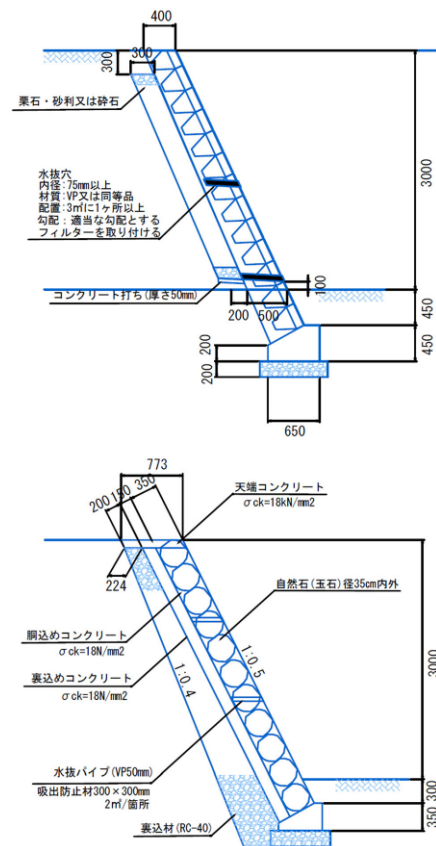


図 3.9 比較に用いたコンクリートブロック工（上部）と石積み工（下部）の断面

(a) ストーンバンクの仕組み

ストーンバンクは、地域内で行われる災害復旧事業や石積み構造物を解体した際に発生した石材をストックしておき、新たな公共事業等に材料として供給する取り組みである。国内では一部の河川事業等で取り組まれている例がある。また、北海道では建設副産物の活用例として土砂バンクの取り組みが実施されている。

表3.4 コンクリート工の直接工事費の内訳

区分	構成比	名称・規格	単位	単価(円)	積算	合計
K	8.02					
K1	8.02	バックの賃料(長期割引) 排対1.2クレーン 山0.8m3 平0.6m3 2.9t吊	日	11300		
R	46.7					
R1	13.7	運転手(特殊)	人	20400		
R2	11.56	ブロッコ工	人	23100		
R3	9.41	普通作業員	人	17700		
R4	6.44	土木一般世話役	人	22100		
Z	45.28					
Z1	39.29	コンクリート積みブロック滑面 250×400×350mm	m <sup>2</sup>	6000		
Z2	5.99	軽油トラック給油 小型ローリー	リットル	121		
材料費		コンクリート積みブロック 400×300×350mm	m <sup>2</sup>		4600	19260
					円/m <sup>2</sup>	円/m <sup>2</sup>

表3.5 石積み工の直接工事費の内訳

区分	構成比	名称・規格	単位	単価(円)	積算	合計
K	5.68					
K1	5.68	バックの賃料(長期割引) 排対1.2クレーン 山0.28 平0.2m3 1.7t吊	日	6240		
R	65.99					
R1	33.97	普通作業員	人	17700		
R2	16.76	運転手(特殊)	人	20400		
R3	8.43	石工	人	24600		
R4	4.22	特殊作業員	人	20200		
Z	28.33					
Z1	23.34	プレキャストコンクリート(高炉)18-8-25(20) B種	m <sup>2</sup>	14800		
Z2	2.81	再生道路用砕石再生クワッシュン 40-0mm	m <sup>2</sup>	2000		
Z3	2.18	軽油トラック給油 小型ローリー	リットル	121		
現場材採取費			m <sup>2</sup>	4210	4210	26000
					円/m <sup>2</sup>	円/m <sup>2</sup>

表3.6 コンクリートブロック製造工場および阿蘇市内の生コンクリート製造工場から阿蘇駅までの距離

コンクリートブロック製造	阿蘇駅からの距離(km)	生コンクリート工場	阿蘇駅からの距離(km)
A	66.5	G	4.4
B	39.6	H	7.3
C	36.1	I	8.7
D	33.9	平均	7
E	42.2		
F	53.9		
平均	45		

ストーンバンクは、地域内で発生した石材を一定期間ストックするためのヤードが必要であるが、遊休農地や耕作放棄地などの活用により、地域内に複数のストーンバンクを設置することで石材運搬費や産業廃棄物の処分費などのコスト削減や、材料のカーボンフットプリントを示すことでCO<sub>2</sub>排出抑制に寄与する。

表3.7 地域内循環率の試算結果※1、※2

工程	コンクリート利用工法[円/m <sup>2</sup> ]	石材使用工法[円/m <sup>2</sup> ]
材料コスト	4580	0
うち地域内循環額	0	0
施工コスト	14660	26000
うち地域内循環額	6340	17223
CO <sub>2</sub> 環境コスト	891	989
うち地域内循環額	0	0
合計	20131	26989
うち地域内循環額合計	6340	17223
地域内循環率※3	0.31	0.64

