

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

S II -5-2 熊本地震による阿蘇カルデラから熊本地域の地下水を中心とした  
水循環への影響の評価に関する研究

(JPMEERF19S20520)

令和元年度～令和3年度

Study on the Evaluation of the Impact of the Kumamoto Earthquake on the Water Cycle, Especially  
Groundwater in the Kumamoto Area from the Aso Caldera

〈研究代表機関〉

東海大学

〈研究分担機関〉

長崎大学

農研機構九州沖縄農業研究センター

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 熊本地震による阿蘇カルデラから熊本地域の地下水を中心とした 水循環への影響の評価に関する研究 （東海大学、長崎大学）	・・・・・・・・・・	9
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 地震による阿蘇草原等の土地利用の変化が水循環に及ぼす影響の評価 （東海大学）	・・・・・・・・・・	24
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 水循環の変化が農業に及ぼす影響の評価 (東海大学、農研機構九州沖縄研究センター)	40
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	51
IV. 英文Abstract	55

## I. 成果の概要

課題名 S II -5-2 熊本地震による阿蘇カルデラから熊本地域の地下水を中心とした水循環への影響の評価に関する研究

課題代表者名 市川 勉 (東海大学 特任教授)

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

83,628千円

(令和元年度：28,270千円、令和2年度：27,773千円、令和3年度：27,585千円)

研究体制

(サブテーマ1) 阿蘇カルデラを含む阿蘇・熊本地域における地下水を中心とした水循環モデルの構築と熊本地震による影響の把握 (東海大学) (JPMEERF19S20504)

(サブテーマ2) 地震による阿蘇草原等の土地利用の変化が水循環に及ぼす影響の評価 (東海大学) (JPMEERF19S20505)

(サブテーマ3) 水循環の変化が農業に及ぼす影響の評価 (東海大学) (JPMEERF19S20506)

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 水循環、熊本地震、草原、地下水、農地

### 1. はじめに (研究背景等)

阿蘇山は日本第2位の規模を持つカルデラであり、このカルデラの中に、農地、宅地、鉄道、道路が作られ、人が生活してきた。特に、野焼き・放牧・採草という農業上の利用によって千年もの長い間草原を維持してきた。これらを通じて生物多様性、景観、文化、水循環が形成され、現在も維持されている。このようにカルデラの中に人が生活し社会を構成することは稀有なことであり、「地質百選」、「世界ジオパーク」、「日本百名山」、「世界農業遺産」、白川水源「名水百選」、南阿蘇村湧水群「平成の名水百選」など多くの選定を受け、観光地としてもそのポテンシャルは高く維持されてきた。

阿蘇カルデラは九州の6つの一級河川の源流域であり、特に、熊本平野においては阿蘇山の活動によって形成された地層は多量の地下水を包含することが可能であり、表層は水を浸透させやすい有機質火山灰土で覆われている。その結果、阿蘇山および外輪山西側における多量の降雨が地下に浸透して一大地下水帯を形成することで、阿蘇・熊本地域は飲料水に地下水を利用している日本で最大の地域となっている。

その一方で、この地域は多くの災害にさらされ、そのたびに復興を重ねてきた。近年では、「2012年九州北部豪雨」、「2016年熊本地震」などの大災害に見舞われ、その復興に長い年月をかけている。さらに、農畜産業の衰退、高齢化などによって阿蘇の景観を形成してきた草原は大きくその面積を減少させ、水循環にも影響が出ている。しかし、これまでに阿蘇・熊本地域の水文現象にかかわる包括的な調査・研究は行われていない。

熊本県に限って考えても、阿蘇の豊かな自然と水資源を背景とした農業や畜産業、地域の産物や自然や文化を中心とする観光など、そこには阿蘇の農山村部と熊本都市圏を連携する地域循環共生圏の一つのモデルが見出される。したがって、この地域の創造的復興(環境、経済、社会の統合的な発展を考えるなかで将来的な環境・生命文明社会の構築を見据えた復興)を目指すことが、今後の持続可能な社会構築にとって不可欠である。

## 2. 研究開発目的

阿蘇カルデラー帯は、福岡都市圏、熊本都市圏と水循環を通じて深く関係している。阿蘇山の火山活動によって形成された地層が多量の地下水を包含し、特に熊本都市圏では人々の英知によって都市活動の源泉としてその地下水を利用してきた。一方、阿蘇カルデラ内の住民も千年にわたる草原の維持活動、カルデラ内の営農活動を継続してきたが、その維持が阿蘇カルデラ周辺の水循環を形作り、その結果として浸透した多量の降雨を阿蘇カルデラ内に効率よく保水してきた。しかし、畜産業・農業従事者の高齢化、人口減少などの社会的要因、度重なる水害、熊本地震等の自然的要因によって草原や農地の面積は減少の一步をたどり、水循環量は減少している。これまで、水文資料の定量的な調査は断片的であり、必ずしも系統的な調査は実施されていない。また、森林に比べて草原が水循環に及ぼす効果については知見が限られていた。したがって、各種災害からの復興についても産業や暮らしを飛躍的に活性化させる創造的復興に至っているとは言い難く、またそれに資する資料も少ない。

そこで、本研究の目的は、阿蘇カルデラ内の水循環の保全は、熊本地域地下水の保全にもつながることから、①阿蘇の水循環の中核をなす草原と水田の過去から現在までの変化について衛星画像などを用いて把握し、②地表面の浸透能力の把握、河川流量、地下水位、湧水量などの水文データを詳細な観測によって収集し、③地表面の土地利用の変化や熊本地震等の災害時の水循環の変化・影響を評価し、④草原や水田の保全策を提案することである。

以上の調査、データ収集と評価から、阿蘇草原の持続可能な在り方について提言を行い、阿蘇における農業、畜産業などの産業資源、自然景観などの精神性を含む観光資源の保全、活性化の方向性を打ち出すことで、そこから熊本都市圏との人的、経済的交流（人・モノ・金的交流）という活力ある地域循環共生圏構築への一つの方向性を提示する。

## 3. 研究目標

全体目標	阿蘇カルデラ内から熊本地域の水循環を表現できるモデルを構築し、草原面積の変化、水田等土地利用の変化による水循環への影響、熊本地震等の災害による影響を評価する。その結果を用いて水循環における草原、水田等農畜産業の重要性を評価する。また、阿蘇カルデラをはじめとした中山間農地における土地利用の変化、災害からの復旧状況を評価し、熊本地震からの創造的復興策として、草原及び水田維持のための持続可能な農畜産業のあり方を提案する。
サブテーマ1	阿蘇カルデラを含む阿蘇・熊本地域における地下水を中心とした水循環モデルの構築と熊本地震による影響の把握
サブテーマリーダー /所属機関	市川 勉／東海大学
目標	阿蘇カルデラ内及び熊本地域の水循環を解析するモデルを作成し、長期にわたる土地利用、特に、草原や水田の縮小、熊本地震などの災害によってどのような水循環の変化が発生しているかを評価する。この評価には地下水、地表水、気象の水文データをはじめ、土壌の浸透特性、地層の透水性、地表の浸透特性、土地利用の変化といったデータを収集し、シミュレーションに使用する。そして、得られた結果をもとに、草原、水田等農畜産業の重要性を評価し、草原再生、水田維持が重要であり持続可能な土地利用、産業のあり方に関する提言をまとめる。

サブテーマ2	地震による阿蘇草原等の土地利用の変化が水循環に及ぼす影響の評価
サブテーマリーダー /所属機関	岩崎 洋一郎／東海大学
目標	衛星画像およびGIS データなどを解析して、阿蘇地域の1981年、1996年、地震直前の2015年、地震後の2016年そして2040年代（将来予測）の土地被覆分類を行う。阿蘇地域は、雲に覆われることが多く短い年間隔での衛星画像収集は困難で上記の4年とした。そして各土地被覆の面積の経時変化を把握する。熊本地域についても地震後の2016年の土地被覆分類を行う。そして各土地被覆の面積を把握する。また、阿蘇地域の草原における浸透能力試験を行う。さらに、被災が大きかった阿蘇カルデラ内南阿蘇村周辺をドローン、踏査によって詳細に調査する。特に、地中生活を行うキムラグモ類の個体数を調査し、地震の影響をより高精度に生態系の変化として分析する。土地被覆分類結果と浸透能力試験結果をサブテーマ1へ提供する。最終的には、得られた結果から地域循環共生圏の構築に寄与する提言をまとめる。

サブテーマ3	水循環の変化が農業に及ぼす影響の評価
サブテーマリーダー /所属機関	阿部 淳／東海大学
目標	阿蘇地域を中心に、熊本地震でどのような被害が起き、現場がどのように対応したかを聞き取り調査するとともに、統計データによって農業への影響を明らかにする。その際に、特に水の問題に着目し、地震のような災害に備えるために、どのような水環境を守っていく必要があるのか、そのために平常時からどのような対策が必要なのかを明確にして提言していく。あわせて、災害後も農業と地域の活性を守っていくために、平常時から必要な活動・支援策についても提言する。

#### 4. 研究開発内容

サブテーマ1では、以下の5項目について研究開発を行った。

##### 1) 阿蘇カルデラにおける水文調査

水文調査として、水田39地点における中干し前後の減水深調査と減水深を利用した水田の涵養量評価、乾季における白川・黒川に流入する基底流量調査、南阿蘇湧水群および白川水源の月1回以上の湧水量調査、水田灌漑用井戸調査、南阿蘇村における冬期湛水実態調査を実施した。

##### 2) 阿蘇カルデラの水循環シミュレーション

南郷谷および阿蘇谷の白川・黒川流域を帯水層タンク、地下水補給タンクに分割し、調査によって収集した水文データ、サブテーマ2から供給された土地被覆分類結果と浸透能力試験結果を用いてタンク毎に水収支解析を行った。

##### 3) 立野火口瀬における地下水流動調査

白川と黒川が合流する立野火口瀬の下流側に2本の地下水位観測井を設置し、地下水位の観測を行うと共に地下水流量の評価を行った。

##### 4) 熊本地域における水文調査

熊本地域のボーリングデータによる基盤岩分布図の作成、熊本地域に掘削された地下水位観測井のデータ収集と熊本地震の影響分析及びボーリングデータを使った透水係数評価、熊本地域内の水田の減水深分布および地下水涵養量評価、白川中流域の湛水による地下水涵養量評価、水前寺江津湖湧水群・下六嘉井寺湧水群の湧水量データを収集した。

## 5) 熊本地域の水循環シミュレーション

熊本地域を16のThiessen Polygon型タンクに分割し、水文調査で得られたデータを用いて、これらのタンク毎の水収支解析を行った。

サブテーマ2では、以下の7項目について研究開発を行った。

### 1) 地震により阿蘇地域の土地被覆が裸地へ変化した領域の抽出と時間経過とともに拡大する裸地領域の原因調査

地震前後2時期の衛星画像解析により地震被害により裸地へ変化した領域を抽出した。さらに、地震後時間経過とともに拡大する裸地領域が複数箇所見られたので踏査による原因調査を行った。

### 2) NDVI経時変化とGISデータなどを組み合わせた阿蘇地域土地被覆分類手法の開発および土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

地下水涵養量の推定を目的とした1981年、1996年、2015年、2016年（熊本地震後）の土地被覆分類図（10カテゴリーに分類）を作成した。また、それを基に主要な土地被覆の経年変化を算出した。さらに、地下水涵養量の推移を推定し、土地被覆変化の影響について考察した。

### 3) SPOT 6/7衛星画像とGISデータなどを組み合わせた熊本地域土地被覆分類手法の開発および2016年熊本地震と豪雨に伴う土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

熊本地域の土地被覆分類図（9カテゴリーに分類）を生成した。本手法も、衛星画像以外にGISデータなど有力なデータを組み合わせて分類精度を上げている。熊本地震・豪雨による土地被覆の変化を抽出し、その地下水涵養量への影響を考察した。

### 4) 阿蘇地域の草原および森林における浸透能力の調査

ダブルリング法により浸透能力を計測し、土地被覆毎の浸透能力の結果（平均値）を算出した。

### 5) 熊本地震前後の阿蘇地域に生息するキムラグモ類の個体数の調査およびリモートセンシングによるキムラグモ類生息地の評価

斜面に巣を作って地中生活を行うキムラグモ類の個体数を調査した。熊本地震によるキムラグモ類の減少地域は、水を通しやすい表土が地震により流れ落ち地下水涵養量が減少していると考えられ、水循環に関係する。また、衛星リモートセンシングによりキムラグモ類生息地の被害評価を試みた。

### 6) ドローンを用いた高解像度リモートセンシングによるNDVIと3次元形状の計測および空間分解能の検討

ドローンを用いた高解像度リモートセンシングを実施し、ネザサ、ススキの領域を正確に区分できることを確認した。次に1.5mの空間分解能の衛星画像であれば、概ねドローンのNDVI強弱分布傾向に近いことを確認し、広域の植生分類ができる可能性があることを示した。そして、ドローンの空撮画像と衛星画像との連携を検討した。

### 7) SPOT 6/7による松原ダム・下笠ダム流域の土地被覆分類

蒸発散量の異なるササ・ススキの分類を主な目的として、SPOT 7衛星画像（1.5m空間分解能）での植生分類（10カテゴリーに分類）を行った。

サブテーマ3では、以下の3項目について研究開発を行った。

### 1) 熊本地震による農業被害事例の聞き取り調査

農家・農業法人を訪問し、熊本地震発生時の被害状況、その後の対応、復旧の現状について聞き取り調査を実施した。

### 2) 熊本地震による阿蘇の牧野の利用状況の変化についての調査

阿蘇市、南阿蘇村、高森町の牧野についてSPOT衛星画像を解析することによって、熊本地震による牧野の面積・野焼き面積への影響を調査した。

### 3) 創造的復興に向けた取り組みについての検討

今後の水田等の農地管理や牧野管理について聞き取り調査を実施した。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

テーマ2では、阿蘇カルデラ内及び熊本地域の水循環シミュレーションを行い、草原や水田面積などの土地利用の変化が水循環に及ぼす影響、熊本地震等の災害による影響を評価し、水循環における草原や水田等農畜産業の重要性を評価すること、カルデラの土地利用の変化や、熊本地震などの災害からの復旧のために持続可能な農畜産業の在り方を提案することである。

そのため、サブテーマ2では衛星画像やGISデータなどを解析して土地利用の状態を表す土地被覆分類を1981年から熊本地震のあった2016年までの間に4年間のデータを収集した。これから各土地被覆の面積の経時変化を把握した。また、阿蘇地域の草原や林地の浸透能力を把握するために過去の資料調査、現地試験を実施した。これらのデータをサブテーマ1（水循環シミュレーションのモデル構築）へ提供し、水循環シミュレーションに利用した。さらに、希少生物（キムラグモ類）の熊本地震前後の分布状況調査によって地震被害の復旧工事による地表面の変化による希少生物への影響評価を実施した。そして、ドローンを用いた高解像度リモートセンシングを実施し、通常では分類できないネザサとスキの植生領域を正確に区分する手法の開発を目指した。これらの成果をテーマ1へ資料提供した。

サブテーマ3では、熊本地震による農業被害の状況を調査し、統計データと併せて被害の状況を解明することによって、今後の災害に備えるために必要な方策を策定することを目的に実施した。阿蘇地方における熊本地震災害の最も大きなものは、水に関連する問題である。地震による地殻変動に伴って、灌漑システムが崩壊し水田圃場に水が送れなくなる事象や牧野での水飲み場への給水が停止し、牧野が使用不能になったことである。このサブテーマでは阿蘇カルデラ内で発生した熊本地震による被害の状況を調査し、サブテーマ1（水循環シミュレーションの結果の評価）に情報提供するとともに、将来の災害への備え、創造的復興のための方策を検討した。

サブテーマ1では、これまで体系的に調査されてこなかった阿蘇カルデラ内の水文調査を実施し、これらの水文データとサブテーマ2から提供された土地被覆分類結果と浸透能力試験結果を用いて、1982年、2015～2019年、将来の3ケースで阿蘇カルデラ内の水循環シミュレーションを実施した。サブテーマ3において検討された熊本地震による農業被害に関する情報を、このシミュレーション結果の評価に用いた。阿蘇谷・南郷谷を対象としたシミュレーションでは、水田が被災したため地下水涵養量は微減しているが、被災面積が少なかったため、水循環の顕著な変化は見られなかった。南郷谷の湧水のうち、塩井社水源は、地震による山体の透水性上昇による影響で地下水が貯留できなくなり、梅雨前に枯渇するようになっていたことが分かった。ほかの湧水地点は、比較的低位にあるため、ほとんど被害はなかった。南郷谷は、現状の草原面積が非常に少なくなっているため、針葉樹を草原に復帰した場合のシミュレーションを行ったところ、針葉樹面積を10%（約4.1km<sup>2</sup>）草原に復帰させると、水循環量が約100万m<sup>3</sup>増加した。また、水田が無い状態を想定したシミュレーションを行なったところ、地下水涵養量が大幅に減少した。こうしたことから、水田の維持、草原の復活がカルデラの中の水循環の健全化に大きく影響すると考えられる。また、立野火口瀬直下に2本の観測井戸を設置し、地下水位を観測したところ、立野火口瀬の地下に地下水流があることが判明した。これより日量約4万m<sup>3</sup>の地下水が直接、下流側の熊本地域に流入していることが分かった。さらに、熊本地域を対象とした水循環シミュレーションを実施したところ、熊本地震直後に阿蘇外輪山西側斜面の山体が熊本地震の強い揺れによって透水性が大きくなり、大量の地下水が放出されたことで、熊本地域の地下水位は地震直後に急激に上昇したと考えられ、これが有明海側に流下したことが分かった。こうしたことと立野火口瀬直下の地下水流出、白川中流域の水田・湛水事業による地下水涵養などを総合的に評価すると、阿蘇カルデラから外輪山西側に至る阿蘇山と熊本都市圏を含む熊本地域地下水帯は地域水循環共生圏を構成していると考えられる。

### 5-2. 環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

### ＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

本研究では、熊本地震によって阿蘇カルデラ内で発生した湧水の枯渇、灌漑水路や井戸の損壊のような農業被害について調査し、湧水回復に要する時間や農畜産業被害への対策事例を示すとともに、随時利用可能な天然の代替水源を地域に残しておくことは、災害発生時にも作物栽培や畜産を継続するうえで極めて重要であることを明らかにした。これらの成果は、今後南海トラフ地震のような巨大地震が発生した場合、同様の地震被害が発生すると想定し、地震被害に対する備えを検討するための資料として活用が期待される。

阿蘇カルデラを対象とした衛星画像によるリモートセンシングでは、地震による土砂崩壊の他に、復旧工事により浸透能力の低い裸地領域が拡大していることを明らかにした。これらの画像処理やGISデータの解析を通じて、より詳細な土地被覆分類が可能となった。また、復旧工事により稀少生物の個体数が激減していることを示した。これらの成果は、地下水保全だけでなく、生態系への影響を考慮した創造的復興を成し遂げるための資料として活用が期待される。

水循環シミュレーションでは、水田や草原面積の減少が阿蘇カルデラの地下水を中心とした水循環量の保全を阻害していることを明らかにし、さらに、南阿蘇の山林を草原に戻すと地下水涵養量が増え、水循環が改善されることを示した。この成果は、当該地域の地下水保全政策として土地利用のあり方の検討に資する資料として活用が期待される。水循環モデルに資する水文調査を実施する過程で、阿蘇カルデラ内の水田の減水深が高いことを示したことは、南阿蘇村のみで実施されている冬季湛水を阿蘇市や高森町への拡大を検討する上で参考データとなる。また、近年の南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量観測データは、政策の効果を評価するための基礎データとなる。

阿蘇カルデラと熊本地域の地下水の連続性を明らかにし、阿蘇カルデラから熊本地域への地下水供給量を定量化したことは、阿蘇カルデラと熊本地域が地域水循環共生圏を構成していると認識させるとともに、阿蘇カルデラの地下水保全政策への熊本地域の参画を促す資料として活用が期待される。

### 5-3. 研究目標の達成状況

阿蘇カルデラ内から熊本地域の水循環を表現できるモデルを作成し、草原面積の変化、水田等土地利用の変化による水循環への影響、熊本地震等の災害による影響を評価した。この水循環シミュレーションを実施するに際し、詳細な土地被覆分類が必要となる。そのために、サブテーマ2では衛星画像およびGISデータ解析を通じて、1981年から2016年までの間に4回の詳細な土地被覆分類を行い、各土地被覆の面積の変化を把握する。同時に、カルデラ内の草原や林地の浸透能力を把握するために過去の資料調査、原位置試験を実施した。また、ドローンによる詳細な土地被覆調査を実施することによって、草原の植物別の分類も可能であることを示し、さらに、地震によって被害を受けた地域の復旧のための工事による希少生物の生息域の変化など災害復旧工事による生態系への影響についても検討した。また、熊本地震の被害は農畜産業にも多くあり、特に、灌漑施設や水源の消失など多くの問題が発生した。サブテーマ3で、そのような営農上の問題点について詳細な調査。検討を行い、災害が来る前の平常時の対応策について検討を行った。これらサブテーマ2、3のデータは、サブテーマ1で実施する水循環シミュレーションの資料として提供された。

サブテーマ1の水循環シミュレーションの結果では、特に、阿蘇カルデラ内の水収支計算で、阿蘇谷は草原の面積が十分な大きさを持っているが、南郷谷は面積が少なくなっており、水循環に影響が出てきていることが推定された。その結果、阿蘇カルデラ内では、水循環における草原、水田等農畜産業の重要性が明らかとなり、所記の目標は達成できた。また、阿蘇カルデラの出口に当たる立野火口瀬直下に2本の地下水位観測井を掘削したところ、地表面下35mの深度に地下水の流れを発見し、2地点の地下水位差から流動量を推定したところ、日量約4万 $\text{m}^3$ の地下水がカルデラから熊本地域へ直接流下していることが分かった。さらに、熊本地域の水収支解析の結果、熊本地震による阿蘇外輪山からの地震の揺れによって、大量の水が排水されたことによる地下水位への影響が再現された。そして、阿蘇カルデラから地下水への直接流出や白川の水を灌漑水として利用する白川中流域の水田及び湛水事業による地下水涵

養が阿蘇と熊本地域を結び付けていることが明らかとなった。このようなことから、阿蘇カルデラをはじめとした中山間農地における土地利用の変化による影響が評価され、熊本地震からの創造的復興策として、草原及び水田維持のための持続可能な農畜産業を構築するように下流との交流を活発化することが必要とされる。その結果、「目標以上の成果を挙げた」と考えられる。