※1 コンクリート利用工法は施工コストのうち労務費(人件費)のみを地域内循環額として設定

※2 石材使用工法は施工コストのうち労務費(人件費)と現場材採取費を地域内循環額として設定

※3 地域内循環率=地域内循環額/合計額

表3.8 コンクリートブロック積み1m<sup>2</sup>あたりの環境コスト試算結果

過程	材料および工法	数量	CO <sub>2</sub> 排出原単位	CO <sub>2</sub> 排出量 [kg-CO <sub>2</sub> ]
製造	生コンクリート (潤込め・裏込め)	0.392 m <sup>3</sup>	0.262 [t-CO <sub>2</sub> /t]	236.219
	間知ブロック (300×400×350 mm)	8.33 個	0.159 [t-CO <sub>2</sub> /t]	58.276
計				294.495
輸送	10tトラック 現場から45km(軽油)	366.5 kg	2.644 [kg-CO <sub>2</sub> /L]	1.454
	10tミキサー車 現場から7km(軽油)	901.6kg	2.644 [kg-CO <sub>2</sub> /L]	0.556
計				2.010
機械稼働	バックホウ稼働 (軽油 108L/日)	2.63L	2.644 [kg-CO <sub>2</sub> /L]	6.965
合計	CO <sub>2</sub> 排出量			303.47
	環境負荷コスト(5000円/t-CO <sub>2</sub> )			1517円

表3.9 現場発生材使用した場合の石積み1m<sup>2</sup>あたりの環境コスト試算結果

過程	材料および工法	数量	CO <sub>2</sub> 排出原単位	CO <sub>2</sub> 排出量 [kg-CO <sub>2</sub> ]
製造	生コンクリート (潤込め・裏込め)	0.316 m <sup>3</sup>	0.262 [t-CO <sub>2</sub> /t]	190.325
輸送	10tミキサー車 現場から7km(軽油)	726.8kg	2.644 [kg-CO <sub>2</sub> /L]	0.448
機械稼働	バックホウ稼働	2.63L	2.644 [kg-CO <sub>2</sub> /L]	6.965
合計	CO <sub>2</sub> 排出量			197.738
	環境負荷コスト(5000円/t-CO <sub>2</sub> )			989円

## (b) 石材活用による地域循環率と二酸化炭素排出量の試算

(2) ②で示したように、阿蘇地域にはさまざまな形態の石積みが使用されている。ここでは、公共事業を対象として、阿蘇地域を流れる黒川護岸を石積みに護岸にした場合の地域循環率と二酸化炭素排出量の試算を行った。試算方法は参考文献4)を参考とした。

黒川流域の護岸の形態を現地調査した結果、兩岸総延長28,679mに対して、コンクリート護岸の延長が26,289m (91.7%)、石積み護岸が4,850m (16.9%)であった。面積で換算すると、黒川のコンクリート護岸は約24万 $m^2$ となる。また、護岸の構造を図3.9に示す断面とし、現地の石積み護岸に使用されている石材の面積から1 $m^2$ 当たりの石の体積を推定すると0.23 $m^3$ となる(1 $m^2$ あたり10.4個、1個あたりの体積0.022 $m^3$ と仮定)。これを石積み護岸に変更する場合に必要な石材量は57万 $m^3$ となる。

黒川のコンクリート護岸は約24万 $m^2$ をコンクリート護岸から石積み護岸に変更した場合の直接工事費、環境コスト、地域内循環率を比較すると、表3.2に示すように、直接工事費は石積みの方が1.3倍高くなるが、地域内循環額は石積みの方が高く地域内経済にプラスになると考えられる。また、環境コストは石積みが低く、環境面でも有利である。試算の内訳は表3.3～3.9に示す。

### ④地場産木材の利用状況調査

熊本県の森林簿を元に、阿蘇市・南阿蘇村・高森町の3市町村を対象とし、森林所有者・樹種・スギの樹齢別分布図をGIS上で作成した(図3.10)。その結果、3市町村のスギ森林面積は18,072ha、蓄積は903万 $m^3$ であり、そのうち樹齢60年を超えるのはそれぞれ7,020ha (38.8%)、387.8万 $m^3$ であった(図3.11)。これをみると阿蘇でも戦後の拡大造林が実施され大量のスギ・ヒノキ林が造成されたこと、それらの多くが未利用のまま放置され大径木と呼ばれる巨木となっていることが明らかになった(写真3.13)。また阿蘇森林組合へのヒアリングから、これら大径木は既存の受託用木材市場では価値が低く利活用の目処が立っていないこと等が明らかになった。

次に阿蘇地域に存在する大径木の資源量を調査するために、木製GRのビーム材150×300×2000mmを1本製材できる最小寸法の丸太を末口36cm長さ2m以上とし、この丸太を1番玉として伐出できる大径木を樹齢60年以上、樹高30m以上、胸高直径45cm以上と仮定した。この仮定に基づき資源量を求めたところ木製GR7,996km分に相当し、これは阿蘇管内の主要観光道路に設置されている鋼製防護柵の総延長157.4kmの50.8倍であり、阿蘇地域には木製GRを設置し持続的に取替工事を行うことができる十分な資源量が存在することが明らかになった。木製GRはビーム材1本あたり81.3kgの二酸化炭素を固定しており、阿蘇管内の鋼製防護柵を全て木製GRに取り替えた場合に固定される二酸化炭素は5,934tonである。木製GRは燃焼しない限り炭素の

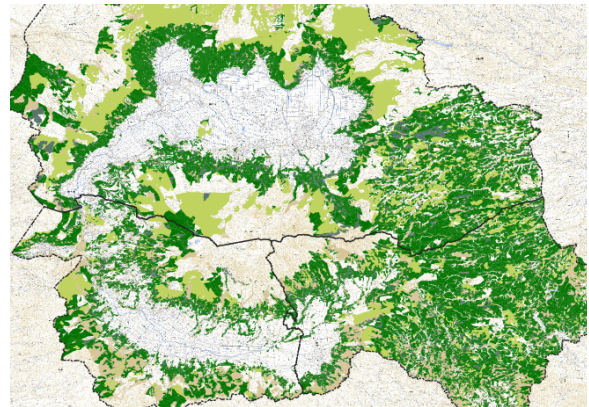


図3.10 スギ・ヒノキ林の分布

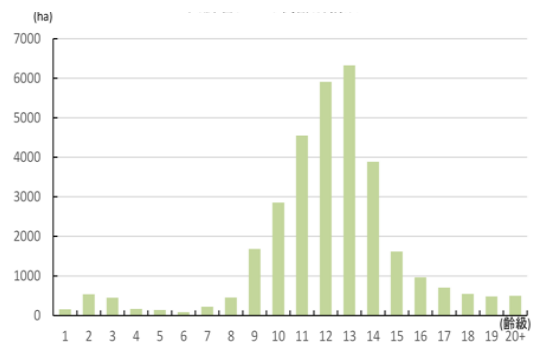


図3.11 阿蘇管内のスギ樹齢別構成(出典:熊本県森林整備課:樹齢別林種樹種別森林資源構成表) ※樹齢は林齢を5年単位でまとめた単位で樹齢1～5年生を「1樹齢」、樹齢60～65年生が「13樹齢」となる



写真3.13 阿蘇森林組合の管理するスギの大径木

貯金箱としての役割を果たし、大径木を伐出した跡地に植林を行うことで新たに二酸化炭素を吸収することができる。そこで育った木を再び木製ガードレールの材料として使用することで持続的な森林資源の循環、地球温暖化の抑制にも貢献できる。

#### ⑤地場産木材の土木分野における利活用方法についての検討

スギ大径木の活用には建築市場以外での使用を検討する必要があるが、土木分野・農林分野の先行研究等をあっても阿蘇地域で実現性の高い新規の活用方法は認められなかった。そこで従来から存在するものの価格競争力、腐朽耐久性等で課題があり、ほとんど普及していない木製ガードレールに着目することにした。

現在、国性能照査試験に合格したB種およびC種の木製ガードレールは16種類あるが、これらは主に間伐材等の中径木の利用を想定した設計となる。一方、アメリカでは大径木を利用したガードレールが普及しており、既存のガードレールで用いられる鉄製支柱の利用と木製ビーム形状の検討により、大径木を活用したガードレールの設計は可能と考えられる。

#### ⑥阿蘇地域に適した地場産木材の利活用手法の検討

スギ大径木を活用した木製ガードレールについて、材料となる丸太の伐出・加工・販売・施工の各段階でのコストや技術的課題について調査を実施し、実現可能性について検討した。

その結果、森林所有者の協力を得ること、現状の伐出・製作フローを効率化すること、耐久性の高い防腐処理を施すこと、製品を安定的に阿蘇地域の公共事業用材料で採用していくこと等の条件をクリアできれば、事業性が十分あることを確認できた。

また、地場産スギ材を公共事業に活用した場合に、従来の鉄製ガードレールを用いた場合と比較して、地域経済循環率と二酸化炭素排出量抑制への貢献の両方で大きなメリットが期待できることを確認できた。