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

#### <件数>

8件

#### <主な査読付き論文>

- 1) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：土木学会論文集B1(水工学)、77, 2, I\_133-I\_138 (2021).  
水収支解析による阿蘇南郷谷における熊本地震の影響評価
- 2) 天野弘基、市川 勉、平野葉一、中川 啓：土木学会論文集G(環境)、76, 5, I\_495-I\_503 (2020).  
阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について
- 3) H. AMANO and Y. IWASAKI: Sustainability, 14, 1, 545, 19 pages (2022) (IF:3.251)  
Estimation of Groundwater Recharge in Kumamoto Area, Japan in 2016 by Mapping Land Cover Using GIS Data and SPOT 6/7 Satellite Images
- 4) H. AMANO and Y. IWASAKI: Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 18, 6605, 18 pages (2020) (IF:3.390)  
Land Cover Classification by Integrating NDVI Time Series and GIS Data to Evaluate Water Circulation in Aso Caldera, Japan

### 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	8件
その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	27件
「国民との科学・技術対話」の実施	3件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究に関連する受賞	3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

市川 勉

東海大学工学部卒業、博士(工学)、現在、東海大学九州教養教育センター特任教授

研究分担者

1) 平野 葉一

東京大学教養学部卒業、東海大学文明研究所講師、現在、東海大学文学部特任教授

2) 中川 啓

九州大学工学部卒業、九州大学大学院農学研究院助手、現在、長崎大学総合生産科学域教授

3) 天野 弘基

長崎大学環境科学部卒業、現在、東海大学九州教養教育センター特定研究員

4) 岩崎 洋一郎

明治大学工学部卒業、九州東海大学工学部助手、現在、東海大学基盤工学部教授

5) 長 幸平

東京理科大学理学部卒業、(財)リモート・センシング技術センター研究員、  
現在、東海大学情報理工学部特任教授・情報技術センター所長

6) 藤本 邦昭

東海大学工学部卒業、長崎女子短期大学講師、現在、東海大学基盤工学部教授(学部長)

7) 福崎 稔

東海大学工学部卒業、東海大学短期大学部教授、  
現在、東海大学九州教養教育センター教授

8) 的場 英行

日本大学農獣医学部卒業、現在、東海大学経営学部准教授

9) 長野 克也(令和元年度～令和2年度)

東京農業大学農学部卒業、東海大学農学部教授、  
現在、東海大学非常勤講師

10) 村田 浩平

九州東海大学農学部卒業、九州東海大学農学部助手、現在、東海大学農学部教授

11) 阿部 淳

東京大学農学部卒業、東京大学農学部助教、現在、東海大学農学部教授

12) 木之内 均

九州東海大学農学部卒業、  
現在、東海大学経営学部教授(学部長)・有限会社木之内農園会長

13) 岡本 智伸

九州東海大学農学部卒業、九州東海大学農学部助手、  
現在、東海大学農学部教授(学部長)

14) 檜村 敦

東京農業大学農学部卒業、宮崎大学農学部特任助教、現在、東海大学農学部講師

15) 加藤 直樹

岩手大学農学部卒業、  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター 研究員、  
現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター上級研究員

## II. 成果の詳細

### II-1 阿蘇カルデラを含む阿蘇・熊本地域における地下水を中心とした水循環モデルの構築と熊本地震による影響の把握

東海大学

九州教養教育センター／特任教授 市川 勉

文学部／特任教授 平野 葉一

九州教養教育センター／特定研究員 天野 弘基

長崎大学

総合生産科学域／教授 中川 啓

#### 【要旨】

サブテーマ1では、熊本地震からの創造的復興や阿蘇カルデラと熊本地域の地域循環共生圏構築に資する資料を提供することを目的に、阿蘇カルデラ内と熊本地域を対象に水循環モデルを構築するとともに、阿蘇カルデラと熊本地域の地下水の連続性について研究を実施した。

阿蘇カルデラの水循環モデル構築に資する水文調査では、阿蘇カルデラ内の水田が「ざる田」と呼称される白川中流域の水田につぐ減水深をもつこと、灌漑用井戸が阿蘇谷と南郷谷でそれぞれ300本以上存在すること、南阿蘇村で実施される冬季湛水による地下水涵養量は灌漑期における水田からの地下水涵養量の約6.5%に相当すること、白川と黒川に流入する湧水量の観測によって白川と黒川は得水河川であること、そして南阿蘇村湧水群と白川水源の11カ所のうち7カ所で公示されている湧水量より少ないこと等がわかった。

阿蘇カルデラ内を対象とした水循環モデルでは、熊本地震後の塩井社水源の枯渇や地下水位の異常な上昇は、地震によって中央火口丘や外輪山の地層の透水性や有効間隙率が上昇したことで発生したことを示した。また、湧水の枯渇や水田が被災したことによる涵養量の減少といった地震による水循環の変化は局所的であり、阿蘇カルデラ全体で見ると熊本地震と同じ2016年に発生した豪雨による水循環の変化が卓越していると評価した。これら湧水量の変化は、3年にわたる月1回の連続的な流量観測によって明らかになった。さらに、将来的な水田面積の減少、草原面積の変化を想定し、水循環シミュレーションを実施することで、水田面積の減少に伴い地下水涵養量、湧水・基底流出量が減少すること、草原面積の変化に伴い地下水涵養量、湧水・基底流出量が大きく変化することを示すことができ、阿蘇カルデラ内では水田と草原が地下水量の保全・回復をはじめとした水循環の維持に重要な要因であることを示した。

阿蘇カルデラ内と熊本地域の接続部にあたる立野火口瀬でボーリングを実施した後、地下水観測井を設置するとともに、既存のボーリングデータから地質縦横断面図を作成することにより、阿蘇カルデラ内と熊本地域の地下水が連続していることを明らかにした。地下水の流下量は年間約1,500万 $m^3$ と推定され、阿蘇カルデラ内を源流域とする白川の水を使用する白川中流域の水田と湛水事業による地下水涵養約7,200万 $m^3$ と合わせると、約8,700万 $m^3$ の地下水が阿蘇カルデラ内から熊本地域へ供給されることを明らかにした。この量は、熊本地域の地下水帯に供給される全水量約5.7億 $m^3$ の約15%に相当すること、阿蘇外輪山西側の斜面における降雨浸透水が熊本地域の地下水帯に流出していることから、阿蘇カルデラと熊本地域は密接な地域水循環共生圏を構成していると評価した。

#### 1. 研究開発目的

阿蘇カルデラ一帯は、福岡都市圏、熊本都市圏と水循環を通じて深く関係している。阿蘇山の火山活動によって形成された地層が多量の地下水を包含し、特に熊本都市圏では人々の英知によって都市活動の源泉としてその地下水を利用してきた。一方、阿蘇カルデラ内の住民も千年にわたる草原の維持活動、カルデラ内の水田を中心とした営農活動を継続してきたが、その維持が阿蘇カルデラ周辺の水循環を形

作り、その結果として浸透した多量の降雨を阿蘇カルデラ内に効率よく保水してきた。しかし、畜産業・農業従事者の高齢化、人口減少などの社会的要因、度重なる水害、熊本地震等の自然的要因によって草原や農地の面積は減少の一步をたどり、水循環量は減少している。これまで、水文資料の定量的な調査は断片的であり、必ずしも系統的な調査は実施されていない。また、森林に比べて草原が水循環に及ぼす効果については知見が限られていた。したがって、各種災害からの復興についても産業や暮らしを飛躍的に活性化させる創造的復興に至っているとは言い難く、またそれに資する資料も少ない。

そこで、本研究の目的は、阿蘇カルデラ内の水循環の保全是、熊本地域地下水の保全にもつながることから、地表面の浸透能力の把握、河川流量、地下水位、湧水量などの水文データを詳細な観測によって収集し、地表面の土地利用の変化や熊本地震等の災害時の水循環の変化・影響を評価し、草原や水田の保全策を提案することである。

以上の調査、データ収集と評価から、阿蘇草原の持続可能な在り方について提言を行い、阿蘇における農業、畜産業などの産業資源、自然景観などの精神性を含む観光資源の保全、活性化の方向性を打ち出すことで、そこから熊本都市圏との人的、経済的交流（人・モノ・金的交流）という活力ある地域循環共生圏構築への一つの方向性を提示する。

## 2. 研究目標

阿蘇カルデラ内及び熊本地域の水循環を解析するモデルを作成し、長期にわたる土地利用、特に、草原や水田の縮小、熊本地震などの災害によってどのような水循環の変化が発生しているかを評価する。この評価には地下水、地表水、気象の水文データをはじめ、土壌の浸透特性、地層の透水性、地表の浸透特性、土地利用の変化といったデータを収集し、シミュレーションに使用する。そして、得られた結果をもとに、草原、水田等農畜産業の重要性を評価し、草原再生、水田維持が重要であり持続可能な土地利用、産業のあり方に関する提言をまとめる。

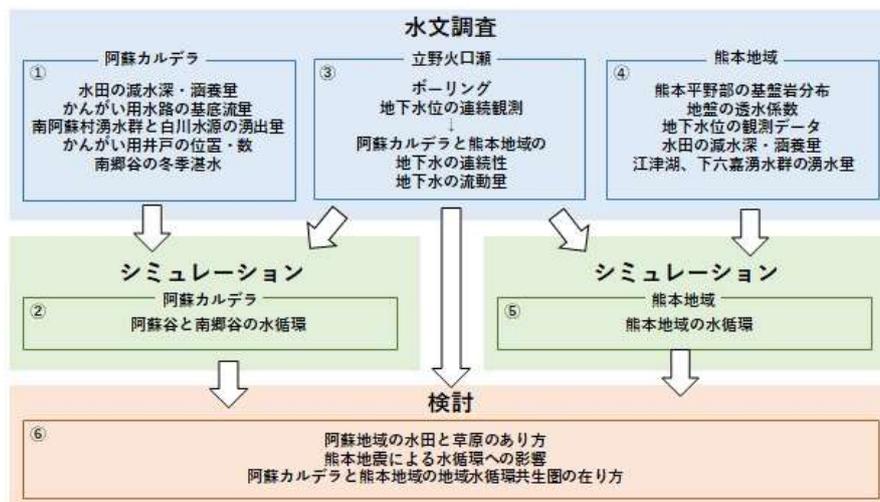


図1.1 サブテーマ1の研究内容

## 3. 研究開発内容

サブテーマ1では、地下水シミュレーションにより熊本地震のような災害や過去から未来の土地利用の変化によって水循環がどのような影響を受け、阿蘇・熊本地域の農畜産業にどのような影響を与えたかを評価し、災害からの創造的復興・地域循環共生圏の構築、施策の提案をするために、図1.1の流れで研究開発を行った。すなわち、はじめに水循環シミュレーションに必要な水文データを収集するとともに、熊本地震による被害状況を調査した。次に、得られた水文データをもとに水循環モデルを構築し、熊本地震前後の水循環や、阿蘇の草原面積変化に伴う水循環の変化をシミュレートした。これらの結果を踏まえ、地域水循環共生圏構築、創造的復興のための知見となる成果を取りまとめた。

## 1) 阿蘇カルデラ内の水文調査

水田の減水深調査は、熊本県農業技術課と共同で図1.2に示す阿蘇市21地点、南阿蘇村15地点、高森町3地点で実施した。中干しにより発生するクラックの影響で、中干し前後で減水深は大きく異なるため、減水深調査は、中干し前の6月、中干し後の8、9月の2回実施した。調査は、圃場の水口と尻後を閉じた後に測標付きの杭を打ち込み、経過時間と水位を記録する水田法により実施した。地下水涵養量は、小字ごとに計算することとし、はじめに減水深のコンター図から各小字の減水深を推定した。次に、熊本県が所蔵する水田台帳から稲の種類ごとの作付面積を小字ごとに集計した。最後に、減水深、稲の種類ごとの作付面積、地元の水土里ネットから提供された稲の種類ごとの湛水パターンから地下水涵養量を計算した。

冬期は降水量も少なく、また水田湛水のために地下水揚水がないことから、水路や河川を流れる水は、自然に湧き出した水であり、灌漑用水として利用できる基本量（基底流量）であると考えられる。本研究では、図1.3に示す阿蘇谷66地点、南郷谷37地点で、2020年1月から4月上旬にかけて水路、河川、湧水の基底流量調査を実施した。

阿蘇カルデラ内の各湧水の湧出量について、島野<sup>2)</sup>が豊水期と渇水期では水量が異なるものの、通常の状態における概算値としてまとめている。しかし、島野<sup>2)</sup>の報告以降、湧出量の調査は実施されておらず、近年の湧水の湧出量や季節的な湧出量の変化について明らではないため、白川水源および南阿蘇村湧水群11地点で2019年7月から月1～2回の頻度で湧水の湧出量調査を実施した。

阿蘇カルデラ内では水田を湛水するために、河川水、湧水、揚水した地下水が利用されており、灌漑期には、一の宮、白水地下水観測井で顕著な地下水位の低下が観測できるほど地下水を揚水している。熊本県<sup>3)</sup>によれば近年の阿蘇市の農業用井戸数は100本弱で、南阿蘇村と高森町については0本となっており、特に南阿蘇村と高森町については信頼性が乏しい。そこで、灌漑用井戸の実態を把握するために、阿蘇カルデラ内の灌漑用井戸調査を実施した。現地調査では、揚水ポンプを稼働するための電線が確認された小屋の位置を記録した。



図1.2 減水深調査地点の分布

(国土地理院の「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

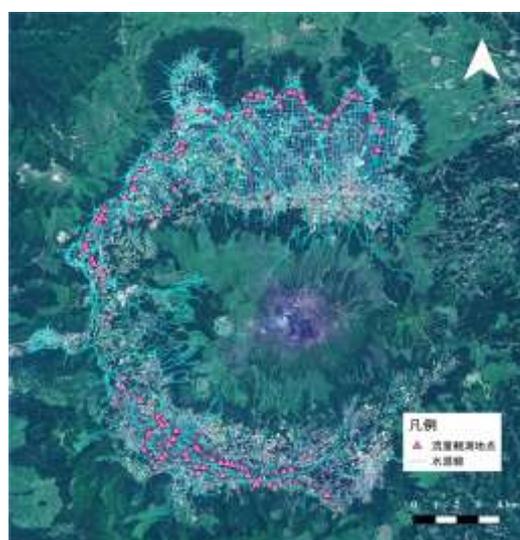


図1.3 基底流量観測地点の分布

(国土地理院の「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

南阿蘇村では、「環境保全型農業」の一環として、稲刈りが終わった水田に冬季も水を張る冬季湛水が実施されている<sup>4)</sup>。この冬季湛水による地下水涵養量を評価するために、2020年10月上旬から2021年3月下旬まで、1～2週間に1回の頻度で現地調査を行い、冬季湛水が実施されている圃場の位置を記録した。冬季湛水が実施されている圃場面積を小字ごとに集計し、中干し前の減水深を掛けることで、地下水涵養量を推定した。各圃場の面積は、全国農地ナビ<sup>5)</sup>で公開されている値を用いた。

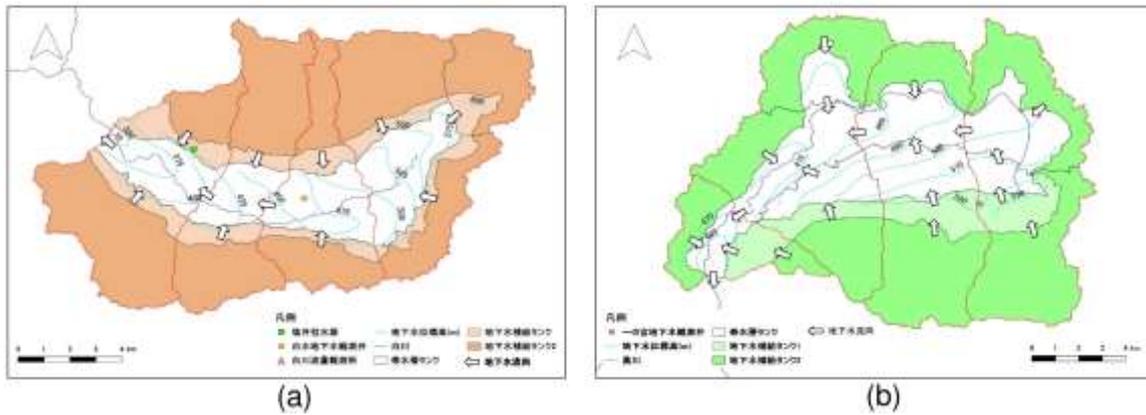


図1.4 阿蘇カルデラの計算領域、(a)南郷谷、(b)阿蘇谷

## 2) 南郷谷および阿蘇谷の水循環シミュレーション

南郷谷および阿蘇谷の白川・黒川流域を上流から下流にむかって赤線で囲まれた4つの流域に分割した(図1.4)。さらに、各流域を低地部で扇状地堆積物もしくはカルデラ埋積層が分布する帯水層タンク、山体部で緩傾斜地の地下水補給タンク1および急傾斜地の地下水補給タンク2の領域に分割し、タンク毎に水収支計算を行った。なお、阿蘇谷の中央火口丘側の地下水補給タンク2は緩傾斜地として扱った。

はじめに、熊本地震の水循環への影響を評価するために、解析対象年を2015~2019年として水循環シミュレーションを行った。解析には、流域を草原、針葉樹、広葉樹、ゴルフ場、水田、被災田、畑地、裸地、建物用地・道路、河川に分類した土地被覆図(サブテーマ2が作成・提供)を用いた。地震前の解析には2015年、地震後の解析には地震により発生した土砂崩れと被災田が表現されている2016年の土地被覆図を用いた。土砂崩れによって裸地になった場所は、すぐに植生が回復しないため、地震以降の年にも2016年の土地被覆図を用いた。なお、水田と被災田の面積は、各年の水田台帳から集計して使用した。集計した水田面積が、土地被覆図の面積と合わない分は、畑地の面積で調整した。

次に、1982年の水循環シミュレーションを行い、1982年と2015年の土地被覆の違いが水循環に与えた影響を評価した。

将来の変化については、南郷谷を対象に、主に高齢化に伴う農家の減少による水田面積の減少、今後の施策による草原の回復が水循環に与える影響を評価するため、以下に示すケースの水循環シミュレーションを行った。

ケース1：土地被覆は変化しない。

ケース2：全ての水田が、畑地に転換される。

ケース3：植林が行われた針葉樹を10、20、30、50、100%の割合で草原に戻す。

これらの解析では、過去30年の平均月降水量に近い2015年の降水量を用いた。

## 3) 立野火口瀬における地下水流動調査

2019年度に白川と黒川の合流する立野火口瀬の下流(熊本県菊池郡大津町外牧字前畑322-1)に、地下水位を観測するための第1観測井(L=57.4m)を設置した。2021年度には、第1観測井から52m離れた下流に第2観測井(L=60m)を設置した(図1.5)。ストレーナの位置は、それぞれ地表面下24.4~56.4m、36.0~60.0mである。第1観測井では2019年9月6日、第2観測井では2021年7月20日から10分間隔で地下水位の観測を開始した。

第2観測井については、掘進中にパッカー法による透水試験を実施した。また、水槽(L1050×D150×H150mm)に採取したボーリングコアを1mごとに投入し、投入前後の水位差から各深度の間隙率を評価した。これらの結果を用いて、立野火口瀬直下の地下水の流量を評価した。



図1.5 外牧における地下水観測井の設置位置

(国土地理院の「シームレス空中写真」(左図)<sup>6)</sup>および「全国ランドサットモザイク画像」(右図)<sup>1)</sup>を使用。)

#### 4) 熊本地域の水文調査

熊本地域のボーリングデータから帯水層の底となる基盤岩(先阿蘇火山岩類とこれより以前の地層群)の上面深度分布図を作成した。本データは、熊本地域を対象としたThiessen Polygon型のタンクモデルの基礎データとなる。

熊本平野には、図1.6に示す129の地下水位観測井(国土交通省が20地点、熊本県が16地点、熊本市が33地点、熊本市上下水道局が54地点、嘉島町が6地点を管轄)があり、古いもので1980年代から、観測が続けられている。観測の時間間隔は、ほとんどが1時間であるが、10分のももある。これら全てのデータを収集し、熊本平野の地下水位の経時変化、2016年熊本地震の地下水位への影響について分析した。

熊本地域内の217のボーリングにおける揚水試験結果を収集し、井戸の揚水量( $Q_d$ )と水位降下量( $s$ )から求められる比湧出量( $S_e = Q_d/s$ )と透水量係数( $T$ )の経験的な関係式( $T = 1.22S_e$ )から透水量係数を算出した。この透水量係数をスクリーン長で除することで、透水係数を推定した。

水田の減水深調査は、熊本県農業技術課と共同で熊本地域と菊鹿盆地で行った。これにより小字ごとに中干し前後の減水深を推定した。次に、熊本県が所蔵する水田台帳から稲の種類ごとの作付面積を小字ごとに集計した。最後に、減水深、稲の種類ごとの作付面積、地元の水土里ネットから提供された稲の種類ごとの湛水パターンから地下水涵養量を計算した。

江津湖では13地点で流量調査を行い、最下流部の秋津橋流量から江津湖への排水路・河川流入量を差し引くことで湧水量とした。井寺・下六嘉湧水群は、非かんがい期に21地点、かんがい期に31点で流量調査を行った。流量は、断面形状と流速を測定し、区分積法により求めた。

#### 5) 熊本地域の水循環シミュレーション

熊本地域では、Tyson and Weber<sup>7)</sup>によるThiessen Polygon型のタンクモデルで水循環シミュレーションを行うために、対象地域を16のThiessen Polygonに分割した(図1.7)。地下水流れの最下流にあたる各地下水位観測点(B1およびB2)は、計算領域境外の既知水頭点とし、その他のタンク(T1~T16)について水収支解析を行った。

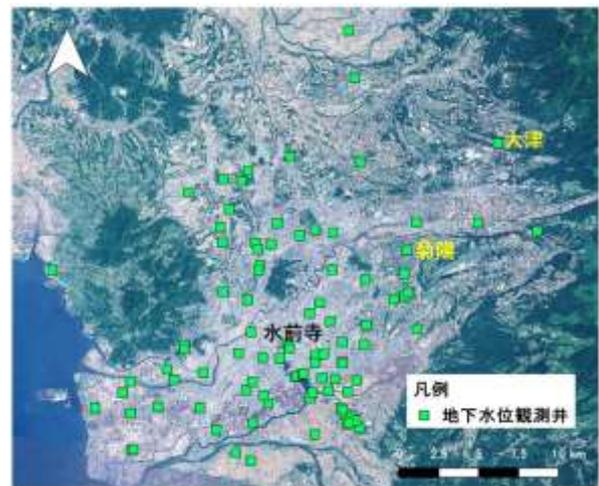


図1.6 熊本平野の地下水位観測井戸  
(国土地理院の「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