#### (a)大径木を使用した木製ガードレールの製作コストの試算

阿蘇市・南阿蘇村・高森町の3市町村を対象とし、熊本県が整備する森林簿をもとに森林所有者・樹種・スギの樹齢別分布図をGIS上で作成した。その結果、3市町村のスギ森林面積は18,072ha、蓄積は903万 $m^3$ であり、そのうち樹齢60年を超えるものはそれぞれ7,020ha(38.8%)、387.8万 $m^3$ であった。次に阿蘇地域に存在する大径木の資源量を調査するために、木製GRのビーム材150×300×2000mmを1本製材できる最小寸法の丸太を末口36cm長さ2m以上とし、この丸太を1番玉として伐出できる大径木を樹齢60年以上、樹高30m以上、胸高直径45cm以上と仮定した。この仮定に基づき資源量を求めたところ木製GR7,996km分に相当し、これは阿蘇管内の主要観光道路に設置されている鋼製防護柵の総延長157.4kmの50.8倍であり、阿蘇地域には木製GRを設置し持続的に取替工事を行うことができる十分な資源量が存在することが明らかになった。木製GRはビーム材1本あたり81.3kgの二酸化炭素を固定しており、阿蘇管内の鋼製防護柵を全て木製GRに取り替えた場合に固定される二酸化炭素は5,934tonである。木製GRは燃焼しない限り炭素の貯金箱としての役割を果たし、大径木を伐出した跡地に植林を行うことで新たに二酸化炭素を吸収することができる。そこで育った木を再び木製ガードレールの材料として使用することで持続的な森林資源の循環、地球温暖化の抑制にも貢献できる。

地域循環共生圏の構築のためには阿蘇地域で伐出された大径木を阿蘇地域内で製材・加工し製品化することが必要である。そこで大径木を利用した木製GRを製作した場合の流通経路および製作コストを明らかにするため阿蘇森林組合久木野加工場に木製GRの試作品作成を依頼した。

試作品作成により現状の流通では、阿蘇森林組合が木製GRを販売する場合に市場競争となり価格が不安定となる、阿蘇森林組合蘇陽加工所で製材できるサイズを超えているため慣例として木材団地が介入しコストが上昇する、市場で原木価格が決められるため阿蘇産以外の木材が使用される可能性があるなどの課題が存在し、スギの地域循環が成立していないことが判明した。

次にスギの地域循環が実現した場合の木製GRの流通経路を想定した(図3.12)。ここでは阿蘇森林組合が主体となり原木の販売から加工・販売までを担うと想定し、また行政が長期間安定価格で買い取ることを想定している。

これらの想定から図3.12では、現在組合が木製GR製作で得ている利益以上に上乗せしたとしても木

製GR1本17,477円で製作でき、これは鉄製GRの1本あたりの市場価格15,600円A)と比較しても十分な市場競争力を有していると考えられる。

これにより阿蘇森林組合は安定的な収益が見込め経営改善につながり、森林組合職員の待遇が改善され、若い人材の地域外流出を防ぐことが期待できる。また大径木を安定的に伐出・販売することが可能になることで、林業経営の継続も可能になると考えられる。

**(b) 木材活用による地域循環率と二酸化炭素排出量の試算**

阿蘇国立公園区域内の主要な道路の鋼製防護柵を木製防護柵に交換した場合の地域循環率とCO<sub>2</sub>排出量の試算を行った。試算方法は石材と同様に参考文献4)を参考とした。阿蘇国立公園区域内の主要な国道および県道を対象に、防護柵設置延長を調査した結果、鋼製防護柵が63,461m

(40%)を占め、次にガードパイプは57,321m(36%)、ガードケーブルが36,650m(23%)であった。木製防護柵は618m(1%)であり、ほとんど普及していないことが明らかになった。

対象道路に設置されているすべての鋼製防護柵を、大径の木製ビームに変更した場合、7084.44m<sup>3</sup>の木材消費量が見込める。これは平成30年度の阿蘇森林組合の年間加工一般資材取扱量の5.93倍であり、およそ3億8千万円の利益に相当する。阿蘇森林組合の年間収益の23.9%である。阿蘇森林組合の利益が増加することで、連鎖的に地域の関連企業の利益が増加し、地域内経済循環を生む。なお、同じ長さのガードレールを設置した場合の総事業費における地域内経済循環率を試算すると、木製ガードレールの場合がほぼ100%であるのに対して鉄製ガードレール0の場合には11%となる。

次に、CO<sub>2</sub>の循環について木製防護柵7084.44m<sup>3</sup>に固定化されるCO<sub>2</sub>量は4,082tonである。このCO<sub>2</sub>は木製防護柵が燃焼しない限り大気に放出されることはない。防護柵としての耐用年数が経過し、解体した木材を焼却した場合エネルギーとしての利用が可能になり、さらに燃焼の際に発生したCO<sub>2</sub>は人工林の育成を継続的に行うことで森林に吸収される。そして育成された森林から採取された木材を用いてまた新たに製造された木製防護柵を施工する。上記のようなCO<sub>2</sub>と木材資源の循環を構築することが可能となる<sup>6)</sup>。国道57号線において年間1.3kmの防護柵取替え工事を行う場合、全防護柵を交換するには18.69年かかるため、約20年スパンで交換サイクルを繰り返すことが理想的である。

次に、鋼製防護柵と木製防護柵について、



写真 3.14 スギ大径木を使用した木製ガードレールのイメージ (ガードレール部分はCG)