2016年熊本地震の水循環への影響を評価するために、解析対象年を2015～2017年として水循環シミュレーションを行った。解析には、熊本地域を草原、森林、ゴルフ場、芝地・雑草、水田、被災田、畑地、裸地、建物用地・道路、河川に分類した土地被覆図(サブテーマ2で作成・提供)を用いた。地震前の解析には2015年、地震後の解析には地震やその後の豪雨により発生した土砂崩れと被災田が表現されている2016年の土地被覆図を用いた。土砂崩れによって裸地になった場所は、すぐに植生が回復しないため、地震以降の年にも2016年の土地被覆図を用いた。なお、水田と被災田の面積は、各年の水田台帳から集計して使用した。集計した水田面積が、土地被覆図の面積と一致しない場合は、畑地の面積で調整した。

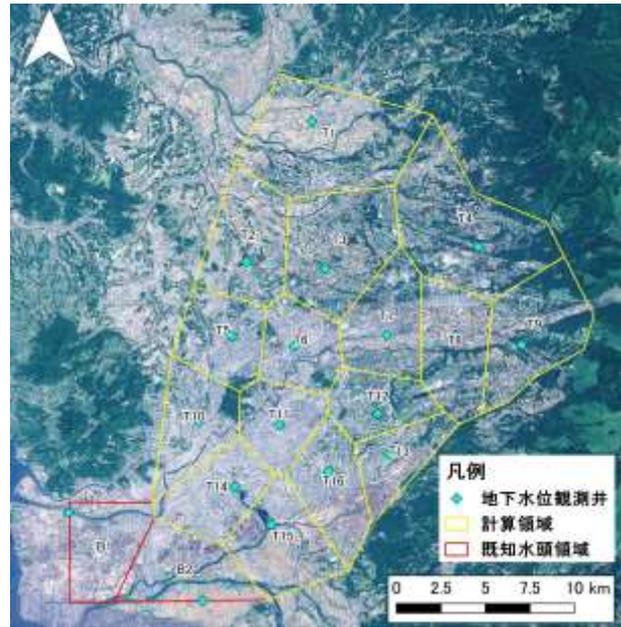


図1.7 Thiessen polygonと計算領域  
(「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

#### 4. 結果及び考察

##### 1) 阿蘇カルデラ内の水文調査

##### 阿蘇カルデラの減水深・涵養量

減水深は、中干し前の阿蘇谷では4.4～102.0 mm/day(平均33.6 mm/day)、南郷谷では12.0～127.8 mm/day(平均47.5 mm/day)であった。中干後はクラックの発生により減水深は増加しており、阿蘇谷では13.3～235.2 mm/day(平均74.1 mm/day)、南郷谷では29.3～217.9 mm/day(平均87.6 mm/day)であった。「ざる田」と呼称される白川中流域の減水深は、中干前では20～75 mm/day、中干後では70～200 mm/dayであることから、阿蘇の水田は白川中流域に近い浸透能力を持つことが判明した。2015年における主食用水稲とWCS(飼料用稲)の水田からの地下水涵養量は、阿蘇市では約1.5億 $m^3$ 、南阿蘇村では約0.8億 $m^3$ であり、阿蘇の水田が、水循環の中で果たす役割は大きいと考えられる。

##### 灌漑用水路の基底流量

南郷谷の基底流量の総流量は約38.7万 $m^3$ /日であり、国土交通省が白川の流量を観測している妙見橋の上流に限ると約35.9万 $m^3$ /日であった。2019年2月の妙見橋における白川の平均流量は60.7万 $m^3$ /日<sup>8)</sup>であり、観測した白川に流れ込む水量よりも多い。主な要因として、白川が自噴域を数kmにわたり流下する過程で、河床から地下水が湧出していることが考えられる。一方、阿蘇谷の総流量は、約65.4万 $m^3$ /日で、南郷谷の約1.7倍であった。黒川の水位・流量は観測されていないため、2015年2月の立野観測所と妙見橋観測所における白川の流量の差分に立野第2発電所の取水量を加えることで黒川の流量を推定すると約124.5万 $m^3$ /日で、南郷谷と同じように川に流れ込む水量より河川流量の方が多く、河床からの地下水湧出があると考えられる。

##### 南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量

南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量観測結果を図1.8および表1.1に示す。表の最下段には、各湧水で公示されている湧出量を示した。平均湧出量が公示湧出量を上回っていたのは、塩井社水源、池の川水源、明神池名水公園、妙見神社の池の4か所だけであった。竹崎水源は、公示湧水量120 $m^3$ /分の3分の1程度であるが、横を流れる両併川に湧水が流出しており、この分を含めると湧出量は100 $m^3$ /分を超える。竹崎水源について、湧出量が多いとされている白川水源では、3分の2程度まで湧出量が低下していることが分かった。

南阿蘇村湧水群のうち、塩井社水源が熊本地震直後から枯渇した。熊本地震が発生した2016年の南郷谷白水の地下水位は、本震直後の4月16日(水位465.5m)から4月30日(水位467m)までに1.5mの上昇があっ

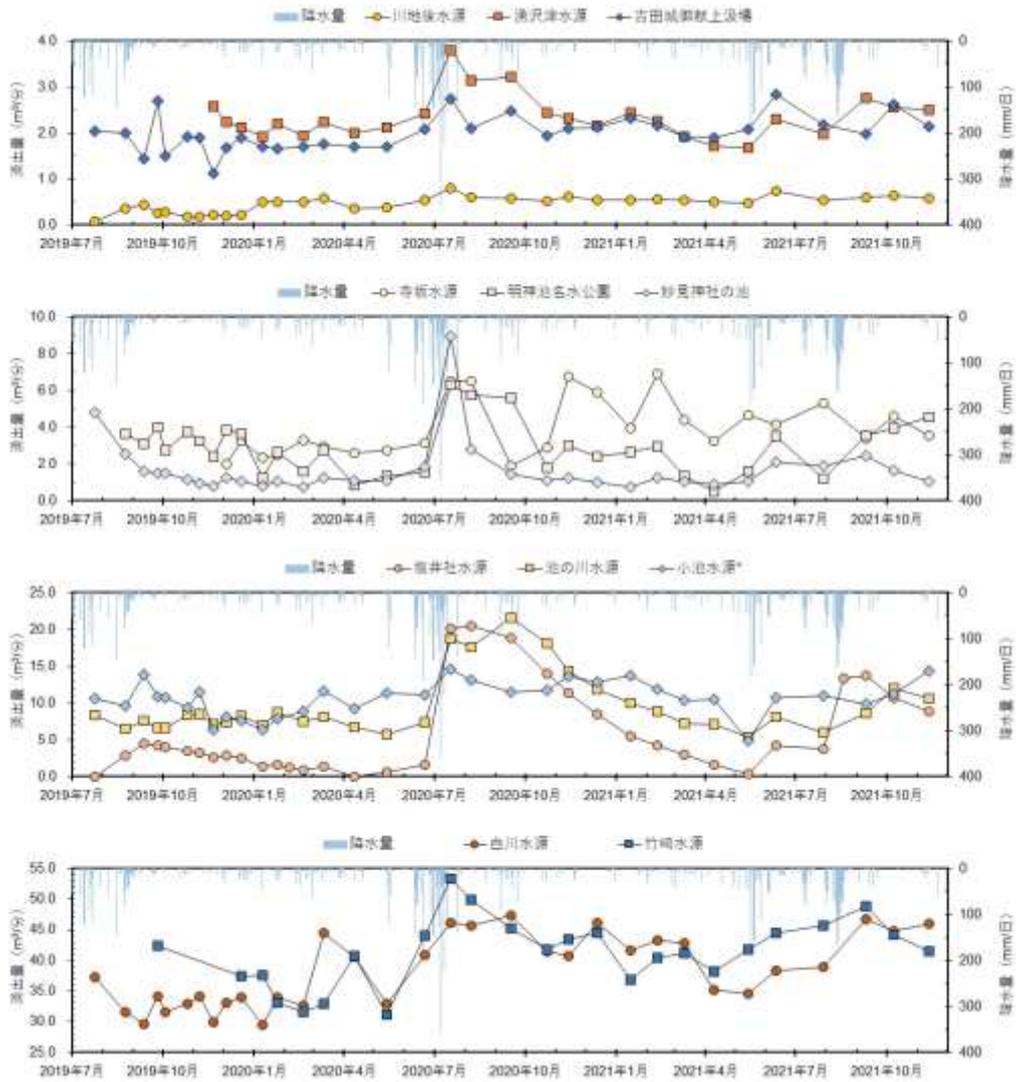


図1.8 南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量変化

表1.1 南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量(m³/分)

	塩井社水源	川地後水源	寺坂水源	湧沢津水源	池の川水源	小池水源	吉田城跡献上汲場	明神池名水公園	竹崎水源	妙見神社の池	白川水源
平均	5.8	0.5	4.0	2.3	9.5	10.6	2.0	2.9	41.3	1.7	38.3
最大	20.5	0.8	6.9	3.8	21.6	14.7	2.8	6.3	53.3	8.9	47.4
最小	0.0	0.1	1.9	1.7	5.4	4.9	1.1	0.5	31.2	0.7	29.4
標準偏差	5.9	0.2	1.5	0.5	4.1	2.4	0.4	1.4	5.6	1.5	5.8
公示	5	1	5	5	5	13	5	2	120	1	60

たが、例年だと地下水位は低下している時期である。この地下水位上昇は熊本地震による強い揺れによって中央火口丘の山体が激しく揺られ、山体の斜面に含まれた水が下流に押し流されたために発生したと考えられる。したがって、山体中途の自噴地帯の境界部に位置する塩井社水源周辺では地下水位が大幅に低下したために、枯渇したと考えられる。南阿蘇村の地震後の調査によると、2016年9月8日の段階で湧水池の直下の地下水位が池の底から87.6 cm下にあることが確認されている。その後、地下水位が上昇し、塩井社水源の湧出は、2018年7月に一旦復活し、その後徐々に低下し、2019年2月には溜水の状態になった。2019年8月下旬の秋雨前線による降雨で復活し、図1.8に示したように9月上旬には毎分4m³を超えたが、降雨による補給がなかったため湧水量は徐々に低下し、2020年4月に再び湧出は停止した。

2020年5月には降雨により再び復活し、7月の集中豪雨により湧出量は約20m<sup>3</sup>/分まで増加した。梅雨後は、2019年と同じように減少の一途をたどり2021年の梅雨前5月には湧出停止直前の0.3m<sup>3</sup>/分まで減少したが、梅雨の降雨により湧出量は約14m<sup>3</sup>/分まで増加している。このように、塩井社水源は復活し、梅雨の降雨により大幅に湧出量が増加するものの、翌年の梅雨まで湧出が維持できない状況にある。梅雨の降雨により湧出量が増加する傾向は、他の湧水についても確認されたが、塩井社水源ほど顕著ではない。

### 灌漑用井戸の位置・数

灌漑用井戸は、少なくとも南郷谷では321本、阿蘇谷では343本あることが明らかになった。この数は、熊本県が報告している数より圧倒的に多く、報告されている揚水量は正確ではないことがわかった。灌漑用井戸の分布を図1.9に示す。図中には、調査時に明らかとなった自噴井戸の分布を合わせて示した。南郷谷では、白川左岸の南阿蘇村疏水群、右岸の南阿蘇村湧水群と白川水源、高森湧水トンネル周辺では、これらから灌漑用水を供給するため、井戸はほとんど確認できなかった。阿蘇谷では、中央火口丘側に井戸が集中しており、外輪山側では主に湧水の水を使用していると考えられる。阿蘇谷では、河川ポンプや排水路の水を再利用するための還元ポンプも多数あり、灌漑用井戸のない場所では、これらのポンプにより水が供給されている場合もある。

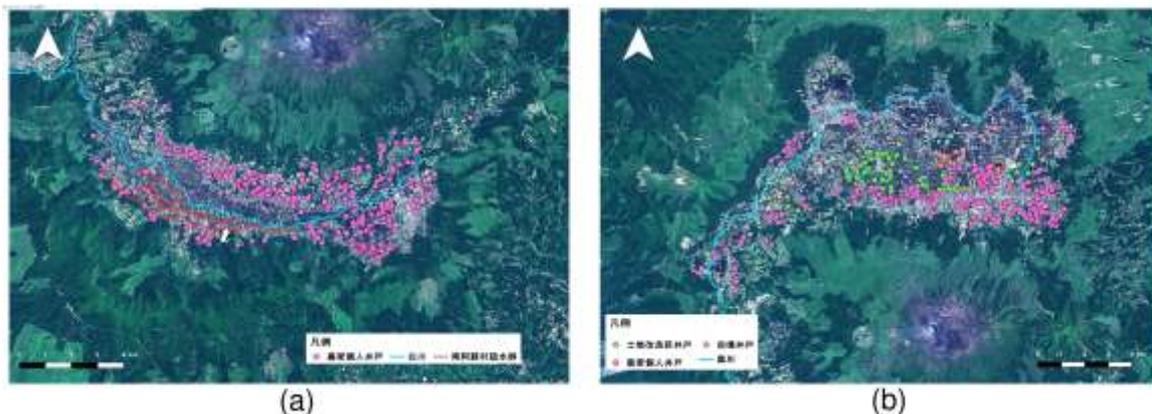


図1.9 かんがい用井戸および自噴井戸の分布、(a)南郷谷、(b)阿蘇谷  
(「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

### 南郷谷の冬季湛水

図1.10に冬季湛水の調査結果を示す。冬季湛水は10月下旬から翌年の3月下旬まで継続して実施されている圃場もあれば、ある期間のみ実施している圃場もあった。そのため、実施面積は一定ではなく、徐々に増加し、2月にピークとなって、その後急速に減少していった。冬季湛水による涵養量は、ピーク時で1日約5万m<sup>3</sup>であり、全期間で約520万m<sup>3</sup>に達した。この涵養量は、南阿蘇村の主食用水稲とWCSの水田からの地下水涵養量約8,000万m<sup>3</sup>の約6.5%に相当する。

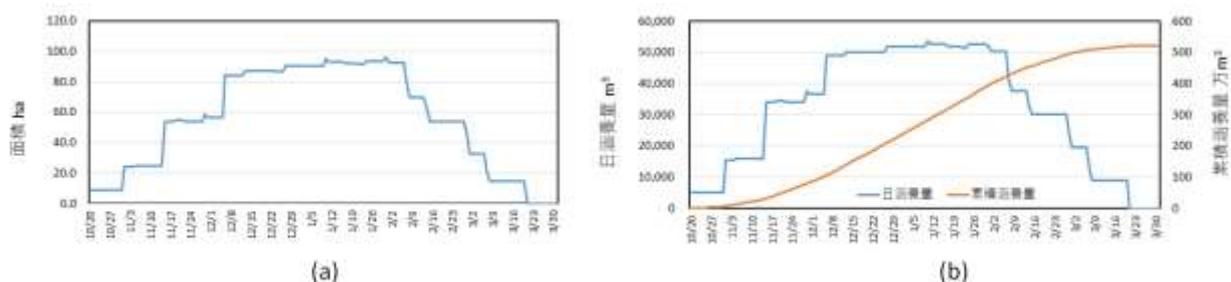


図1.10 冬季湛水の実施状況、(a)面積、(b)涵養量

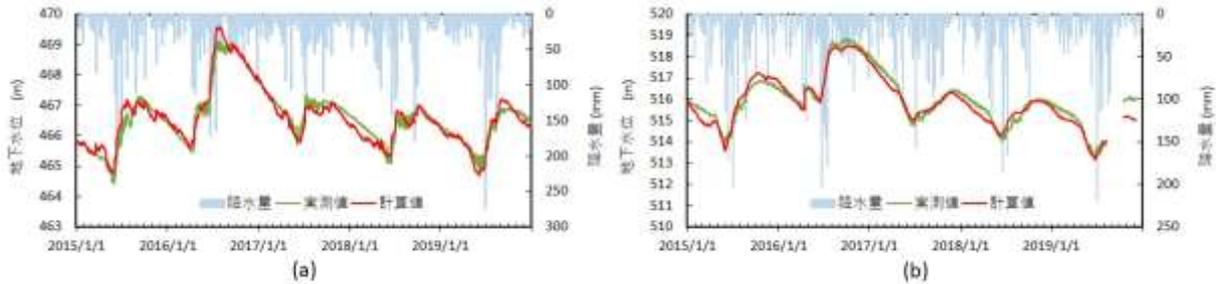


図1.11 水収支計算結果、(a)白水地下水観測井戸タンク、(b)一の宮地下水観測井戸タンク

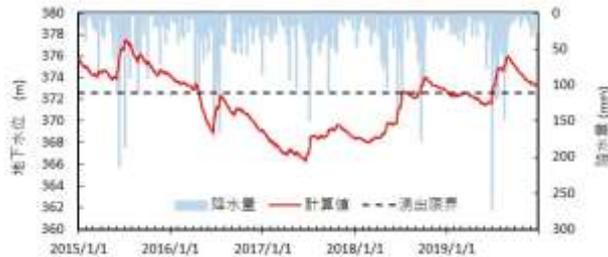


図1.12 塩井社水源が属するタンクの水位変化

## 2) 阿蘇カルデラ内の水循環シミュレーション

図1.11に、南郷谷の白水地下水観測井、阿蘇谷の一の宮地下水観測井における地下水位の実測値およびこれらの井戸が属するタンクの地下水位の計算結果を示す。また、図1.12には塩井社水源が属するタンクの地下水位の変化を示す。佐渡ら<sup>9)</sup>を参考に、本震が発生した2016年4月16日に透水係数や有効間隙率の水理パラメータを上昇させることで地震直後の急激な地下水位の上昇、塩井社水源の枯渇を再現することができた。すなわち、山体が保持していた地下水が排水されたことで塩井社水源は枯渇し、排水された地下水が流れ込んだ低地部では地下水位が上昇したと考えられる。地震後は、上昇させた水理パラメータを徐々に低下させる(元の状態へ戻していく)ことで、地震後の地下水位の変化と塩井社水源の回復過程を再現することができた。すなわち、時間経過に伴う目詰り等による透水係数の低下現象<sup>9)</sup>が実際に起きていると考えられる。地下水位の再現性を定量的に評価するためにNash-Sutcliffe係数(以降、NS係数)を計算すると、白水と一の宮は両方とも0.93となった。NS係数が0.7を超えたことから、地下水位の再現性は高いと言える。南郷谷では透水係数と有効間隙率を計算期間では元の状態に戻さない、阿蘇谷では透水係数は2019年に元の状態に戻す、有効間隙率は計算期間では元の状態に戻さないことで高い再現性が得られている。塩井社水源の湧出量が梅雨前には枯渇するか、枯渇しそうなほどまで減少しているのは、透水性が高い状態が続いており、地下水が貯留されにくくなっているためと考えられる。

図1.13と図1.14に南郷谷と阿蘇谷の水収支を示す。1982年と2015年を比較すると、南郷谷では2015年のほうが降水量は多いが地下水涵養量は減少しており、水田面積減少の影響が表れている。2016年に発生した熊本地震によって、塩井社水源が枯渇した一方で、低地部では山体地下水の排水による影響で地下水位が上昇し湧水の湧出量は増加したと考えられる。また、2016年は豪雨が発生したこともあり、地下水涵養量は増加し、湧水・基底流出量は増加している。水田が被災したことで、作付けできない圃場も多かったが、全体の3%程度と小さい。地震により、局所的に水循環は変化しているものの、阿蘇カルデラ全体では顕著な水循環の変化は認められない。

図1.15に、南郷谷で針葉樹を草原に戻した場合の地下水涵養量、湧水量・基底流出量、地下水貯留量の年間増加量を示す。針葉樹が減少し、草原が増加することで涵養量は増加する結果となった。針葉樹の面積が10%(約4.1km<sup>2</sup>)減少するごとに、地下水涵養量は約100万m<sup>3</sup>増加している。地下水涵養量が増加することで、地下水貯留量が増加し、湧水量・基底流出量も増加する。針葉樹の面積が10%減少するごとに、地下水貯留量は約51万m<sup>3</sup>、湧水量・基底流出量は約45万m<sup>3</sup>増加している。また、水田をすべて畑地に

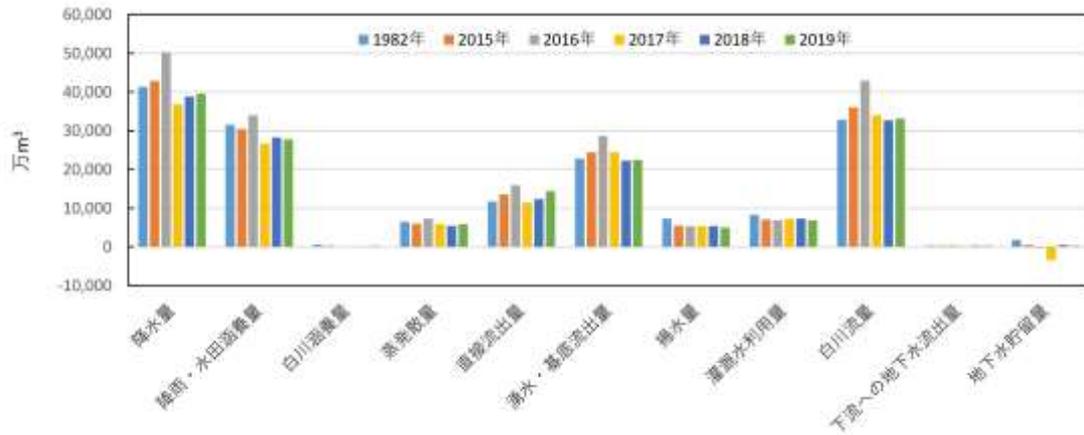


図1.13 南郷谷の水収支

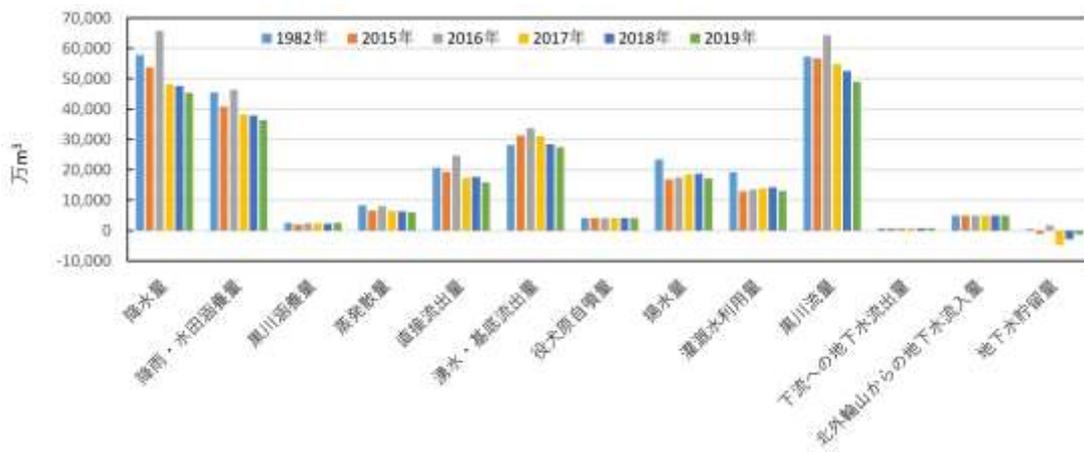


表1.14 阿蘇谷の水収支

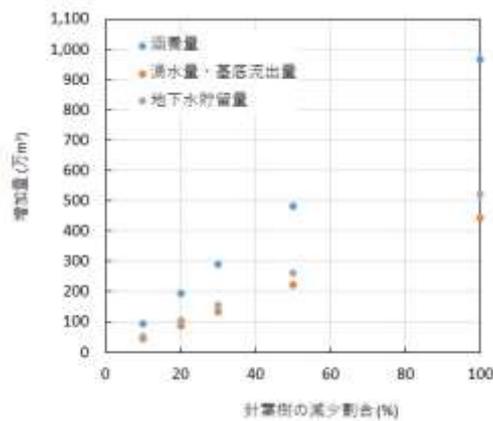


図1.15 針葉樹減少の効果

転換した場合、湛水による水田涵養がなくなるため、涵養量は6,444万 $\text{m}^3$ 減少となった。一般に、畑地は年間を通じて作物を栽培する場合、畑の耕起を頻繁に行う。熊本の表層土を構成する黒ボク土（火山灰土）は高い浸透特性を有しているため、降雨浸透が促進され、地下水涵養量は大きくなるが<sup>10)</sup>、作物の収穫後、放置すると畑の土壌表面は固くなり浸透能力が低くなる。そのため、畑地より高い地下水涵養能力がある水田がなくなること、湧水や河川水（自然に湧き出ている水）を地下に戻す機能が失われる。つまり、水を留めることができず、地下水貯留量は352万 $\text{m}^3$ の減少となった。その結果河川流量が増加し

た。また、湧水・基底流出量は595万 $m^3$ の減少となった。これらを総合すると、水田の維持と草原の維持・復活はカルデラ内の水循環を健全化する方法であると考えられる。

### 3) 立野火口瀬における地下水流動調査

立野火口瀬に2本の観測井戸を設置した。両地点とも深度約55mに基盤岩である先阿蘇火山岩類が確認された。第1観測井の位置では基盤岩の上位に玉石混り砂礫の立野層が確認された。立野層は、大礫が多く点在しており、地下水流動層では礫間充填物が流亡していた。第2観測井の位置では、基盤岩と立野層間に立野層には見られない直径5mを超える巨礫を含む先阿蘇土流堆積物が確認された。

立野層を対象とした透水試験(試験深度36~37m)では、平均透水係数は $8.96 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ と高い値が得られた。

観測井完成時の地下水位は深度約35mの立野層中にあり、地表を流れる白川の河床より約30m深い深度であった。白川の河床に堆積している火山灰土が不透水層として働いているため、白川から地下への水の浸透はないと考えられる。

図1.16に、地盤情報緊急公開サイトのボーリングデータ<sup>11)</sup>から作成した立野火口瀬を対象とした推定地質縦横断面図(図1.5におけるA-A'断面およびB-B'断面)を示す。観測井で地下水位が確認された立野層は約25~90mの厚さを持ち、白川と黒川の合流点付近まで続く帯水層を形成していると考えられる。立野層中にある鮎返りの滝溶岩や立野層上位の赤瀬溶岩は、それぞれ南郷谷と阿蘇谷から続いている地層であることから、地質的に阿蘇カルデラと立野火口瀬は連続している。そして、これらの溶岩の割れ目を通して、阿蘇カルデラから地下水が流れていると考えられる。

図1.17に、2021年7月21日からの地下水位の観測結果を示す。地下水位は、第2観測井(熊本地域側)より第1観測井(阿蘇カルデラ側)のほうが高く、阿蘇カルデラから熊本地域の方向へ地下水が流れていることを示している。また、地下水位には線形関係が認められ、地下水位が連動していることを示している。地下水位の変動特性として、梅雨の大量の降雨により顕著に上昇し、その後低下する典型的な降雨涵養型といえる。降雨により水位が上昇するにつれて水位差は大きくなっており、これは下流へ流れる

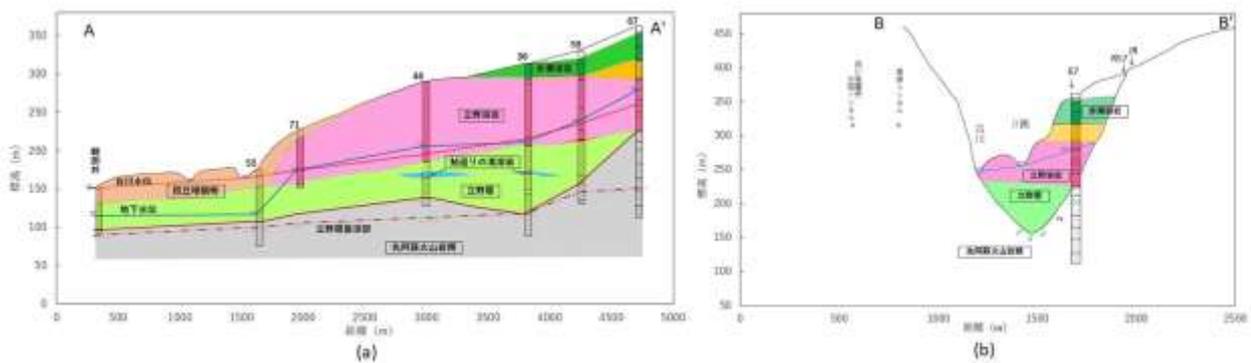
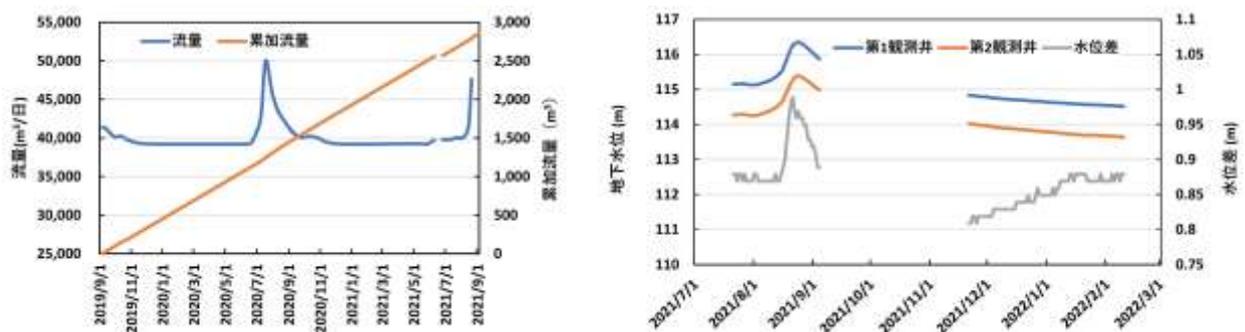


図1.16 推定地質縦横断面図、(a)A-A'断面、(b)B-B'断面



(a) 地下水流下量

(b) 地下水位の関係

図1.17 地下水位の観測結果と流量計算結果

地下水量を増加させるために水位上昇に伴い動水勾配が大きくなることを表している。

地下水位の観測結果から立野火口瀬を流れる地下水量を計算すると、年間約1,500万 $\text{m}^3$ となった。2020年の白川中流域の水田の涵養量は約4,900万 $\text{m}^3$ 、湛水事業による涵養量が約2,100万 $\text{m}^3$ であり、合計約7,000万 $\text{m}^3$ が阿蘇カルデラから流れる白川の水を使うことで地下に涵養される<sup>12)</sup>。すなわち、阿蘇カルデラから直接熊本地域へ流れる地下水量と水田や湛水事業によって涵養される地下水量の合計約8,500万 $\text{m}^3$ が阿蘇カルデラから熊本地域へ供給されていると言える。熊本地域の2009～2017年年の平均地下水涵養量は約5億5,000万 $\text{m}^3$ <sup>13)</sup>であり、阿蘇カルデラから流出した白川と地下水流出の熊本地域地下水への涵養は全涵養量の約15%に相当する。そのため、阿蘇カルデラから熊本平野部の熊本地域地下水は運動していると考えられる。

#### 4) 熊本地域の水文調査

##### 熊本平野の基盤岩分布

図1.18に熊本平野の基盤岩上面の深度分布を示す。熊本地盤研究会<sup>14)</sup>によれば、本地域の基盤上面の深度分布の特徴は以下の2点である。菊池川中流域～合志川流域に-100～-50mの盆状地形が形成されている。白川中流域の尾根状の高まりをはさんで南には秋津川に沿いに下って緑川流域まで-300～-100mの谷地形が形成され、有明海の方向へ延びている。

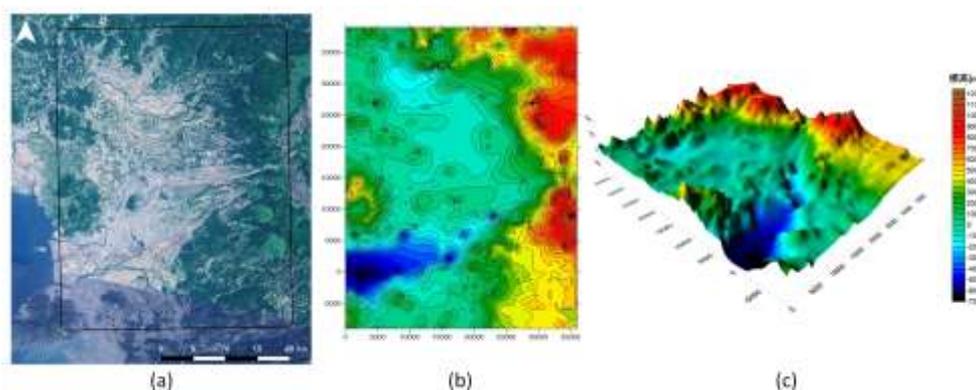


図1.18 熊本平野部の基盤分布、(a)調査範囲(「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用)、(b)基盤深度の標高図、(c)基盤深度の標高3D図

##### 地盤の透水係数

ボーリングデータをもとに推定した熊本地域内の地盤の透水係数は、 $2.58 \times 10^{-5}$ から $9.73 \times 10^{-1}$  cm/secであった。透水係数の高い領域は、白川中流域の「地下水プール」と呼ばれる地域と一致していた。

##### 地下水位の観測データ

図1.19に、熊本県管轄の大津、菊陽、水前寺地下水位観測所(図1.5)で観測された熊本地震前後の地下水位を示す。

熊本地域では毎年6月下旬から地下水位が上昇を開始し、10月上旬にピークを迎える。熊本地域では、水田での作付けが6月下旬に一斉に実施され、10月上旬に収穫される。ゆえに、これらの地下水位の変化は、梅雨時の降雨に加え、水田による涵養と関係している。地下水位の変化パターンは、毎年同じであるが、2016年4月の熊本地震によって大きな変化が現れた。通常ならば地下水位は6月下旬まで低下するはずが、地震後に地下水位が異常上昇を開始した。この異常な地下水位の変化は、地震によって透水性が増加したことによる山体地下水の排水<sup>15)、16)</sup>に起因していると考えられる。山体(外輪山)に近い大津観測井では急激に地下水が上昇するが、下流の水前寺観測井や菊陽観測井は外輪山から離れており、上流から徐々に山体地下水が流れることで地下水位の上昇は緩やかである。

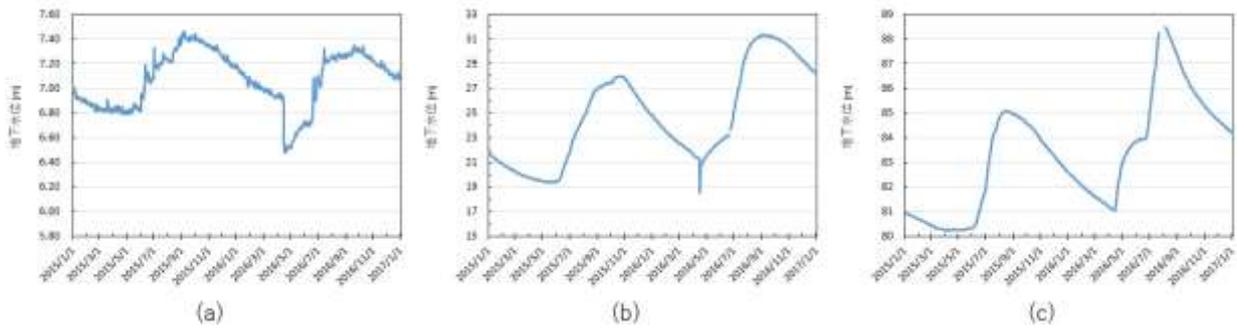


図1.19 地下水位の時間変化、(a)水前寺、(b)菊陽、(c)大津

**水田の減水深・涵養量**

図1.20に、大字ごとの水田の1日あたり涵養高(=作付け期間中の総涵養量/水田面積/湛水日数)分布を示す。菊鹿盆地は、30~50mm/日と比較的低い地域で、甲佐町、御船町の緑川流域は、40~60mm/日程度、益城町は、木山川下流域で10mm/日程度、上流になると20~30mm/日に上昇する。西原村は60~70mm/日程度、白川中流域は菊陽の一部地域で50mm/日程度で、他は70~100mm/日と高い値になっている。大津町北部は100mm/日を超える場所がある。このように、「ざる田」と呼称される白川中流域の水田では、他の地区に比べ涵養高が高いことがわかる。

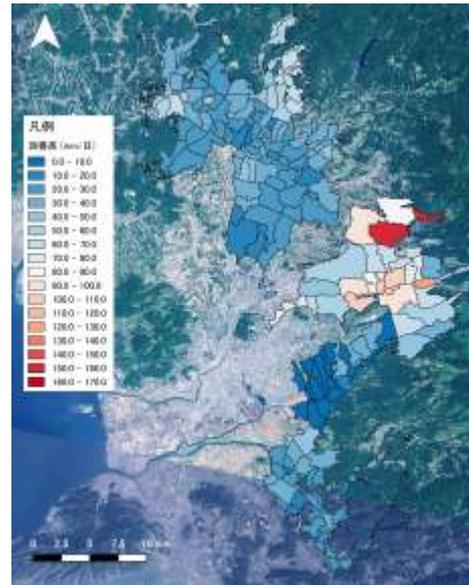


図1.20 大字ごとの涵養高

**江津湖と井寺・下六嘉湧水群の湧水量**

江津湖と下六嘉湧水群の湧水量の変化を図1.21に示す。江津湖の湧水量は約30~60万m<sup>3</sup>/日で推移しており、地下水位の変化(図1.19)と同様に、10月から翌年5月にかけて低下し、梅雨と水田の影響で上昇し、10月にピークを迎える傾向がある。江津湖の湧水量と地下水位を線形で近似すると0.9を超える高い相関が得られる<sup>17)</sup>。江津湖の年間湧水量は、都市化や減反政策による地下水涵養量の減少により、観測開始時から低下傾向にあり2005年に最小となった<sup>18)</sup>。2006年には、2004年に白川中流域で開始された湛水事業の効果により湧水量は回復したものの、その後はあまり変化がない<sup>18)</sup>。井寺・下六嘉湧水群の湧水量は約25~45万m<sup>3</sup>/日で推移している。江津湖と同様に観測開始時から低下傾向にあったが、2005年以降やや上昇傾向に転じている。井寺・下六嘉湧水群の湧水量は、かんがい用水を制御するために開閉する浮島水門の影響を敏感に受けている。

(「全国ランドサットモザイク画像」<sup>1)</sup>を使用。)

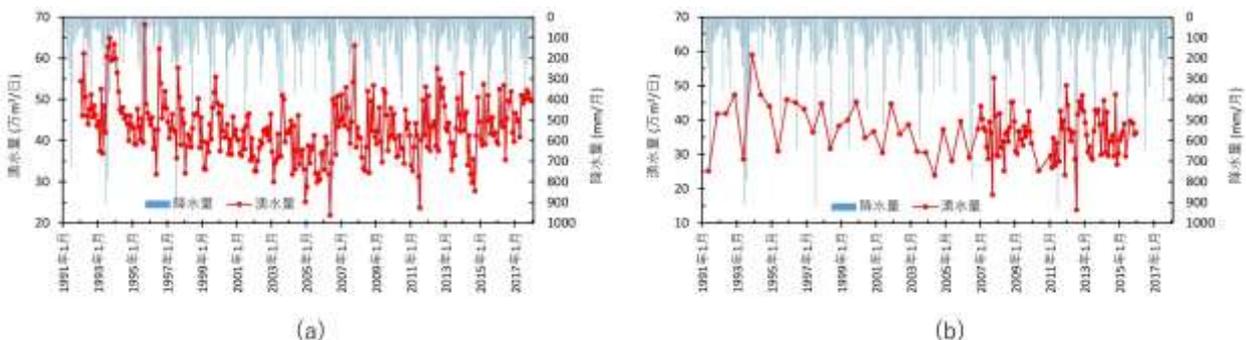


図1.21 湧水量の時間変化、(a)江津湖、(b)井寺・下六嘉湧水群

5) 熊本地域のThiessen Polygonによる水循環シミュレーション

これまで示してきたデータをもとにThiessen Polygon型のタンクモデルで水循環シミュレーションを行った。地下水位の計算結果と観測データの比較の一例を図1.22に、水収支の結果を表1.2に示す。熊本地域の地下水帯は、水田涵養や畑地・森林などからの降雨涵養の他に、阿蘇外輪山西側の山林・草原における浸透水の地下水流出によって補給されている。

熊本地震の強い揺れによって透水性が大きくなったことで、外輪山の地下水が大量に熊本地域の地下水帯に流出し、図1.22に示すように熊本地域の地下水は地震直後から異常な水位上昇を開始した。この流出分は、徐々に有明海側に流下したと考えられる。

表1.2に示すように、2015年では、地表面からの地下水涵養量が約4.2億 $m^3$ 、外輪山から熊本地域の地下水帯への流出が約1.3億 $m^3$ 、立野火口瀬を通じての地下水流出が約1,460万 $m^3$ なので、熊本地域の地下水帯に供給された全水量は約5.7億 $m^3$ と推定された。また、阿蘇カルデラから発する白川の水を利用する白川中流域の水田と湛水事業からの合計涵養量は約7,200万 $m^3$ であるので、外輪山からの流出分、立野火口瀬を通じての流出分と合わせた約2.2億 $m^3$ が阿蘇山から熊本地域の地下水へ供給されていると推定された。すなわち、阿蘇山から熊本地域の地下水帯に供給される水量は、熊本地域の地下水帯に供給される全水量の約38.3%に相当し、大きな割合を占める。したがって、熊本地域の地下水帯と阿蘇山は地域水循環共生圏を構成していると考えられる。そのため、下流側の熊本都市圏の住民や地下水を利用する企業にとって阿蘇山の農地や草原の保全、農畜産業への援助や共同は重要な施策となる。

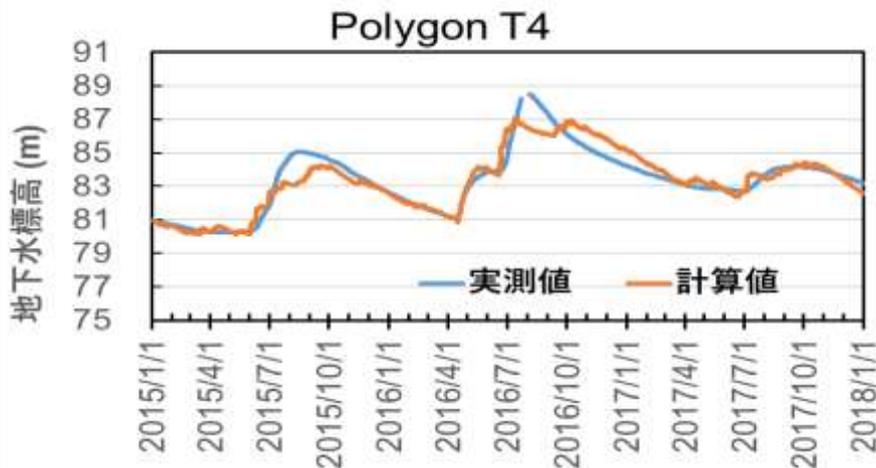


図1.22 地下水位の計算結果と観測結果の比較 (Polygon 4)

表1.2 水循環シミュレーション結果

	涵養量 (万 $m^3$ )						流出量 (万 $m^3$ )		供給量 (万 $m^3$ )	年降水量 (mm)
	水田	畑	森林	その他	湛水事業	合計	外輪山から熊本地域	立野火口瀬から熊本地域	熊本地域地下水帯へ (涵養量+流出量)	益城
2015年	13,165	15,507	8,338	3,266	1,985	42,262	13,010	1,460	56,732	2240.5
2016年	8,762	17,123	9,590	3,672	453	39,601	14,959	1,464	56,024	2652.5
2017年	9,332	11,484	6,539	2,566	1,613	31,534	9,857	1,460	42,851	1882.5
	涵養量 (万 $m^3$ )		流出量 (万 $m^3$ )		供給量 (万 $m^3$ )	割合 (%)				
	白川中流域水田	湛水事業	外輪山から熊本地域	立野火口瀬から熊本地域	阿蘇山から熊本地域地下水帯へ	熊本地域地下水帯への全供給量に対する阿蘇山からの供給量				
2015年	5,283	1,985	13,010	1,460	21,739	38.3				
2016年	2,542	453	14,959	1,464	19,419	34.7				
2017年	4,027	1,613	9,857	1,460	16,957	39.6				

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、阿蘇カルデラ内から熊本地域の水循環を表現できるモデルを構築し、草原面積の変化、水田等土地利用の変化による水循環への影響、熊本地震等の災害による影響を評価した。この水