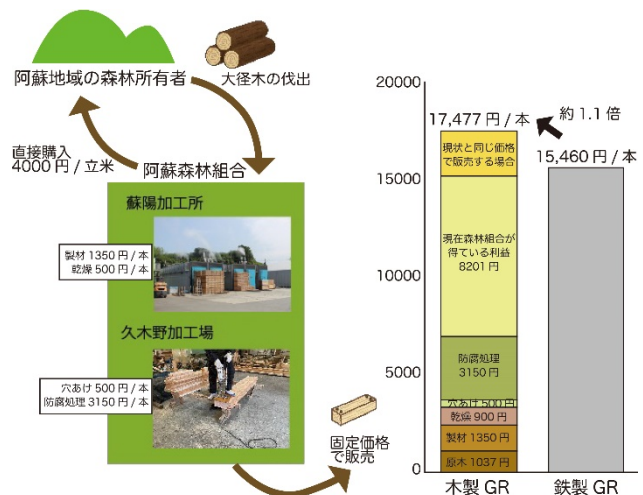


図 3.12 スギの地域循環が実現した場合の木製ガードレールの製作過程と鋼製ガードレールとのコストの比較

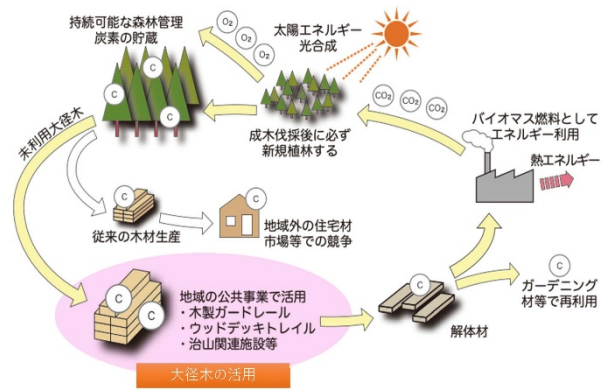


図 3.13 スギ大径木の地域循環資源化イメージ

製造から設置までの工程を考慮した環境負荷コストを比較する。年間の工事量を1.3kmと仮定した場合、鋼製防護柵の環境負荷コスト26.0万円に対し、木製防護柵の場合13.1万円と50%削減される。木製防護柵の設置コストは一般的に鋼製防護柵より2~3倍ほど高額であるが、(a)の試算のとおり、防護柵の形状や製作過程を工夫することで、十分に利益を確保したうえで鋼製防護柵と同程度までコストを削減することも可能である。さらに環境負荷コストの削減や、地域内資材循環による製造運搬コストの削減、木製防護柵を採用することにより道路景観が向上し、観光収入の増加が見込めること等を考慮すると、木製防護柵設置の最大の課題である初期費用や維持管理の費用面の問題は解消される可能性が高い。

#### ⑦ 地場産石材及び木材の活用手法の提案

以上を踏まえて、自然資源、循環型資源である地場産石材と木材について土木分野における利活用方法の提案を取りまとめた。(図3.13)

### 5. 研究目標の達成状況

本研究では、文化的サービス、地域の資源循環に配慮した災害復旧・基盤整備手法の開発を目標とし、阿蘇地域固有の生態系サービス・文化的サービスに特に景観の視点から光を当て、ともするとこれらに負の影響を及ぼしかねない土木的災害復旧の現在の方法論の見直しにつながるガイドラインを構築し、自然を適切に管理し、自然との関係性を考慮した土地利用を進める上で効果的な、阿蘇地域固有の自然資源を活用手法の提案を行い、目標を達成した。詳細を以下に示す。

まず、文化的サービスを考慮した国立公園内の災害復旧ガイドラインの作成については、阿蘇地域の歴史的・文化的景観特性の評価、地域循環型社会への適応性についての考察、来訪者の視点からの現状の景観に対する評価結果の検証等を総合的に用いて、災害復旧に関連する主な社会基盤（擁壁工、砂防工等）について、阿蘇地域における文化的サービスの質を維持・向上させることを意図した景観設計のガイドライン案を作成することができた。

しかし新型コロナ禍の影響で、国県市町村の関係部局との間での本ガイドライン案についてのコンセンサスの形成までには至っていない。今後機会を設けて合意形成の場を持ち、同案の一部修正も含めて議論を積み重ね、実現性・実効性のあるものに収斂させ運用していく必要がある。

次に、建設工事における自然資源活用手法の提案については、阿蘇地域の歴史的・文化的景観の主たる構成要素に阿蘇火山活動由来の地場産石材を用いた石積み構造物があり、その保全・再生は阿蘇地域の文化的サービスの質を維持し向上させていく上で大変に重要であることを示すとともに、「ストーンバンク」の仕組みを導入し地域内の様々な公共事業で発生する石材を地域循環資源として活用することを提案できた。