循環シミュレーションの結果から、特に、阿蘇カルデラ内の水収支計算の結果、阿蘇谷は草原の面積が十分な大きさを持っているが、南郷谷は面積が少なくなっており、水循環に影響が出てきていることが推定された。その結果、阿蘇カルデラ内では、水循環における草原、水田等農畜産業の重要性が明らかとなり、所記の目標は達成できた。また、熊本地域の水循環シミュレーションの結果、熊本地震による阿蘇外輪山からの地震の揺れによる強制排水の結果、大量の水が排水されたことによる地下水位への影響が再現された。そして、阿蘇カルデラから地下水への直接流出や白川の水を灌漑水として利用する白川中流域の水田及び湛水事業による地下水涵養が阿蘇と熊本地域を結び付けていることが明らかとなった。こうしたことから、阿蘇カルデラをはじめとした中山間農地における土地利用の変化による影響が評価され、熊本地震からの創造的復興策として、草原及び水田維持のための持続可能な農畜産業を構築するように下流都市域の住民や地下水を利用する企業が上流との交流を活発化することが必要とされる。以上のようなことが明らかとなり、「目標以上の成果を挙げた」と考えられる。

## 6. 引用文献

- 1) 国土交通省国土地理院：全国ランドサットモザイク画像(データソース：Landsat8画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST) , Landsat8画像 (courtesy of the U. S. Geological Survey) , 海底地形 (GEBCO) )、<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- 2) 島野安雄：文星紀要、8、43-67 (1997). 阿蘇カルデラ内における湧水の水文学的研究
- 3) 熊本県：平成31年度地下水採取状況について  
<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/49/91211.html>
- 4) 南阿蘇村：第2次南阿蘇村総合計画 改訂版、  
[https://www.vill.minamiaso.lg.jp/kiiji003661/3\\_661\\_1\\_5930.pdf](https://www.vill.minamiaso.lg.jp/kiiji003661/3_661_1_5930.pdf)
- 5) 全国農業会議所：全国農地ナビ、<https://www.alis-ac.jp/SelectPrefecture>
- 6) 国土交通省国土地理院：シームレス空中写真、<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- 7) H. N. TYSON Jr. and E. M. WEBER: J. Hydraul. Div., 90, 4 (2019) Groundwater management for the nation's future-computer simulation of groundwater basins
- 8) 国土交通省：水水文質データベース、<http://www1.river.go.jp/>
- 9) 佐渡耕一郎、井手 淨、田原康博、嶋田 純：嶋田 純、細野高啓編、成文堂、巨大地震が地下水環境に与えた影響、135-150 (2020). 塩井社水源の地震に伴う枯渇と2年後の回復
- 10) 吉井貴紀：東海大学大学院平成20年度修士論文(2008). 熊本地下水涵養域高遊原台地の林地・畑地における浸透能と降雨涵養について
- 11) 国土地盤情報センター：九州豪雨災害 [復旧支援] 地盤情報緊急公開サイト、  
<https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-2/>
- 12) 市川 勉：2020年度(令和2年度)白川中流域における湛水事業による地下水涵養効果評価報告書
- 13) 熊本県：熊本地域地下水総合保全管理計画に基づく第3期行動計画、  
<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/49/5554.html>
- 14) 熊本地盤研究会：熊日出版、114p (2019) . 熊本地域の地質断面図-地下地質と熊本地震-
- 15) T. HOSONO, C. YAMADA, M. MANGA, C.-Y. WANG and M. TANIMIZU: Nat. Commun., 11, 2776 (2020) Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains
- 16) M. KAGABU, K. IDE, T. HOSONO, K. NAKAGAWA and J. SHIMADA: J. Hydrol., 582, 124464 (2020) Describing coseismic groundwater level rise using tank model in volcanic aquifers, Kumamoto, southern Japan
- 17) 市川 勉：水利科学、41, 6, 1-17 (1998) 熊本地域における降雨と地下水位、湧水の関係について (1) 湧水量と地下水位
- 18) T. ICHIKAWA, K. NAKAGAWA and R. BERNDTSON: Environ. Earth Sci., 79, 142 (2020) Earthquake effects on artificial groundwater recharge efforts in south Japan

## II-2 地震による阿蘇草原等の土地利用の変化が水循環に及ぼす影響の評価

東海大学

基盤工学部／教授

岩崎 洋一郎

情報理工学部／特任教授

長 幸平

基盤工学部／教授

藤本 邦昭

九州教養教育センター／教授

福崎 稔

経営学部／准教授

的場 英行

非常勤講師

長野 克也（令和元年度～令和2年度）

農学部／教授

村田 浩平

### 【要旨】

サブテーマ2では、衛星画像を用いて阿蘇地域（阿蘇カルデラの白川・黒川流域）、熊本地域（地域外の菊池市を含む）における土地被覆分類を行い、土地利用の変化を評価する。また、草原および森林における浸透能力の調査を行う。さらに、阿蘇カルデラ内南阿蘇村周辺の草原や農地をドローン、踏査によって被災状況、地震後の土地利用の状況、生態系の変化を詳細に調査する。最終的に、土地被覆分類結果と水循環に関連する調査データをサブテーマ1での水循環モデル構築のための基礎データとして提供する。

以上の研究開発を具体的に実現するために、以下の7つの項目を立てて研究を推進した。

#### 1) 地震により阿蘇地域の土地被覆が裸地へ変化した領域の抽出と時間経過とともに拡大する裸地領域の原因調査

地震前後2時期の衛星画像解析により地震被害により裸地へ変化した領域を抽出した。さらに、地震後時間経過とともに拡大する裸地領域が複数箇所見られたので踏査による原因調査を行い、補修工事が実施されることが判明した。このような場所では、トラックや重機により地面が踏み固められ、浸透能力が低下する。地下水保全のために、植生を回復させる、透水性舗装に変えるなどの対応が必要と考える。個々の工事現場の面積は小さくても、衛星画像からは全体としては無視できない面積として観測できる。

#### 2) NDVI経時変化とGISデータなどを組み合わせた阿蘇地域土地被覆分類手法の開発および土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

地下水涵養量の推定を目的とした1981年、1996年、2015年、2016年（熊本地震後）の土地被覆分類図（10カテゴリーに分類）を作成した。JAXAが作成した土地被覆分類図では畑地の草原への誤分類が多いがそれがある程度改善され分類精度は高い。本手法は、衛星画像以外にGISデータなど有力なデータを組み合わせることで分類精度を上げている。

1981年から2015年までに、水田面積が約40%、草原面積は約30%それぞれ減少し、森林面積は増加した。阿蘇ファームランドの建設などにより建物用地は増加した。熊本地震により、土地被覆が変化しているものの、1981年からの変化と比べると、その変化は小さいことが判明した。

土地被覆分類の実施年では、地下水涵養量は土地被覆の面積変化より降水量の変化に依存していた。なお、降水量を同じと仮定した場合、草原面積の減少、森林面積の増加に伴い、地下水涵養量は減少している。したがって、常に言われているように草原面積の維持が重要である。

#### 3) SPOT 6/7衛星画像とGISデータなどを組み合わせた熊本地域土地被覆分類手法の開発および2016年熊本地震と豪雨に伴う土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

JAXAの土地被覆分類図よりも高精度な熊本地域の土地被覆分類図（9カテゴリーに分類）を生成した。本手法も、衛星画像以外にGISデータなど有力なデータを組み合わせることで分類精度を上げている。熊本地震・豪雨による被災田は1%程度、土砂崩壊地の面積は森林面積の1%にも満たない。地下水涵養量の減少についても全体の地下水涵養量の1%にも満たなかった。土砂崩壊による減少量は約0.17百万m<sup>3</sup>であるが、熊本地域の1,362人分の年間水消費量に相当する。

#### 4) 阿蘇地域の草原および森林における浸透能力の調査

ダブルリング法により、浸透能力を計測した。浸透能力の結果（平均値）は、広葉樹（194.9 mm/h） > 針葉樹（125.5 mm/h） > 草原（ネザサ・ススキ）（100.0 mm/h） > 草原（牧草・放牧）（23.9 mm/h）であった。なお、放牧地では、かなり小さい浸透能力（7.8 mm/h）が確認された。

#### 5) 熊本地震前後の阿蘇地域に生息するキムラグモ類の個体数の調査およびリモートセンシングによるキムラグモ類生息地の評価

斜面に巣を作って地中生活を行うキムラグモ類の個体数を調査した。地震の影響を生態系の変化、キムラグモ類の減少、として捉えた。キムラグモ類を生態系調査として用いた理由は、阿蘇カルデラ全体に分布・生息している、地震前から多くの地点で個体数を調査している、環境省のレッドリストに登録されている希少種である、斜面に巣を作るので地震の影響を受けやすい、斜面の土壌が水循環と関係している、点である。また、衛星リモートセンシングによりキムラグモ類生息地の被害評価を試みた。熊本地震によるキムラグモ類の減少地域は、水を通しやすい表土が地震により流れ落ち地下水涵養量が減少していると考えられる。

#### 6) ドローンを用いた高解像度リモートセンシングによるNDVIと3次元形状の計測および空間分解能の検討

ドローンを用いた高解像度リモートセンシングを実施し、ネザサ、ススキの領域を正確に区分できることを確認した。次に1.5mの空間分解能の衛星画像であれば、概ねドローンのNDVI強弱分布傾向に近いことを確認し、広域の植生分類ができる可能性があることを示した。この研究は次の項目7に繋がっている。ネザサ・ススキの分類のような詳細な植生分類が可能となれば、蒸発散量の異なる植生の面積計測から、地下水涵養量のより精度の高い推定が期待できる。ただし、ミクセルのため境界領域、混在した領域を正確に分離することは困難である。

#### 7) SPOT 6/7による松原ダム・下笠ダム流域の土地被覆分類

Google Mapから判読された教師データ（テーマ1サブテーマ1提供）を基にSPOT 7衛星画像（1.5m空間分解能）での植生分類（10カテゴリーに分類）を行った。特に、蒸発散量の異なるササ・ススキの分類が重要である。

なお、上記6)7)のドローンを用いた高解像度リモートセンシングのネザサとススキの分類への有効性やSPOT 6/7を用いた阿蘇カルデラ北外輪山の植生分類の結果は、課題番号S II-5-1(1)の研究に寄与し、追加的な成果である。

### 1. 研究開発目的

2016年4月に発生した熊本地震により、阿蘇・熊本地域は甚大な被害を受け、生活や産業に多大な影響が生じた。草原の破壊、地割れ、湧水の枯渇などの報告がなされており、阿蘇・熊本地域では、阿蘇カルデラを水源とする地下水が人々の生活を支えていることから、生態系サービスとしての地下水供給は極めて重要である。なお、草原の破壊、地割れ等は、土地利用の変化として捉えることができる。

阿蘇カルデラという特異の地層を有する地域の水循環において、熊本地震後の土地利用変化がどのような影響を及ぼしたのかを踏査を含めて子細に調査研究することは、国内外の環境問題調査研究としては、実施されていない。土地利用分布の変化を観測するためには、人工衛星から得られる画像の土地被覆分類を使用するのが最も有効である。しかし、特に阿蘇地域における地下水涵養に関係する草原、水田などの面積変化を評価した高精度な土地被覆分類は存在していない。また、水循環の観点から阿蘇地域と連携する熊本地域についても地下水涵養量を高精度に推定できる土地被覆分類が必要である。

以上のような研究背景から、サブテーマ2では、阿蘇地域、熊本地域における土地利用の変化を衛星データで評価する。また、草原および森林における浸透能力の調査を行う。さらに、阿蘇カルデラ内南阿蘇村周辺の草原や農地をドローン、踏査によって被災状況、地震後の土地利用の状況、生態系の変化を詳細に調査し、熊本地震による土地利用の変化が水循環に及ぼす影響の評価に活用する。最終的に、土地被覆分類結果と水循環に関連する調査データをサブテーマ1での水循環モデル構築のための基礎データとして提供する。

## 2. 研究目標

衛星画像およびGIS データなどを解析して、阿蘇地域の1981年、1996年、地震直前の2015年、地震後の2016年そして2040年代（将来予測）の土地被覆分類を行う。阿蘇地域は、雲に覆われることが多く短い年间隔での衛星画像収集は困難で上記の4年とした。そして各土地被覆の面積の経時変化を把握する。熊本地域についても地震後の2016年の土地被覆分類を行う。そして各土地被覆の面積を把握する。また、阿蘇地域の草原における浸透能力試験を行う。さらに、被災が大きかった阿蘇カルデラ内南阿蘇村周辺をドローン、踏査によって詳細に調査する。特に、地中生活を行うキムラグモ類の個体数を調査し、地震の影響をより高精度に生態系の変化として分析する。土地被覆分類結果と浸透能力試験結果をサブテーマ1へ提供する。最終的には、得られた結果から地域循環共生圏の構築に寄与する提言をまとめる。

## 3. 研究開発内容

### 1) 熊本地震により阿蘇地域の土地被覆が裸地へ変化した領域の抽出と時間経過とともに拡大する裸地領域の原因調査

熊本地震前後2時期のマルチスペクトル画像からNDVI（正規化植生指標）を計算し、その地震前後の差からNDVIの低下が大きかった領域を斜面崩壊、地滑りとして検出した。樹木で覆われていた斜面が崩壊して土砂が露出した場合、つまり裸地へ移行した場合NDVIが低下する。NDVIが斜面崩壊、地滑りの検出に有効であるという複数の報告がある。NDVIは(1)式で計算する。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

ここで、*NIR*は近赤外バンドの画素値、*R*は可視光赤バンドの画素値である。

NDVIは、-1から1までの値を示し、値が高いほど植生の活性度が高い。地震により水田などに発生した亀裂箇所も植生被覆が剥がされて裸地への移行と考えることができる。

NDVI算出画像は、4時期のSentinel-2A/2B（空間分解能10m）衛星画像を使った。すなわち、(1)地震前の2016年3月3日、(2)地震後の2017年3月28日、(3)2018年3月28日、(4)2019年4月7日である。そして、震災後3時期のNDVIと震災前のNDVIとの差から裸地への変化領域を検出した。なお、震災後の画像はNDVIの季節変動を避けるため、この3月3日に近い雲の極めて少ないものを選定した。

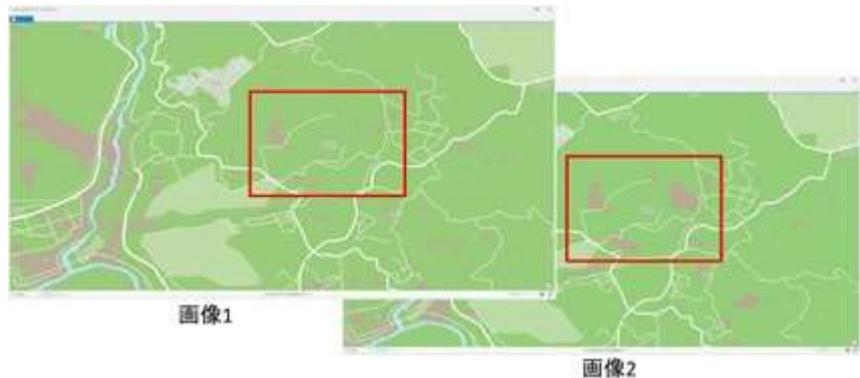


図2.1 熊本地震約1年後（画像1）と約3年後（画像2）の裸地領域の比較（赤枠：南阿蘇村の京大火山研究センター周辺）

図2.1の画像1は、2017年3月28日のNDVI－2016年3月3日のNDVI（約1年後との差）を、画像2は、2019年4月7日のNDVI－2016年3月3日のNDVI（約3年後との差）をそれぞれ示しており、裸地領域（0.2を超えて減少）を茶色で示している。画像1に対して画像2の裸地領域が拡大しており、このような熊本地震後時間経過とともに拡大する裸地領域が南阿蘇村を中心に複数箇所見られた。そこで、踏査によりその原因を調査した。

### 2) NDVI 経時変化と GIS データなどを組み合わせた阿蘇地域土地被覆分類手法の開発および土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

開発した手法は、阿蘇地域（阿蘇カルデラの白川・黒川流域）を①草原、②水田、③針葉樹、④広葉

樹、⑤畑地、⑥裸地、⑦被災田、⑧建物用地（ビニールハウスを含む）、⑨ゴルフ場、⑩河川（水域）に分類する手法である。各土地被覆の面積は、サブテーマ1で構築した水収支モデルの入力パラメータとして使用された。ここで土地被覆分類を行う対象年は、1981年、1996年、熊本地震前の2015年、熊本地震後の2016年、将来予測2040年代であり、1981年からの土地被覆の変化（特に、草原面積の減少）および熊本地震の影響を評価する。NDVIの季節変化を把握するためには、年間複数期において雲のない画像を収集する必要がある。しかし、阿蘇地域は、地理的特性から雲に覆われることが多く、雲のない画像が得られる頻度は極めて少なく、対象年は4年となった。使用した衛星画像は1981年がLandsat-3（空間分解能80m）、1996年がLandsat-5（空間分解能30m）、2015年・2016年がLandsat-8（空間分解能30m）である。

まず、NDVI以外のGISデータなどを基に土地被覆分類を行った。

①草原、⑧建物用地、⑨ゴルフ場、⑩河川については、環境省の1/2.5万植生図（vg67）<sup>1)</sup>を利用した。ただし、①草原がスギやヒノキ（針葉樹）に転換されたことを考慮し、草原の一部はNDVIにもとづき針葉樹として分類した。また、⑧建物用地はNDVIにもとづき、⑨ゴルフ場は対象年の衛星画像により、修正を加えた。さらに、⑩河川は国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービス<sup>2)</sup>の河川データやGoogle Mapにより、修正を加えた。

⑦被災田は、2017年水田台帳で「被災田」に分類されている圃場を全国農地ナビにより特定した。

⑧建物用地に含まれるビニールハウスは、2016年11月3日に撮影されたSPOT 6衛星画像から判読した。

次に残った土地被覆について図2.2に示すNDVIの季節変化から②水田、③針葉樹、④広葉樹、⑤畑地、⑥裸地を分類するBDT(Binary Decision Tree)を考案した。2016年は、2015年の土地被覆分類結果に、上記1)の手法により2時期のLandsat-8の衛星画像（2015年5月21日、2016年5月23日）から抽出した裸地を重ね、また、被災した水田を被災田へと変更した。将来予測（2040年代）は、2016年の土地被覆分類結果をベースに、被災田を水田に変更し、さらに、NDVIにより火入れが行われない草原を抽出し、森林（広葉樹）に変更した。

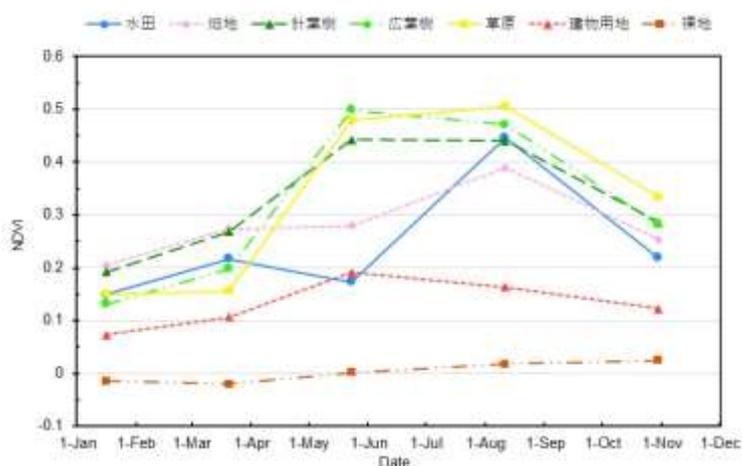


図2.2 阿蘇カルデラにおけるNDVIの季節変化

1981年、1996年、熊本地震前の2015年、熊本地震後の2016年の森林（針葉樹と広葉樹）、草原、水田、建物用地を対象に地下水涵養量の変化を評価した。森林と草原の地下水涵養量は、下津<sup>3)</sup>を参考に次の水収支式から求めた。

$$P = Q + E + D \quad (2)$$

ここで、 $P$ は降水量、 $Q$ は地下水涵養量、 $E$ は蒸発散量、 $D$ は直接流出量である。蒸発散量は、Zhangモデル<sup>4)</sup>から求めた。本モデルは、森林と草原の年間蒸発散量を年間降水量から求めるモデルであり、森林と草原の蒸発散量の差を表現しているため採用した。下津<sup>3)</sup>によれば、本地域の直接流出は、連続降雨が100-200mmに達した際に発生する。降水量が0mmの時間が3時間続く場合は異なる降雨イベントとみなすと、連続降雨が100-200mmに達する降雨イベントは非常に稀である。ゆえに、直接流出は無視した。

水田の地下水涵養量は、灌漑期のみを対象とし、天野ら<sup>5)</sup>を参考に次式から求めた。

$$Q_p = I_b n_b + I_m n_m / 2 + I_a n_a + I_i n_i / 2 \quad (3)$$

ここで、 $Q_p$ は水田の地下水涵養量（mm）、 $I_b$ と $I_a$ は中干前後の日浸透高（mm/day）、 $n_b$ と $n_a$ は中干前後の湛水日数、 $n_m$ は中干日数、 $n_i$ は間断灌水の日数である。日浸透高は減水深から、減水深調査日の蒸発散量を差し引くことで求め、 $I_b$ は35.5、 $I_a$ は64.6に設定した。また、 $n_b$ は42、 $n_m$ は10、 $n_a$ は31、 $n_i$ は36に設定

した。

建物用地からの地下水涵養量は、松浦ら<sup>6)</sup>を参考に次の水収支式から求めた。

$$Q_b = P_d - S_d - ET_d \quad (4)$$

ここで、 $Q_b$ は日涵養量 (mm/day)、 $P_d$ は日降水量 (mm/day)、 $S_d$ は日直接流出量 (mm/day)、 $ET_d$ は日蒸発散量 (mm/day) である。日直接流出量は、日降水量に流出係数0.95を掛けて求めた。日蒸散量はHamon式<sup>7)</sup>から求めた。降水量、日平均気温等の気象データは気象庁のHPからダウンロードした。

### 3) SPOT 6/7 衛星画像と GIS データなどを組み合わせた熊本地域土地被覆分類手法の開発および 2016 年熊本地震と豪雨に伴う土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

開発した手法は、熊本地域(地域外の菊池市を含む)を①水田、②畑地、③被災田、④草原、⑤芝地(ゴルフ場と公園)と雑草地、⑥森林(樹木)、⑦建物用地と道路、⑧裸地、⑨水域に分類する手法である。各土地被覆の面積は、サブテーマ1で構築したティーセンタンクモデルの入力パラメータとして使用された。ここで土地被覆分類を行う対象年は、熊本地震の発生した2016年である。分類は、主にGISデータとSPOT 6/7(空間分解能1.5m)により取得された衛星画像を使用した。

研究開発内容2)と同様に、はじめにGISデータなどを基に土地被覆分類を行った。

③被災田は、2017年水田台帳で「被災田」に分類されている圃場を全国農地ナビ<sup>8)</sup>により特定した。

④草原は、2015年・2016年は環境省の1/2.5万植生図(vg67)<sup>1)</sup>に修正を加えた。

⑦道路と⑨水域は、国土地理院の基盤地図情報<sup>9)</sup>に修正を加えることで、衛星画像から抽出できない細い農道や水路を分類した。

次に、地震および豪雨によって発生した土砂崩壊地(⑧裸地)を分類した。分類は、Yamazaki and Liu<sup>10)</sup>を参考に次式から行った。

$$NDVI_{\text{before}} - NDVI_{\text{after}} < -0.2 \quad (5)$$

ここで、 $NDVI_{\text{before}}$ は熊本地震前のNDVI値、 $NDVI_{\text{after}}$ は熊本地震後のNDVI値であり、それぞれ、SPOT 6/7により、2015年5月2日、2016年7月29日に取得された衛星画像から算出した。

その他の土地被覆は、ENVI5.6のclassification workflowに基づき、NDVIおよびRGBを教師データとして、最尤法を用いた教師付き分類により分類した。各土地被覆のNDVIは、図2.3に示すように土地被覆によって顕著な差異が認められる。分類の際には、誤分類を減らすために、農地マスクを作成し、農地(水田、畑地、ビニールハウス(建物用地))エリアがその他の土地被覆に分類されないようにした。最後に、カーネルフィルタにより、分類結果を平滑化した。ここでは、カーネルフィルタサイズの違いによる分類結果の改善について検討し、最適と思われるサイズを使用した。

地下水涵養量の評価は、涵養域と考えられる水田、畑地、被災田、草原、芝地と雑草地、森林とした。涵養量の計算方法は、熊本地域を対象に行政で利用されている方法(熊本県・熊本市<sup>11)</sup>;熊本県<sup>12)</sup>)を参考にした。

灌漑期における水田の地下水涵養量は、修正を加えた次式から求めた。なお、計算は熊本地域に属する市町村別に行った。

$$R_{pi} = A_p \times (W - E) \quad (6)$$

$$R_{pn} = (A_p/2) \times (W - E) \quad (7)$$

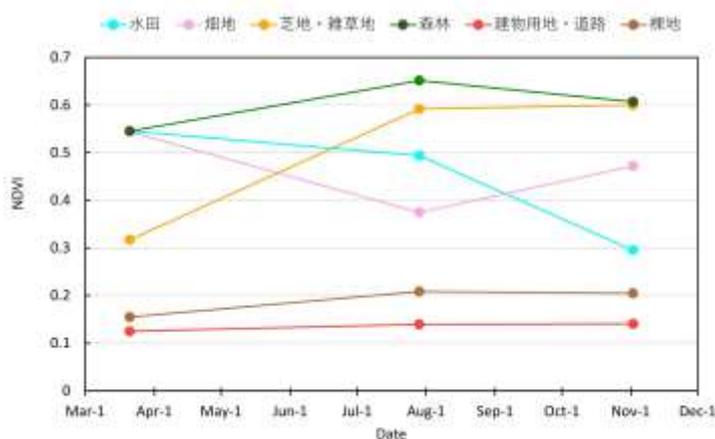


図2.3 熊本地域におけるNDVIの季節変化

ここで、 $R_{p,i}$ は湛水時の地下水涵養量 ( $m^3/day$ )、 $R_{p,n}$ は中干および間断灌水時の地下水涵養量 ( $m^3/day$ )、 $A_p$ は水田面積 ( $m^2$ )、 $M$ は減水深 ( $m/day$ )、 $E$ は蒸発散量 ( $m/day$ )である。減水深は、 $1.08km^2$ メッシュごとに設定されているため<sup>12)</sup>、各市町村に属するメッシュの値を平均して用いた。また、灌漑期の設定は、図2.4に示す栽培暦とした。

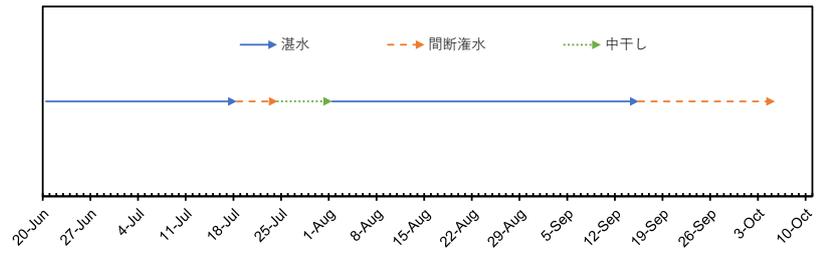


図2.4 栽培暦

灌漑期の水田以外からの地下水涵養量は、次式から求めた。

$$R_n = A_n \times (\kappa_n \times P - E) \quad (8)$$

ここで、 $R_n$ は地下水涵養量 ( $m^3/day$ )、 $A_n$ は面積 ( $m^2$ )、 $\kappa_n$ は浸透係数、 $P$ は降水量、 $E$ は蒸発散量である。浸透係数は、熊本県<sup>12)</sup>を参考に、非灌漑期の水田、被災田、畑地には0.7、芝地と雑草地には0.5、草原と森林には0.2を設定した。蒸散量はHamon式<sup>7)</sup>から求めた。

#### 4) 阿蘇地域の草原および森林における浸透能力の調査

2本の塩ビパイプ（内管：直径30cm、高さ100cm、外管：直径50cm、高さ30cm）を用いたダブルリング法により、浸透能力を計測した。本手法では、塩ビパイプに水を注入し、内管の水位を一定時間ごとに測定する。浸透速度の対数と経過時間の対数との近似直線を作成し、Kostiakovの式により24時間後の浸透能を求め、最終浸透能とする。

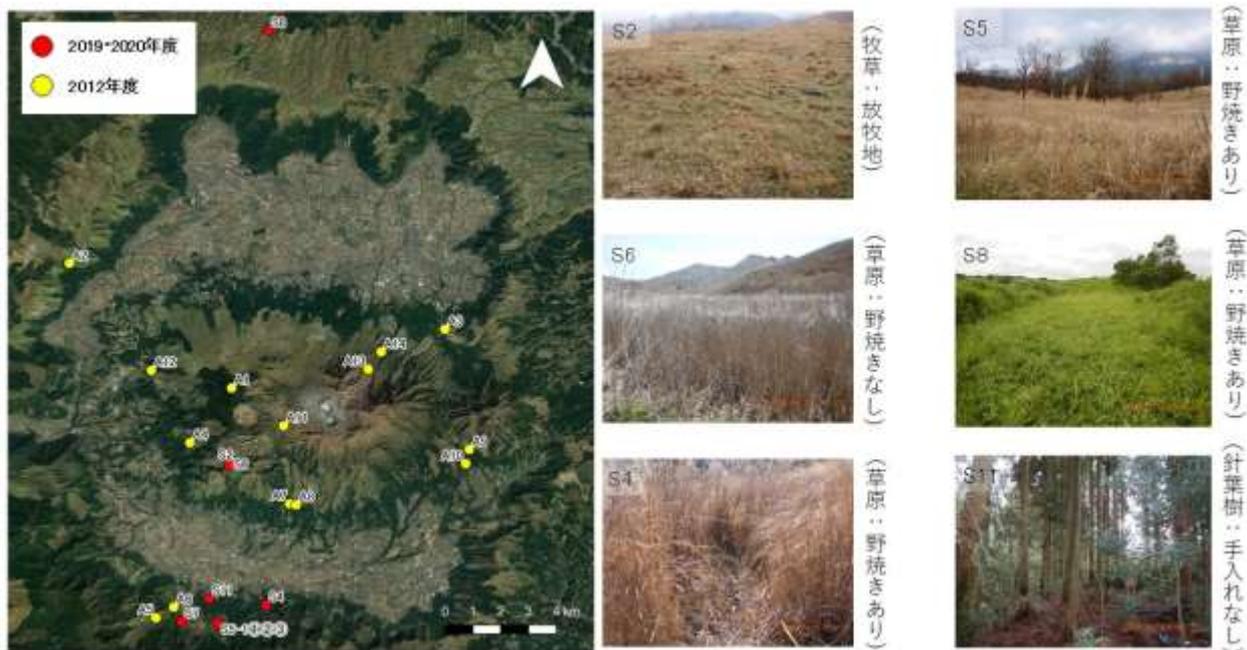


図2.5 浸透能試験実施地点の位置と2019年実施地点の土地被覆

図2.5に浸透能試験実施地点の位置と赤色丸印で示した2019年実施地点の土地被覆を示す。なお、黄色丸印で示した2012年度は別の研究プロジェクトで計測されたもので、今回の調査結果とともにサブテーマ1で構築されるシミュレーションモデルの入力パラメータとして利用する。

## 5) 熊本地震前後の阿蘇地域に生息するキムラグモ類の個体数の調査およびリモートセンシングによるキムラグモ類生息地の評価

生態系の変化については、阿蘇地域の昆虫相が地震によりどのような影響を受けているかを解明した。特に地中生活を行う種について解明することにより地震の影響をより高精度に生態系の変化として分析できる。そこで、斜面に巣を作って地中生活を行うキムラグモ類 *Heptathela* spp. (図2.6) の個体数を調査した。キムラグモ類は、環境省レッドリスト2019の絶滅危惧II類 (VU) , 熊本県準絶滅危惧 (NT) に類別されている。キムラグモ類を生態系調査として用いた理由は、阿蘇カルデラ全体に分布・生息している、地震前から多くの地点で個体数を調査している、斜面に巣を作るので地震の影響を受けやすい、斜面の土壌が水循環と関係している、点である。



図2.6 キムラグモ類

本種の生息数調査は、かなりの時間を要し、一日に調査できる地点は限られるため、短時間で広範囲を調査できる方法として人工衛星によるリモートセンシングによりキムラグモ類生息地の被害評価を試みるとともに、生態系調査へのリモートセンシングの適用可能性について検討した。本研究開発方法では、2つの方法について検討した。

1つ目は、研究開発内容1)、2)、3)で利用したように、2時期のNDVIの差から土砂崩壊地を抽出する方法 (NDVI filtering method) である。本手法では、SPOT 6/7 によって、地震前の2016年3月21日、地震後の2017年4月23日に取得された2シーンをを用いた。

2つ目は、人工衛星搭載のSAR (synthetic aperture radar : 合成開口レーダ) データの位相情報を使った差分干渉SAR解析 (以下DInSAR 解析) から地盤変動を検出する方法である。解析には、ALOS-2/PALSAR-2により、地震前の2015年11月30日、地震後の2016年11月14日に取得された2シーンをを用いた。解析は、SARscape (sarmap 社) のDInSAR Displacement Workflow に従って以下の手順で行った。

- 1) インターフェログラム (干渉縞) の生成。ここでは、初期干渉画像の作成から軌道縞・地形縞除去まで行った。なお、地形縞除去には国土地理院の10mメッシュDEMを用いた。
- 2) コヒーレンス画像の作成と干渉画像のフィルタリング。
- 3) アンラッピング処理。
- 4) 軌道補正と位相のオフセット計算と位相画像の再計算。
- 5) ジオコーディングした変動マップの作成。

## 6) ドローンを用いた高解像度リモートセンシングによる NDVI と 3次元形状の計測および空間分解能の検討

浸透能力試験を行った熊本県南阿蘇村大字久石の草原で、ドローンを用いた高解像度リモートセンシングを実施した。使用したドローン Parrot Bluegrass Fields (図2.7) には、光学センサ4バンド (可視光緑、可視光赤、レッドエッジ、近赤外) とRGBカメラが搭載されておりNDVIが計算できる。さらに、一定間隔で撮影した連続画像からPix4Dmapperソフトウェアにより3次元形状を計測し、現地の詳細な状況を把握した。なお、撮影日は、2020年2月21日である。ドローンの空撮は自動で行い、事前に設定したポリゴン領域内 (0.036km<sup>2</sup>) を空撮した。高度は60m、空間分解能は6.87cmである。



図2.7 使用したドローン

また、衛星画像の解像度では難しい植生の違いをドローンの高解像度空撮画像では分類できる。したがって、より詳細な土地被覆分類が必要な箇所には、ドローンによる空撮が有効である。

## 7) SPOT 6/7 による松原ダム・下笠ダム流域の土地被覆分類

阿蘇地域草原の主な植生であるネザサとススキは、蒸発散量が異なることから両者を区分した土地被

覆分類が可能となれば、地下水涵養量のより精度の高い推定が期待できる。また、福岡都市圏に水を供給する筑後川の最上流部にあたる松原ダム・下笠ダム流域の土地被覆を把握することは、各流域の水資源に対する役割を定量的に評価するために重要である。下笠ダムおよびテーマ1サブテーマ1がササとススキの蒸発散量を計測している松原ダム流域（阿蘇北外輪山）を対象として、①ササ、②ササ・ススキ混在、③ススキ、④刈取、⑤牧草、⑥灌木・広葉樹、⑦針葉樹、⑧農地、⑨建物・道路、⑩水域への分類を試みた。⑩水域は、国土地理院の基盤地図情報<sup>9)</sup>に修正を加えて分類した。その他の土地被覆は、2021年2月16日、2021年2月23日にSPOT 7により取得された衛星画像を使用し、ENVI5.6のclassification workflowに基づき、NDVIおよびRGBを教師データとして、最尤法を用いた教師付き分類により分類した。

#### 4. 結果及び考察

##### 1) 熊本地震により阿蘇地域の土地被覆が裸地へ変化した領域の抽出と時間経過とともに拡大する裸地領域の原因調査

熊本地震後時間経過とともに阿蘇地域の裸地領域が拡大している。そのため、主な箇所について、現地にて原因を調査した。図2.8は、図2.1の画像2と南阿蘇村の京大火山研究センター周辺裸地領域3地点の写真である。この写真のように、地震被害領域の補修工事が実施されており、植生被覆が剥がされてNDVI低下領域が拡大している。なお、この箇所以外にも南阿蘇村を中心に地震被害領域の補修工事が進められている。このような場所では、トラックや重機により地面が踏み固められ、浸透能力が低下する。地下水保全のために、植生を回復させる、透水性舗装に変えるなどの対応が必要と考える。個々の工事現場の面積は小さくても、衛星画像からは全体としては無視できない面積として観測できる。

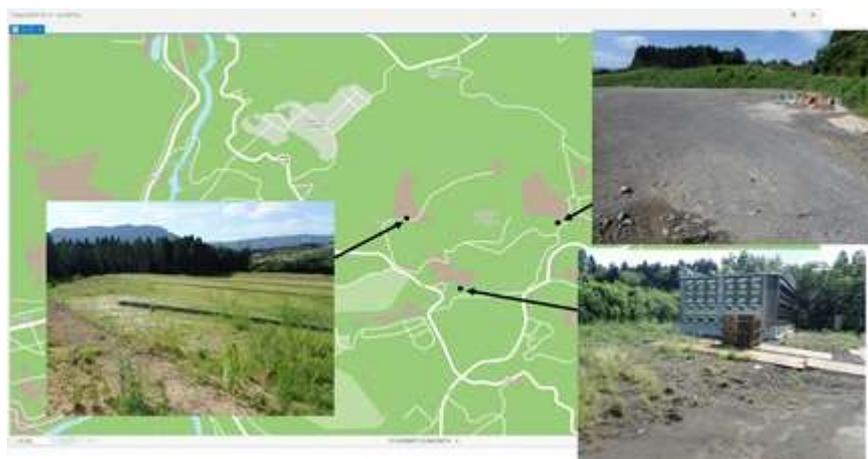


図2.8 南阿蘇村の京大火山研究センターの周辺3地点での写真

##### 2) NDVI 経時変化と GIS データなどを組み合わせた阿蘇地域土地被覆分類手法の開発および土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

図2.9に分類結果、環境省の植生図<sup>1)</sup>、JAXAの高解像度土地利用土地被覆図<sup>13)</sup>を示す。また、図2.10には、分類結果と植生図(vg3およびvg67)の各土地被覆の面積比較を示す。図2.10から2015年の分類結果とvg67が概ね一致していることがわかる。しかしながら、vg67の水田面積は、分類結果より約25km<sup>2</sup>大きい(図2.10a)。水田台帳によると、水田面積は43.17km<sup>2</sup>であるため、分類結果の44.66km<sup>2</sup>は妥当と考えられる。1981年の分類結果は、vg3と概ね一致しているが、南郷谷の水田・畑地の分布に差異が認められる。vg3で畑地に分類されている場所に多くの灌漑井戸があることや、農林業センサスによると高森町の水田面積は、1985年から2015年までほとんど変化がないことから、実際には本研究による分類結果のように水田が分布していたと考えられる。

作成した分類図は、JAXAの図とも概ね一致している(図2.9c、h)。JAXAの図の総合精度(Overall accuracy)は、78.0%と高いものの、畑地の草原への誤分類が多い。この誤分類は、本研究対象地でも認められる。本手法では、衛星画像以外にGISデータなど有力なデータを組み合わせて分類精度を上げてい

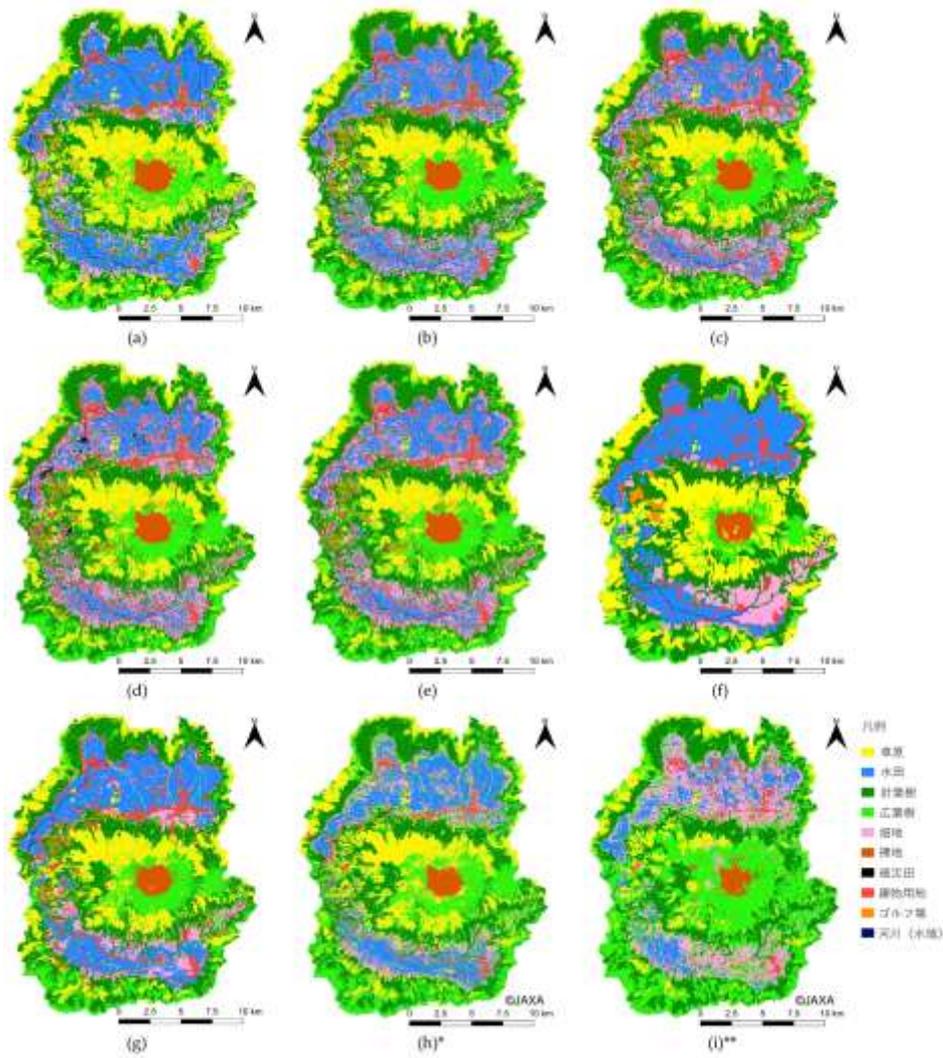


図2.9 土地被覆分類図：(a)1981年、(b)1996年、(c)2015年（熊本地震前）、(d) 2016年(熊本地震後)、(e) 2040年代(将来予測)、(f)vg3<sup>1)</sup>、(g)vg67<sup>1)</sup>、(h) JAXA(2006～2011年)<sup>13)</sup>\*、(i) JAXA(2014～2016年)<sup>13)</sup>\*\*。\* (h)の提供：日本域高解像度土地利用土地被覆図 2016年9月リリース版（バージョン16.09）(JAXA)。\*\* (i)の提供：日本域高解像度土地利用土地被覆図 2018年3月リリース版（バージョン18.03）。

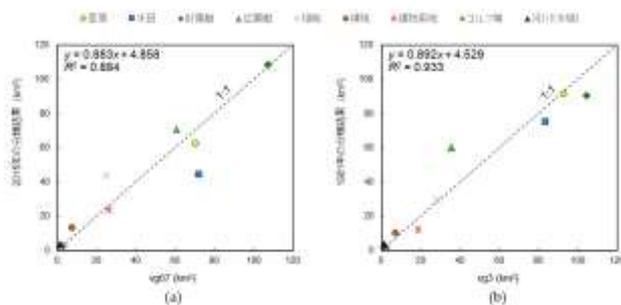


図2.10 植生図(vg67、vg3)と分類結果の比較：(a)vg67と2015年の分類結果との比較、(b)vg3と1981年の分類結果との比較。

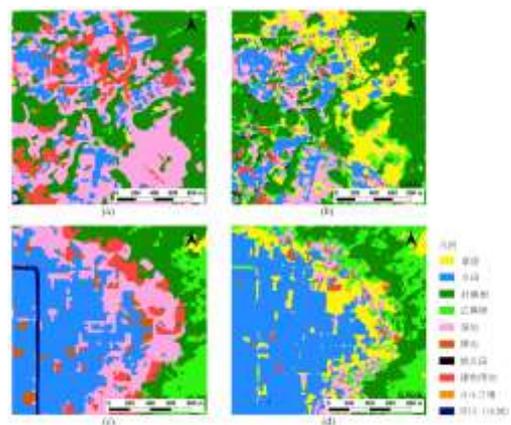


図2.11 2015年の分類結果とJAXAの分類図(2006～2011年)との比較：(a) (c)分類結果、(b) (d) JAXAの分類図

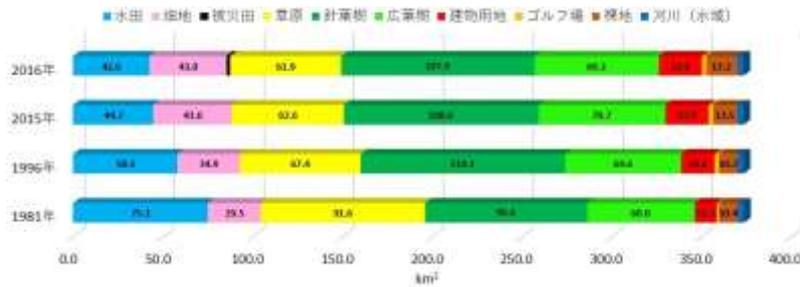


図2.12 1981年から2016年までの各土地被覆の面積変化

ることから、JAXAの図で草原に誤分類されている地域は、畑地に分類できている(図2.11)。

図2.12に、1981年から2016年までの各土地被覆の面積の変化を示す。1981年から2015年まで、水田は約40%減少、草原は約30%減少、森林(針葉樹および広葉樹)は約20%増加、建物用地は約100%の増加である。水田は減反政策、草原は放棄草原への植林や放棄草原の樹林化、建物用地は阿蘇ファームランド等の商業施設の建設によるものと考えられる。一方、2015年から2016年(熊本地震前後)では、地割れや不陸化、灌漑水路の破損等により水田および畑地が約3%減少、土砂崩壊により、草原および森林が、それぞれ約1%減少した。なお、裸地は約27%増加した。つまり、地震による土地被覆の変化は、地震前までの変化に比べて、小さいと言える。