また本提案の他のメリットとして、コンクリート等を主材料とした従来の手法と比較して石材の活用が地域経済循環率やCO<sub>2</sub>排出量等の面で有利であることも示すことができた。

今後、ストーンバンクの運用を試行的に開始するべく国県市町村に働きかけていきたい。

阿蘇地域で未活用のままストックされている膨大なスギ大径木について、貴重な地域循環資源として有効活用する上で土木公共事業分野での新たな発想がブレークスルーとなりうることを示し、その一つとして木製ガードレールの採用を提案することができた。

阿蘇地域におけるスギ大径木ストック量の概算、地場産木材の流通・加工実態の調査、木製ガードレール生産コストの試算等を実施することにより、阿蘇地域における木製ガードレールの生産及び実装の実現性は高いことを確認できた。

阿蘇地域におけるスギ大径木ストック量の概算、地場産木材の流通・加工実態の調査、木製ガードレール生産コストの試算等を実施することにより、阿蘇地域における木製ガードレールの生産及び実装の実現性は高いことを確認できた。今後、地元森林組合等の協力を得て試作品の製作、実装による社会実験等に取り組んでいきたい。

## 6. 引用文献

- 1) 広島県土木建築部砂防課：日本三景宮島紅葉谷川の庭園砂防抄，1988.
- 2) 戦後の混乱期に生まれた美しい砂防「紅葉谷川庭園砂防」，consultant，281号，pp. 43-45.
- 3) 麻生恵：景観・施設整備の新しい方向と造園技術，ランドスケープ研究，62巻，2号，pp. 106-108，1998.
- 4) 内村圭佑：公共土木工事における木材の利用，2013.
- 5) 積算資料別冊，2021年9月号.
- 6) 阿蘇郡森林組合：木材資材木材活用ガイドブック，2002.

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

###### 【サブテーマ1】

- 1) S. MANAGI, and G. HALKOS: Journal of Forest Economics, 35 (2) Natural Capital and Ecosystem Service: Sustainable Forest Management and Climate Change, 2020.
- 2) I. A. JUMBRI, and S. MANAGI: Global Sustainability, 3, E5 Inclusive Wealth with Total Factor Productivity: Global Sustainability Measurement, 2020.
- 3) 平岡和真, 寺村淳, 田浦扶充子, 大津耕太, 島谷幸宏: 熊本地震発生後の自然資源を活用したレジリエンスの向上に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 77 (2), I\_84-I\_90, 2021.
- 4) Arachchi, J. I., & Managi, S. Preferences for energy sustainability: Different effects of gender on knowledge and importance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110767. (IF: 14.982) ,2021.
- 5) Halkos, G., S. Managi, and K. Tsilika. "Ranking Countries and Geographical Regions in the International Green Bond Transfer Network: A Computational Weighted Network Approach", Computational Economics. (IF: 1.876) ,2021.
- 6) Kurniawan, R., Y. Sugiawan, and S. Managi. "Economic growth - environment nexus: An analysis based on natural capital in inclusive wealth", Ecological Indicators 120: 106982. (IF: 4.958) ,2021.
- 7) Tolliver, C., H. Fujii, A. R. Keeley, and S. Managi. "Green Innovation and Finance in Asia", Asian Economic Policy Review 16 (1): 67-87. (IF: 1.455) ,2021.
- 8) Tsurumi, T., R. Yamaguchi, K. Kagohashi, and S. Managi. "Are cognitive, affective, and eudaimonic dimensions of subjective well-being differently related to consumption? Evidence from Japan", Journal of Happiness Studies. (IF: 3.852) ,2021.
- 9) 岸上 祐子, 馬奈木 俊介: サーキュラーエコノミーからの新国富の上昇: 人工資本・人的資本・自然資本, 化学工学, 第86巻第2号: 2-5, 2022.

###### 【サブテーマ2】

- 1) 山下大佑、皆川朋子、浅田寛喜: 阿蘇黒川流域を対象とした土地利用の変遷に伴う浸水リスクの変化に関する研究、土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 75、No. 2、 I\_61-I\_616, 2019.

##### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

##### <その他誌上発表 (査読なし) >

###### 【サブテーマ2】

- 1) 皆川朋子, 山中綾乃  
白川水系黒川における遊水地整備と生物相及び生物多様性保全のための維持管理について  
RIVER FRONT Vol. 94.

#### (2) 口頭発表 (学会等)

###### 【サブテーマ1】

- 1) 寺村淳: 近世から近代前期にかけての阿蘇南郷谷に見る湧水と農業利水の関係, 土木学会土木史研究発表会, 2020.
- 2) 寺村 淳・田浦 扶充子・島谷 幸宏: 阿蘇地域における水資源としての草原と山, 第62回土木計



画学研究発表会, 2020.