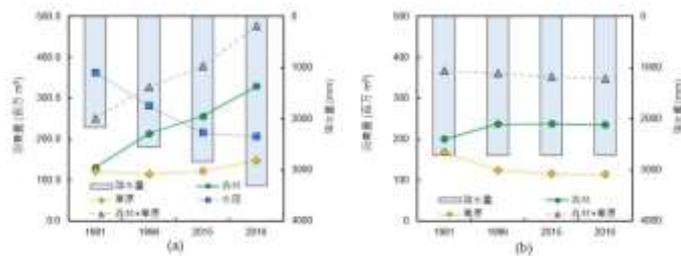


図2.13 涵養量の時系列変化：(a)実降水量、(b)一定の降水量

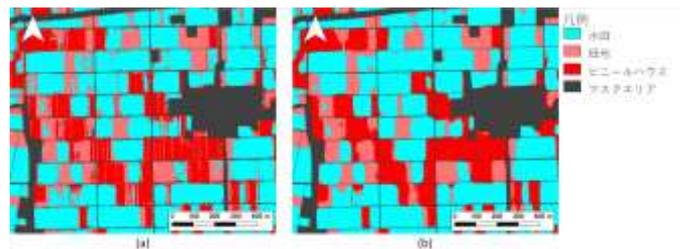


図2.14 異なるカーネルフィルタサイズによるスムージング効果の比較、(a)3×3、(b)21×21

図2.13に、1981年から2016年までの草原、森林、水田からの地下水涵養量を示す。涵養能力が相対的に森林よりも大きい草原が減少することで森林と草原からの合計涵養量は減少すると予測したが、分類をおこなった1981年から2016年は、降水量が増加しており、予測に反する結果となった(図2.13a)。そのため、降水量を一定として涵養量を求めた結果、草原面積の減少、森林面積の増加に伴い、合計涵養量は減少した(図2.13b)。したがって、草原維持は地下水涵養に重要であると考えられる。また、水田からの涵養量は1985年から半分程度まで減少しており、阿蘇カルデラの水循環に大きな影響を与えると考えられる。

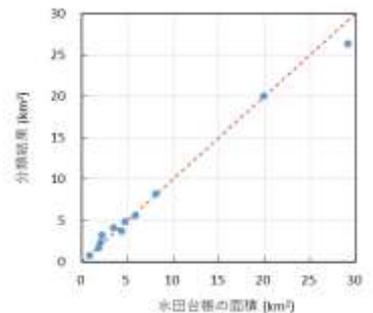


図2.15 水田台帳と分類結果の比較。各プロットは解析領域内の11市町村に対応する。

### 3) SPOT 6/7 衛星画像と GIS データなどを組み合わせた熊本地域土地被覆分類手法の開発および 2016 年熊本地震と豪雨に伴う土地被覆変化の地下水涵養量への影響評価

異なるカーネルフィルタサイズによるスムージング効果を図2.14に示す。ENVI5.6のカーネルフィルタは、中心ピクセルがフィルタ内に存在するクラスの最頻値に置換するため、フィルタサイズが大きいほど、離れたピクセルのクラスを反映する。そのため、フィルタサイズを大きくすることで、ノイズが低減され、各クラスがまとまった分類結果となった。本研究では、フィルタによる分類結果の改善を、

水田面積においても確認した。11市町村の水田面積に対し、フィルタサイズが3×3の場合、絶対誤差和は約16km<sup>2</sup>であったが、21×21の場合は約9km<sup>2</sup>となり、水田台帳と分類結果の水田面積が図2.15に示すように、よく一致することを確認した。さらに、例えばフィルタサイズを41×41まで大きくすると誤差が大きくなることを確認した。本研究では、上記以外のサイズについても検討し、21×21のカーネルフィルタを用いることとした。

分類結果の妥当性は、混同行列(Confusion matrix)により評価した(表2.1)。混同行列から求めた総合精度は91.7%、カッパ係数は0.88であり、分類結果は妥当であると評価できる。分類結果とJAXAの高解像度土地利用土地被覆分類図<sup>13)</sup>を図2.16に

示す。水田の分布に大きな差異が認められるが、その他の土地被覆については概ね一致している。JAXAの図と比べ本研究の分類図は、GISデータや特定の土地被覆を制限するマスクを使用したことで、衛星画像では抽出できない農道や灌漑水路が表現されており、また市街地の水田への誤分類が防がれている。

被災田の面積は約0.9km<sup>2</sup>で、水田面積約85.8km<sup>2</sup>のわずか1%程度であり、地震被害はほとんど無いように見える。これは、益城町の水田が地震後すぐに修復され、通年通りに作付けが実施されたことや、被災した水田を畑地として転用したことなどが理由として挙げられる。熊本地震および地震後の豪雨によって発生した土砂崩壊地の面積は、約0.41km<sup>2</sup>であった。このうち、97.6%が森林、残りが草原で発生した。土砂崩壊地の面積は、森林面積約452.7km<sup>2</sup>の1%にも満たない。つまり、熊本地震やその後の豪雨により様々な被害があったものの、阿蘇カルデラと同様に全体の面積に対して、土地被覆の変化はわずかであった。

作成した土地被覆分類図から、熊本地域の涵養域を対象に推計した地下水涵養量は、約757.6百万m<sup>3</sup>であった。被災田および土砂崩壊がない場合、涵養量は約759.9百万m<sup>3</sup>と推計された。すなわち、地震によって2.3百万m<sup>3</sup>の涵養量が減少したと推計された。水田は、現在も修復が進んでおり、被災田による涵養量の減少はなくなると考えられる。一方、土砂崩壊地では、容易に土壌が回復しないため、涵養量の回復には時間がかかると考えられる。土砂崩壊による涵養量の減少量は、0.17百万m<sup>3</sup>であり、全体の地下水涵養量の1%にも満たないが、熊本地域の1,362人分の年間水消費量に相当する。また、2024年までの年間地下水涵養量の減少量1.41百万m<sup>3</sup>の12.1%に相当する。これらの観点から、土砂崩壊による地下水涵養量の減少量は大きな意味を持っており、補間するための政策が必要であると考えられる。

#### 4) 阿蘇地域の草原および森林における浸透能力の調査

浸透能の算出結果を表2.2に示す。地点記号は図2.5に対応する。2019年度の10箇所が今回の調査地点である。表2.2の平均浸透能は、文献(森林水文学(塚本良則編))の値よりも小さいが、大小関係は一致している。なお、文献(森林水文学(塚本良則編))では、「浸透能試験の方法によって大きな差が生じる傾向にあり、同じ試験方法で土壌間の相対的な差異を示すおおよその目安と考えるほうがよい。」と説明されている。草原によって利用形態が異なり、放牧がおこなわれるS2では、牛が土を踏み固めることで浸透能が非常に小さくなっていることがわかった。野焼き前後で浸透能試験を実施した地点では、

表2.1 混同行列

土地被覆	水田	畑地	芝地・雑草地	森林	建物用地・道路	裸地	合計	Producer's Accuracy (%)
水田	148	36	0	0	1	0	185	80.0
畑地	12	211	0	0	9	0	232	90.9
芝地・雑草地	0	0	63	30	14	4	111	56.8
森林	0	0	4	936	10	1	951	98.4
建物用地・道路	1	7	7	16	394	0	425	92.7
裸地	0	0	2	2	3	12	19	63.2
合計	161	254	75	984	431	17	1923	
User's Accuracy (%)	91.9	83.1	62.9	95.1	91.4	70.6		

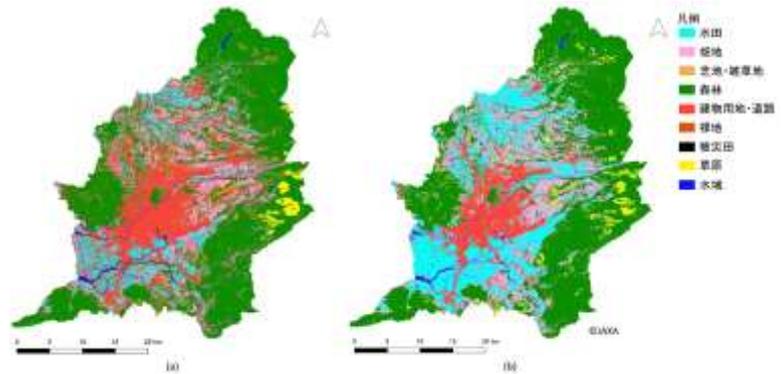


図2.16 土地被覆分類図、(a)本研究、(b) JAXA (2014～2016年)<sup>13)</sup>

表2.2 阿蘇地域の浸透能一覧

植生	年度	地点名	浸透能力 (mm/h)	平均浸透能力 (mm/h)
針葉樹	2012	A1	49.6	125.5
		A8	68.0	
		A10	186.7	
	2019	S11	197.6	
広葉樹	2012	A6	140.4	194.9
		A10	249.3	
草原 (ネザザ, ススキ)	2012	A2	81.0	100.0
		A3	28.8	
		A5	117.9	
		A7	69.1	
		A9	65.0	
		A11	41.8	
		A12	68.7	
		A14	94.3	
	2019	S4 野焼き前	99.2	
		S4 野焼き後	57.8	
		SS-1 ①	383.2	
		SS-1 ②	64.9	
		SS-1 ③	127.9	
		S6 野焼きなし	96.5	
草原 (牧草)	2012	A3	40.0	23.9
	2019	S2	7.8	

野焼き後に浸透能が高い場合と低い場合の両方が認められた。また、現在野焼きが実施されていない地点でも、野焼きが実施されている地点と同程度の浸透能が認められた。すなわち、野焼きの有無によって浸透能に顕著な違いが認められなかった。しかしながら、データ数が少ないため、今後もデータを蓄積する必要がある。

#### 5) 熊本地震前後の阿蘇地域に生息するキムラグモ類の個体数の調査およびリモートセンシングによるキムラグモ類生息地の評価

阿蘇の土壌は、喜界島火山の噴出物が堆積したボラ層の上に阿蘇火山の火山灰による黒ボク層が堆積している。黒ボク層は、粒状性が細かく腐植が少ない表層の黒ボク層と腐食を多く含む黒ボク層に分けられる。ボラ層は、粒状性が黒ボク層よりも大きい。これら堆積物はそれぞれ雨水の浸透に要する時間が異なる。また、阿蘇地域のキムラグモ類は、黒ボク層が露呈している表土が乾燥した斜面に営巣するが、生息地では、熊本地震により腐食をあまり含まない乾燥した黒ボク層が滑り落ちた。その結果、キムラグモ類は営巣場所を失い、同地域で生息数を大幅に減少させた。つまり、水を通しやすい腐食をあまり含まない乾燥した表土の存在が本種の生息を可能としているのであって、地震による本種の生息地の消失は、熊本地震による水循環に及ぼした影響を生物学的に示す指標と捉えることができる。熊本地震によるキムラグモ類の減少地域は、水を通しやすい表土が地震により流れ落ち地下水涵養量が減少していると考えられる。

図2.17aに、抽出した土砂崩壊地を示す。図から、地点Bの西側で発生した旧阿蘇大橋周辺の大規模土砂崩壊が、よく抽出されていることがわかる。その他にも、外輪山や中央火口丘で発生した土砂崩壊がよく抽出されている。しかし、阿蘇は4月下旬から水田での作付けが始まり、3月から4月下旬にかけてNDVIが低下するため、水田も土砂崩壊によって植生が剥がされたことと同じような様相を呈したことで抽出されている。阿蘇カルデラ内で、地震前の2007年に多数生息が確認されたが、熊本地震後に生息数が著しく減少した地点は、地点A、地点Bである。地点Aでは、生息数が157個体から0個体に、地点Bでは412個体から2個体に激減した。これら2つ

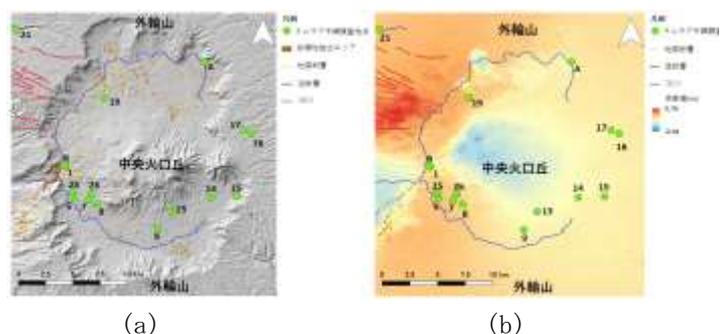


図2.17 キムラグモ個体数調査地点の分布と(a)土砂崩壊地の抽出結果および(b)DInSAR解析の結果

の地点周辺を拡大したものが、図2.18および図2.19である。本地点で発生した土砂崩壊は小規模であったため、比較的解像度の高いSPOT 6/7でも、調査地点の崩壊は検出できなかったと考えられる。なお、調査地点の崩壊は、国土地理院の航空写真判読でも抽出されていない。

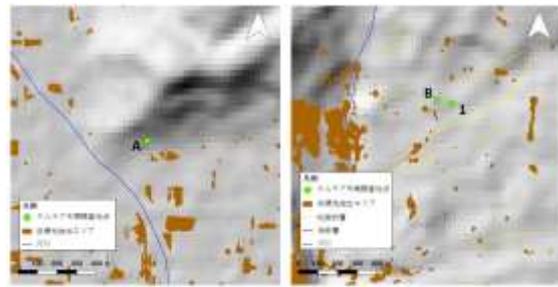


図2.18 図2.17aにおける地点Aおよび地点B周辺の拡大図

DInSAR解析によって、カルデラ北西部の外輪山では70cm程度の隆起、中央火口丘の北西部では50cmの沈降を検出した(図2.17b)。A地点では隆起した一方で、B地点では沈降したことがわかる。どちらの地点も小規模な土砂崩壊地であるが、異なる結果を示した。これは、土砂崩壊による地盤の変動よりも、地震による地盤の変動のほうが大きいためと考えられる。

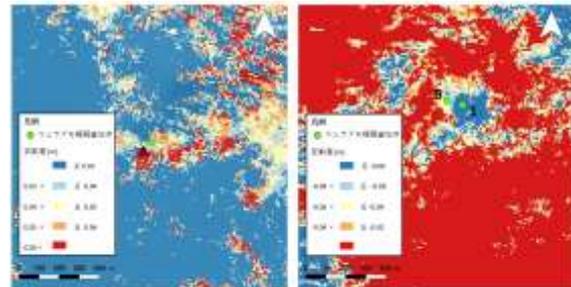


図2.19 図2.17bにおける地点Aおよび地点B周辺の拡大図

特に、大きな土砂崩壊地点の近隣では生息数への影響が大きいことから、DInSAR解析よりもNDVI filtering methodのほうが、キムラゲモ類生息地への被害評価に有効な可能性がある。なお、DInSAR解析における沈降・隆起の大きな領域の近隣でも、生息数への影響が大きいことは示されている。

### 6) ドローンを用いた高解像度リモートセンシングによる NDVI と 3次元形状の計測および空間分解能の検討

ドローンの空撮では、図2.20に示すとおり冬季においてNDVIの低いススキとNDVIの高いネザサを分離でき、ネザサ、ススキの単一植生およびネザサ・ススキ群落の識別も可能となる。したがって、狭い領域に限定されるが、特に詳細な分析が必要な時は、ドローンを用いた高解像度リモートセンシングが有効である。

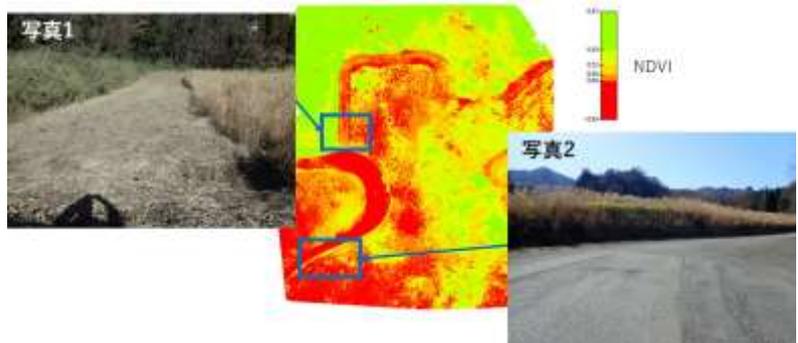


図2.20 ドローン空撮のNDVI画像(Pix4Dmapper使用)と2箇所の現地写真

図2.21に空間分解能1.5mのSPOT 7衛星画像から算出したNDVI画像を示す。衛星画像の撮像日は、ドローン空撮日に近い2020年1月4日である。NDVI画像の擬似カラーはドローン空撮画像のNDVIに合わせている。SPOT 7衛星画像のNDVIは、概ねドローン空撮画像のNDVI強弱分布傾向に近いことがわかる。ネザサ・ススキの分類のような詳細な植生分類が可能となれば、蒸発散量の異なる植生の面積計測から、地下水涵養量のより精度の高い推定が期待

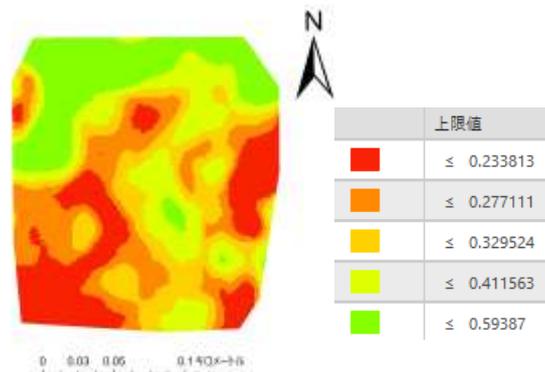


図2.21 SPOT 7のNDVI画像

できる。ただし、ミクセルのため境界領域、混在した領域を正確に分離することは困難である。

7) SPOT 6/7による松原ダム・下笠ダム流域の土地被覆分類

図 2.22 に分類に使用した衛星画像、Google map の判読による分類結果、教師付き分類による分類結果を示す。図 2.22(b)と(c)を比較すると、教師付き分類による分類結果は概ね Google map の判読による分類結果と一致している。これら2つの結果の差異を定量的に評価した結果を表 2.3 に示す。ここで、一致率(%)とは、Google map により判読された各植生領域が正しいと仮定し、それらの領域のうち、教師付き分類によって同種に分類された面積(m<sup>2</sup>)の割合である。ササ、ササ・ススキ混在、ススキの一致率は70%を下回っており、ササはササ・ススキ混在、ササ・ススキはススキ、ススキはササ・ススキ混在に主に誤分類されている。ササ・ススキの混在領域では、ササとススキは1:1で混在しているわけではないため、サ

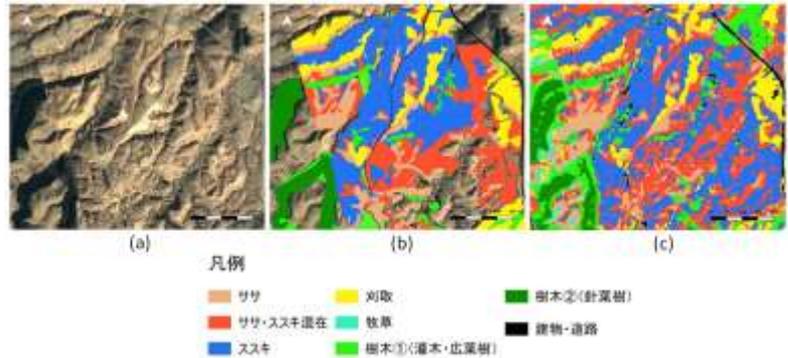


図2.22 衛星画像と分類結果の比較、(a)SPOT 7、(b)Google map から判読、(c)教師付き分類

表2.3 教師付き分類とGoogle map判読の差異

		教師付き分類							合計	一致率	
		ササ	ササ・ススキ	ススキ	刈取	牧草	樹木①	樹木②			建物・道路
Google map判読	ササ	105,726	83,131	15,935	8,639	4,467	2,063	0	627	220,588	47.9
	ササ・ススキ	28,616	205,746	127,760	11,059	1,900	8,348	1	1,606	385,056	53.4
	ススキ	8,174	135,661	338,640	4,438	1,078	21,559	117	4,682	514,350	65.8
	刈取	9,993	42,596	19,578	182,340	4,217	2,449	0	2,725	263,898	89.1
	牧草	216	0	0	2,261	136,227	97	0	4	138,805	96.1
	樹木①	5,071	10,897	13,792	2,095	739	88,477	4,080	1,794	126,946	89.7
	樹木②	411	638	381	514	1,802	129,183	147,974	1,085	281,988	52.5
	建物・道路	649	8,095	5,544	8,306	528	992		40,077	64,396	62.2

サの割合が大きければササに近い特徴、ススキの割合が高ければススキに近い特徴を示し、このような誤分類を誘発していると考えられる。そのため、ササの一致率は 47.9%であるが、ササとササ・ススキ混在に分類されたものは 85.6%、ススキの一致率は 65.8%であるが、ススキとササ・ススキ混在に分類されたものは 92.2%を示している。すなわち、図 2.21 で示したように、混在した領域を正確に分離することは困難であった。しかしながら、図 2.20 で示したように、ササとススキでは2月のNDVIが顕著に異なるため、ササはススキに、ススキはササに誤分類されにくい。図 2.23 に下笠ダム・松原ダム流域の分類結果を示す。ダム流域全体の土地被覆分類は、下笠ダム流域では樹木②が大部分を占め、松原ダム上流域では草原が、中流域では農地が広く分布している特徴は再現できているものの、くじゅう連山の雪が積もっている場所が建物・道路に分類されるなど誤分類も見受けられる。以上の結果から、複数時期の衛星画像を用いる、現地観測からより正確な教師データを作成することなどから、分類精度を向上させることが今後の課題である。