- 3) S. MANAGI, Invited Speech, “Measuring sustainable progress: global outlook”, The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (Progress, Challenges, and Opportunities for Sustainability Science: A Workshop: Panel I: Measuring Progress Toward Sustainable Development), November 30–December 2, Washington DC, 2020.
- 4) S. MANAGI, Keynote Speech, “Measuring sustainable progress for SDGs: Case for Indonesia”, Fiscal Policy Instruments and Green Development, Hosted by the Asian Development Bank (ADB), Indonesia Ministry of Finance and University of Indonesia, 25 February 2021, London (virtual), 2021.
- 5) S. MANAGI, Keynote Speech, “Energy and environment resilience facing COVID-19”, 12th International Conference of Applied Energy (ICAC): Energy System and Climate Governance in the Post COVID 19 Pandemic Era, December 2, Bangkok (virtual), 2020.
- 6) S. MANAGI, Invited Speech, “COVID-19 from a Japanese policy and economic perspective”, COVID-19 Policy and management perspectives from Sweden and Japan, MIRAI 2.0 COVID-19 webinar, October 8, 2020.
- 7) 宮沢良行、寺村淳、島谷幸宏、日本生態学会全国大会、Transpiration by grasslands in Mt. Aso, 2020.
- 8) 宮沢良行、日本森林学会全国大会、草原の蒸散は森林と比べて小さいのか、2020.

## 【サブテーマ 2】

- 1) Ayano Yamanaka, Shakila Kayum, Tomoko Minagawa: A booklet to learn people's birthplace to realize sustainable community in the Aso area, The 15th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST) 2020 Online, p.324, 2020.
- 2) 竹中綾乃, 皆川朋子: 黒川遊水地群の生物相評価及び氾濫原依存種生育生息場としての機能を持続するための管理手法に関する研究, 応用生態工学会研究発表会, 2021.
- 3) Ayan oYamanaka, Shakila Kayum, Tomoko Minagawa: A booklet to learn people's birthplace to realize sustainable community in the Aso area, The 15th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST) 2020 Online, p.324, 2020.
- 4) 皆川朋子, 山下大佑, 脇村真平, 浅田寛喜, 田中亘: 阿蘇地域における黒川流域・白川流域の浸水リスク及び水生生物相の評価によるEco-DRRの機能評価, 第22回河川生態学術研究会, 2019.
- 5) 脇村真平, 浅田寛喜, 山下大佑, 皆川朋子: 阿蘇地域における浸水リスクと水生生物相評価, 令和元年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.837-838, 2020.
- 6) 山下大佑, 皆川朋子: Eco-DRR計画にむけた阿蘇地域における遊水地群の生態系サービス(防災・生物多様性)に関する基礎研究, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 長崎, 2019.
- 7) 下城翔, 泉佑樹, 副島颯子: 阿蘇北向谷原始林における攪乱と植生, 日本植物分類学会 第20回大会, 2021.
- 8) 江島瑞貴, 島袋誉, 副島颯子, 岩崎貴也, 池田啓, 陶山佳久, 松尾歩, 竹下(村山)香織, Andrey E. Kozhevnikov, Zoya V. Kozhevnikova, Tian-Gang Gao, Hongfeng Wang, Siqu Wang, 藤井紀行: ヤツシロソウの阿蘇集団は最終氷期に大陸から渡ってきたのか? 日本植物学会第85回大会, 2021.
- 9) 岩崎寛太, 副島颯子, 岩崎貴也, 池田啓, 陶山佳久, 松尾歩, 竹下(村山)香織, Andrey E. Kozhevnikov, Zoya V. Kozhevnikov, Jae-Hong Pak, Kyung Choi, Hyoung-Tak Im, Tian-Gang Gao, Hongfeng Wang, Siqu Wang, 藤井紀行: 満鮮要素ヒロハヤマヨモギの分子系統地

理学的研究. 日本植物学会第85回大会, 2021.

- 10) 坂場友香, 陶山佳久, 松尾歩, 池田啓, 藤井紀行, 藤井伸二, 副島顕子: 満鮮要素オカオグルマの分布変遷史の解明. 日本植物分類学会第21回大会, 2022.
- 11) 西藤大朗, 陶山佳久, 松尾歩, 藤井紀行, 池田啓, 岩崎貴也, Andrey E. Kozhevnikov, Zoya V. Kozhevnikova, Jae-Hong Pak, Kyung Choi, Tian-Gang Gao, 副島顕子: MIG-seq 解析を利用したオキナグサの分子系統地理学的研究. 日本植物分類学会第21回大会, 2022.

### 【サブテーマ3】

- 1) 吉田嵩寛, 樋口明彦, 野口雄太, 川藤知恵, Byambatsogt Arvinzaya, 李舒婷: 地域循環共生圏の考え方に基づいた木製ガードレールの実現可能性に関する研究, 第17回景観・デザイン研究発表会, 2021.

### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 寺村淳, 田浦扶充子: 2019年度九州大学オープンイノベーションワークショップ (主催: 九州大学, 2019年11月8日、一般公開・ポスター展示・説明、参加者約100名) にて「自然資源を活用した発災時の対応「グリーンレジリエンス」の手法の開発」を発表
- 2) 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) Web展示会場にて、研究概要説明を実施
- 3) 島谷幸宏: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「草原の水資源涵養機能と水循環」、「阿蘇研究から草原を考える」を報告
- 4) 皆川朋子: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「遊水地と水田を活用した流出抑制と生物多様性の保全」を報告
- 5) 樋口明彦: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「阿蘇の景観保全と自然資源の活用」を報告
- 6) 山下大佑, 皆川朋子: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「阿蘇地域におけるEco-DRR計画立案に向けた災害リスク低減と遊水地の生態系サービス」を報告
- 7) 山中綾乃, 皆川朋子: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「阿蘇地域を対象とした減災・防災と生態系保全に関する環境教育読本の作成について報告
- 8) 浅田寛喜, 皆川朋子, 東口晃久・畠周平: 一般公開シンポジウム グリーンインフラネットワークジャパン2020 (主催: GIJ2020実行委員会、2020年11月6~8日、オンライン) にて「阿蘇地域における持続可能な地域づくりに向けた斜面植生の在り方に関する研究」について報告
- 9) 島谷幸宏: 一般公開シンポジウム 「茅葺」「茅採取」ユネスコ無形文化遺産登録記念フォーラム「阿蘇の草原に茅葺きの復活を」 (主催: 一般社団法人日本茅葺き文化協会、2021年3月21日、グランメッセ熊本・オンライン併用、観客約300名) にて講演
- 10) 島谷幸宏, 皆川朋子, 樋口明彦: 一般公開シンポジウム「阿蘇における地域循環共生圏の構築と創造的復興に向けて」 (主催: 本研究グループ、2021年11月24日、国立阿蘇青少年交流の家・オンライン併用、観客約50名) にて報告会を実施

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

- 1) 熊本日日新聞（2022年1月6日、インターネット、「阿蘇の草原 下流域への水供給力、樹林より高く 九州大など蒸散量で裏付け」）
- 2) 日本経済新聞（令和1年11月27日、全国版、「見えない価値の可視化 政策に一石」）

【サブテーマ2】

- 1) 熊本日日新聞（2021年6月29日、「南阿蘇村白川治水で実証実験」）
- 2) NHK サイエンスzero（2021年5月23日、横堤による氾濫流抑制のシミュレーション結果が1分ほど紹介）

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

## IV. 英文Abstract

**Research on Build Back Better Based on the Relationship Between Natural Disaster and Ecosystem Services.**

Principal Investigator: Yukihiro SHIMATANI

Institution: Kyushu University, Fukuoka City, Fukuoka, JAPAN

Cooperated by: Kumamoto University, Daiichi Institute of Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Civil Engineering Research Institute for Cold Region

[Abstract]

Key Words: Regional circular and ecological sphere, Build back better, Water resources, Disaster risk reduction, Ecosystem services, Cultural services

The Aso region has been severely damaged by the heavy rains in 2012 and the Kumamoto earthquakes in 2016. Considering the reconstruction of the Aso region, restoring and utilizing the ecosystem services that form the basis of the region's industries is essential. Since the Aso region is the water source of six first-class rivers, water provisioning services are particularly critical.

In order to clarify the value that the Aso grasslands are the vital water resources for the rivers, our research groups focused on and measured the transpiration function of Japanese pampas grasses and bamboo grasses. The research result clarified that the amount of transpiration of grasslands mainly composed of Japanese pampas grasses is significantly smaller than that of forests. Thus, maintaining grasslands to supply water resources has excellent value.

Other our research results showed that it is essential not only to secure but to improve the capability of utilizing natural resources such as water, food, and fuel for enhancing disaster resilience.

It also resulted that disaster mitigation and disaster prevention utilizing natural topography and ecosystems has excellent value for regional disaster prevention, strengthening biodiversity conservation, and sustainable local communities. In the Kurokawa river basin, where urbanization of lowlands is progressing and inundation damage is increasing, both the hydraulic control function and the biodiversity conservation function can be strengthened by utilizing the retarding basin and the old river channel.

Besides, periodic natural disasters and human disturbances contribute to the dynamic stability of ecosystems and biodiversity conservation.

In the aspect of cultural services in the ecosystem services, utilizing local stones and woods as construction materials can avoid deterioration of the Aso's landscape as the national park. It also increases the economic circulation rate in the region and contributes to CO2 reduction. Additionally, it is helpful to promote measures such as stone bank systems that public works projects can utilize.

Also, aiming to register the Aso region as a World Natural Heritage Site, we have created the landscape guideline for Aso-Kuju national park. It is necessary to promote measures to utilize the guideline.