5. 研究目標の達成状況

本研究は、熊本地震前後の衛星画像を用いて土地被覆が裸地へ変化した領域を抽出した。さらに南阿蘇村を中心に熊本地震後時間経過とともに拡大する裸地領域が確認されたので、踏査により原因調査した結果、地震被害領域の補修工事の実施であった。このような土木補修工事の拡大は浸透能低下が懸念される。衛星画像およびGISデータを用いて阿蘇カルデラおよび熊本地域を対象に土地被覆分類を実施し、熊本地震による土地被覆の変化、土地被覆変化に伴う地下水涵養量の変化を評価した。阿蘇カルデラについては、熊本地震以前の土地被覆の変化についても把握し、草原、森林、水田面積の変化に伴う地下水涵養量の変化を評価した。また、阿蘇地域の草原および森林を対象に浸透能試験を実施し、浸透能に対する野焼きや地震の影響について評価した。これらの研究で得られた阿蘇カルデラおよび熊本地域の土地被覆図や浸透能の成果は、サブテーマ1の水収支モデルの基礎データとして提供した。阿蘇カ

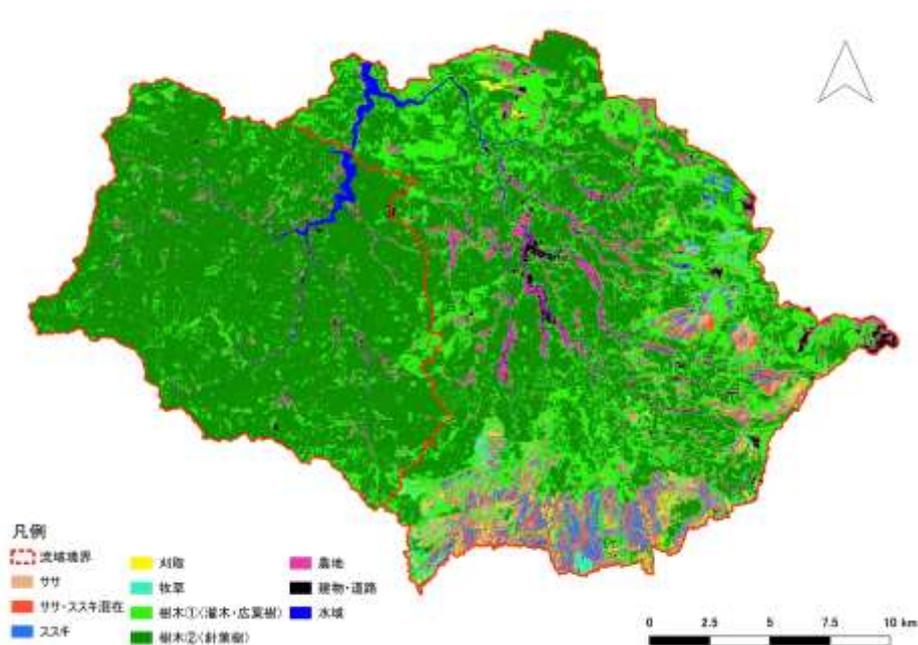


図2.23 下釜ダム流域と松原ダム流域の土地被覆分類結果

ルデラに生息するキムラグモ類の調査を実施し、さらにリモートセンシングによる生息地の被害評価を行った。その結果、熊本地震による土砂崩壊地や地盤変動での沈降・隆起の大きな領域の近隣では、生息数への影響が大きいことが示された。生息数激減地域は、水循環に影響が及んでいる地域と捉えられる。以上のようなことから、研究目標は達成されたと考えられる。

当初の研究目標に入っていなかったものの、ドローンを用いた高解像度リモートセンシングのネザサとススキの分類への有効性やSPOT 6/7を用いた阿蘇カルデラ北外輪山の植生分類の結果は、課題番号S II-5-1(1)の研究に寄与し、追加的な成果であると言える。この追加的な成果を勘案すれば、研究目標を上回る成果を挙げたと考えることもできる。

## 6. 引用文献

- 1) 環境省自然環境局生物多様性センター：植生調査結果、<http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-023.html>
- 2) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス、<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- 3) 下津昌司：土木学会論文集、393, II-9, 141-150(1988). 阿蘇火山流域における水収支に関する観測研究
- 4) L. ZHANG, W. R. DAWES and G. R. WALKER: Water Resour. Res., 37, 3, 701-708 (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale
- 5) 天野弘基、市川 勉、平野葉一、中川 啓：土木学会論文集 G(環境)、76, 5, I\_495-I\_503 (2020). 阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について
- 6) 松浦拓哉、手計太一、富樫 聡、緒方 陸：土木学会論文集 B1(水工学)、74, 4, I\_37-I\_42 (2018). 分布型水収支モデルを用いた土地利用変化と気候変化が富山県域の水資源量に与える影響評価
- 7) J. LU, G. SUN, S. G. MCNULTY and D. M. AMATYA: J. Am. Water Resour. Assoc., 41, 3, 621-633 (2005) A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States
- 8) 全国農業会議所：全国農地ナビ、<https://www.alis-ac.jp/SelectPrefecture>
- 9) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス、<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

- 10) F. YAMAZAKI and W. LIU: Proc. 6th ASIA Conf. Earthquake Eng. (2016) Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake
- 11) 熊本県、熊本市：平成6年度熊本地域地下水総合調査報告書（1994）、122p.
- 12) 熊本県：重点地域(熊本地域)における地下水涵養の措置による推定涵養量の算定方法、  
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/51876.pdf>
- 13) JAXA：高解像度土地利用土地被覆図、[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc_j.htm)

## II-3 水循環の変化が農業に及ぼす影響の評価

東海大学

農学部／教授

阿部 淳

経営学部／教授

木之内 均

農学部／教授

岡本 智伸

農学部／講師

樫村 敦

農研機構 九州沖縄農業研究センター

上級研究員

加藤 直樹

### 【要旨】

熊本地震では、農業用水に大きな被害が発生した。水田では、阿蘇市のように広大な水田を賄う大型河川からのポンプアップの用水が途絶し、畜産農家は、水道や牧場内の井戸が使えなくなり、近隣の湧水から毎日多量の水を運ぶ作業を数カ月～1年半にわたって行い対応した。水田の場合も、山からの自然水を利用した用水路は短期間で復旧できたが、ここ数十年の自然水の供給不安定化で、河川からのポンプアップへの依存度が高まっており、復旧までが長引くこととなった。今後、こうした災害に備えるためには、湧水や自然水のような、緊急時の代替となる水源を確保することが重要であるが、そのためには、牧野（草原）を守っていくことが重要である。しかし、野焼きなどの草原の維持管理は、熊本地震以前から十分に行えない状況となっていたことが明らかになった。水田などの耕地についても、農業従事者の高齢化で今後の荒廃が懸念されるが、こうした草原と耕地の維持は、阿蘇地域の住民だけでなく、下流域の住民の水資源保全や水害防止の観点からも重要と考えられる。環境保全型農業の推進や、二酸化炭素排出量削減への助成など、水田などの耕地や牧野を維持することに対して社会的意義と収益との両面からやりがいを作り出して後継者や新規就農者を増やすこと、共生圏の下流域住民の理解も得て、ボランティアや生産物の購入などの協力を得やすい社会にしていくことが重要である。

### 1. 研究開発目的

熊本地震が阿蘇地域をはじめとする県内農業に及ぼした被害の状況を、具体的な事例で明らかにする。特に水に関連する被害の実情や、それに対する農家の対応を知ることで、こうした災害に耐えるために、どのような水環境を守っていく必要があるかと、その方策を明らかにする。あわせて、阿蘇地域をはじめとする熊本の農業の創造的復興に向けて、必要な方策を検討する。

### 2. 研究目標

阿蘇地域を中心に、熊本地震でどのような被害が起き、現場がどのように対応したかを聞き取り調査するとともに、統計データによって農業への影響を明らかにする。その際に、特に水の問題に着目し、地震のような災害に備えるために、どのような水環境を守っていく必要があるのか、そのために平常時からどのような対策が必要なのかを明確にして提言していく。あわせて、災害後も農業と地域の活性を守っていくために、平常時から必要な活動・支援策についても提言する。

### 3. 研究開発内容

#### 1) 熊本地震による農業被害事例の聞き取り調査

農家・農業法人を訪問し、熊本地震発生時の被害状況や、その後の対応、復旧の現状について聞き取り調査を実施した。2019年度は、阿蘇市と南阿蘇村の水稻作の農家、西原村と南阿蘇村の畜産農家・法人を対象に調査した。必要に応じて、自治体の担当部署やと水利管理組合にも聞き取り調査を行った。

#### 2) 熊本地震による阿蘇の牧野の利用状況の変化についての調査

阿蘇市、南阿蘇村、高森町の牧野について、SPOT衛星画像を用いて、パソコン画面上で視認した色などの情報から草地やそのなかの野焼きしたエリアをトレースし、それぞれの面積を算出した（作業は、阿蘇の牧野の事情に詳しく、画像からの牧野利用状況の解析に経験のあるNPO法人九州バイオマスフォーラムに委託した。図3.1）。熊本地震前と熊本地震後のSPOT衛星画像を解析することで、熊本地震による牧野面積・野焼き面積への影響を評価した。

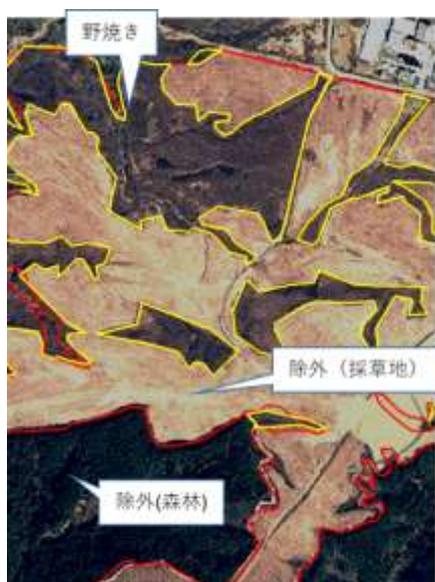


図 3.1 SPOT 衛星画像からのトレース例

この例では、野焼きを実施した草原、実施しなかった草原、森林を分けている。

#### 3) 創造的復興に向けた取り組みについての検討

今後の水田等の農地管理や牧野管理の在り方について検討するため、参考となる取り組みについて聞き取り調査を実施した。

### 4. 結果及び考察

#### 1) 熊本地震による農業被害事例の聞き取り調査

##### 熊本地震が水田作に及ぼした影響とその対応

##### ① 阿蘇市土地改良区 17 工区における被害事例

被害を受けた農家日田さんに話を伺った。日田さんが管理する約 10 ha の水田の約 8 割が黒川からポンプアップした水を水源とする用水路を使用しており、残りは阿蘇の内輪の山から下ってくる「自然水」を水源とする用水路を使用している。地震による水田の被害としては、水田のひび割れや用水路地表部の破損など（図 3.2）のほか、黒川からポンプアップしていた用水路への水供給が停止した。黒川を水源とする用水路は、標高が低い黒川河畔から最も標高が高い水田のところまで地下水道で押



図 3.2 阿蘇市における水田被害状況。  
左：用水路の破損。右：水田内の地割れ。



図 3.3 阿蘇市 17 工区付近の衛星画像  
黒川から、黄色い線のように地下水道が埋設され、用水路に水を押し上げている。  
熊本地震ではこうした地下の配管が大きく損壊した。

し上げてから用水路に流し込んで下らせている（図 3.3）。地表に出ている用水路に比べて、ずたずたになった地下水道の修繕には多大な労力と時間が必要であり、2019 年に復旧するまで使用できず、**2016 年～2018 年は「自然水」による用水路（図 3.4）を使用する約 2 ha の水田のみで水稻作が可能であった。**2016 年～2017 年には、修繕中の水田や、「自然水」の用水路で水が使えた水田を除き、ダイズ（品種フクユタカ）を栽培した。被災水田のうち、行政の事業で修繕してもらった水田では、「創造的復興」の一環として区割りを見直し、畔を減らして 1 筆の面積を拡張した水田もある。黒川を水源とする水田は 2019 年度から利用可能となったが、初夏の水の確保は危ぶまれた。移植が遅い WCS の面積が多かったことが幸いした。阿蘇市の平坦地の水田は、本来は湿地であったため減水深が少なく必要な用水量は小さかったが、土地改良による近代化で必要な用水量が増えた。

この17工区の地震被害からは、ポンプアップによる人為的な水源よりも、「自然水」による水源のほうが震災に強い可能性が示唆される。加えて、ポンプアップによる水はポンプの電気代を農家が負担する必要がある、経営面でも「自然水」のほうが有利である。しかし、この20～30年「自然水」の供給が不安定になっている。すなわち、雨後には増水し晴天時には減水するが、その差が甚だしくなり、用水路の下流域で水が不足することがある。日田さんによると、①かつては山の保水力が大きく雨水がいったん地下浸透してから湧き出していたが、現在では沢に直接流れ込む雨水が増えている可能性、②かつてに比べて阿蘇の山に降る雪が減った可能性、の2点が原因として想像されるとのことである。①については、阿蘇の開発が進み、牧野や森林の面積が変化している可能性が考えられた。実際、衛星画像を見ると、17工区に自然水を供給しているとみられる丘陵部には、大きなゴルフ場が作られており、本来の牧野が消滅していた。ゴルフ場の芝は、下の土壌が突き固められて雨水の地下浸透が著しく減っていると推察される。こうした自然水の供給不安定化や、この地域における井戸の枯渇などは、用水路を管理している美土里ネット阿蘇（阿蘇土地改良区）の担当者からも指摘を受けた。



図 3.4 山からの自然水が流れる用水路(阿蘇市)



図 3.5 干上がった南阿蘇村の塩井社水源と水田 (2016年)

## ②南阿蘇村沢津野地区における被害事例

農家の古澤郁夫さんに話を伺った。2016年の熊本地震で、溜池を水源とする用水路が使えなくなった。2020年3月末までに水源と用水路の破損部分を行政が修繕し、2020年からは稲作が再開できる見通しであるが、実際に水を流してみないと、水田の取水口などで漏水の可能性もあり、直ちにすべての水田で水稻作を再開できるかは不明である。代替の水源はない。水田の一部は、花などを植えているが多くは使用できていない。近隣の農家の水田も、多くは耕作放棄された状態である。住宅も損壊し、本来は農作業用の建物で生活している。熊本地震前は農業をしていた次男も、現在は町で働いており、2020年に水稻作が再開できることを期待しているところである。

### ③南阿蘇村中松地区における被害事例

塩井社水源を擁する松ノ木地区の状況を調査した。2016年の熊本地震後に塩井社水源が枯渇した。このため、同水源を水源とする用水路を利用して近隣の水田が干上がり、水稲作ができなくなった（図 3.5）。また、ハウス栽培のトマト農家もあり、同様に水が使えないために栽培を中止している。一部の水田は新たに水源近隣でポンプアップした地下水を利用し、また 2021 年度には年間を通じて十分な湧水がみられるまで回復したが、**現在も耕作放棄された水田も残っている**。また、地震前はこの水源を利用した水田で稲作をしていた新規就農者で、他地区に転出した人もいる。

### 熊本地震が畜産に及ぼした影響とその対応

下記の①②の事例にみられるとおり、**非常時に利用可能な自然の水源が近隣にあることが、畜産の維持にきわめて重要である**。

#### ①西原村における酪農の事例

西原村では、9 件の酪農家のうち 7 軒が熊本地震の被害を受けた。多くは畜舎の倒壊による被害である。

組合長でもある山田牧場では、木造 1 棟・小型の鉄筋 4 棟の畜舎のうち鉄筋の 4 棟が倒壊し、国の助成を受け同面積の大きな鉄筋 1 棟を建設、震災時 100 頭だった牛を現在は 200 頭に増やしている。畜舎以外にも被害が大きく、規模拡大して「創造的復興」をしないと借金だけが残るという構図のためである。

山田牧場では、場内にあったポンプに土砂が入るなどして、1 年半にわたって用水が使えなくなった。そこで、数百 m のところにある塩井社神社の湧き水（図 3.6）をホイールロードで毎日何度も往復して運ぶことで、乳牛の飲み水などを確保した。これにより、畜舎倒壊で死んだ 5 頭のほかは、乳牛を死なせずに済んだ。



図3.6 西原村で山田牧場が臨時の水源として利用した神社の湧水

#### ②南阿蘇村東海大学付属牧場の事例

東海大学の付属牧場では、熊本地震でキャンパスに水を運んでいた水道管がずたずたに破砕し、2 か月半にわたり水道が使えなかった。その間は、2 km ほど下方にある民家の湧き水を組ませてもらい、ホイールロードに積んだ農業用タンク（図 3.7）で日に数往復することで、70 頭ほどの家畜の飲み水などを確保した。



図 3.7 湧水を用いた家畜への水供給

- a. ホイールローダでのタンク運送。  
 b. 湧水からの発動機と電動ポンプを用いた水の汲み上げ。  
 c. 牧場の給水場での水供給。

## 2) 熊本地震による阿蘇の牧野の利用状況の変化についての調査

阿蘇市、南阿蘇村、高森町、西原村の4市町村の牧野について、NPO 法人九州バイオマスフォーラムに委託し、3～4月の衛星画像から野焼き面積を、11～12月の衛星画像から採草面積を解析した。

2016年4月の熊本地震により、2016年の採草面積は前年に比べ2割程度、2017年の野焼き面積は1割程度減少し、その後2020年までに回復傾向にあるものの、熊本地震前の水準には戻っていない。

ただし、全牧野面積に占める野焼き面積は熊本地震以前の2015年でも6割程度であり、採草に用いている面積は野焼き面積のごく一部に過ぎなかった。地震以前から牧野の維持管理が難しくなっており、地震によってそれが加速されたと推察された。

表3.1 阿蘇地域4市町村の牧野の利用状況

		熊本地震前		熊本地震後					
		2015年12月	2016年3月	2016年12月	2017年4月	2018年12月	2019年4月	2020年4月	2020年11月
阿蘇市	野焼き面積 ha		5,682		5,258		5,843	5,941	
	採草面積 ha	1,715		1,343		1,509			1,527
高森町	野焼き面積 ha		133		96		116	186	
	採草面積 ha	17		10		9			11
南阿蘇村	野焼き面積 ha		752		372		444	212	
	採草面積 ha	3		1		0			0
西原村	野焼き面積 ha		871		842		880	837	
	採草面積 ha	43		25		29			25
合計	野焼き面積 ha		7,438		6,568		7,283	7,176	
	採草面積 ha	1,779		1,379		1,547			1,563

牧野（草原）面積全体に占める野焼き面積の割合は、熊本地震前59.5%、熊本地震後52.2%。

### 3) 創造的復興に向けた取り組みについての検討

#### 2つの村おこし活動の対比

上述の「南阿蘇村沢津野地区における被害事例」で述べた沢津野地区の水田では、2016年～2017年にかけて、市民有志が1口5,000円の参加費を払って、古澤さんの水田の一部で大豆オーナーとなる「大豆トラスト」を実施した。これは熊本市のNPO法人が、震災支援の企画として提案し、実施したものである。大豆オーナーには、播種や収穫などへの参加を呼び掛け、調整後の大豆を配布した。しかし、熟した大豆の収穫は地味な作業であり市民が楽しむという要素に乏しく、2017年の参加者は少なかったこと、さらに収穫後の調整作業などに多くの労力を要してNPO関係者らの負担がおおきかったことなどから2018年度以降は実施していない。

一方、「南阿蘇村中松地区における被害事例」で述べた松ノ木地区の水田では、この地域に住む、新規移住者と、県農業試験場の研究者でもある住民とが企画し、地域振興を目的とした「らっかせいオーナー」制度を2018年から実施している(図3.8)。2018年には20組、2019年度以降は30組ほどの市民・団体がオーナーとして参加し、2022年度も実施予定である。地震被害により耕作放棄されている水田を借り受け、各オーナーに小さな区画を割り振って、播種・マルチ剥ぎ・収穫に来てもらうという方式で、2018年の収穫時には、地域の婦人たちによる郷土料理の昼食会も開催した。ラッカセイは、収穫のために掘り出す作業が楽しく、網に入れてその場で洗って持ち帰り、家で茹でれば食べられる手軽さもあり、熊本市などからの参加者にもたいへん好評である。2019年度以降はさらに参加者を増やすとともに、ラッカセイを原料とした食品の開発や、大学とのタイアップなども試みられている。この企画が成功している要因としては、熊本地震以前から、松ノ木地区で地域おこしの動きがあり、活動の中核となる人材が地域にいたこと、作物栽培に詳しく、かつ、市民向けの農業体験企画を実施した経験のある人材が地域にいたことが大きいと考えられる。すなわち、震災が起きてからの付け焼刃の取り組みではなく、**通常時からの地域おこし活動の下地があることが、こうした復興活動の成否の鍵**となることが推察される。

また、熊本地震とは直接の関係はないが、地元テレビ局などとタイアップして、熊本市など下流域の住民に田植えや稲刈りを体験してもらう企画は、熊本地震以前から試みられてきた。下流域の住民に、阿蘇の水を守ることが共生圏の下流域の水を守ることに繋がることを理解してもらう、阿蘇の農産物を購入する動機づけとなるという点で、こうした体験型の企画は重要と考えられる。



図 3.8 南阿蘇村中松地区の被災水田を利用した「らっかせいオーナー」活動

### 水田の維持・活用に向けて

現在の日本では、基幹的農業従事者の平均年齢が 60 代後半となっており、**阿蘇地域においても高齢化・後継者不足が深刻である**。水田については、南阿蘇村久木野地区にみられるような農事組合の組織や、比較的若い新規就農者による田植え・稲刈りなどの作業請負いにより、必ずしも水田の所有者が作業しなくても水田の利用が続けられるような試みもなされているが、必ずしも十分ではない。

サブテーマ 1・2 で見たように、水の一時貯水と地下浸透の場であり、下流域での水害防止や地下水供給にも重要な役目を果たしていると考えられる水田<sup>リ</sup>をはじめとする農地が**耕作放棄地に代わることを防ぐ方策は、創造的復興のために極めて重要**である。

#### ①水を守る環境保全的な水稲作

農業後継者や新規就農者を増やすためには、**社会的な意義（やりがい）と、収益性の両面が重要**である。水稲は、4 月～10 月までの長期間の栽培が必要で、田植え機・コンバインなど初期投資も大きく、さらに単価も安くて、収益性が高いとは言い難い作物である。

南阿蘇村では、震災前から阿蘇のきれいな水を守るという目的で、**環境保全的な農法による水稲栽培**に取り組んできたグループがある。1 つは、食用のコシヒカリを、本田においては農薬を用いず有機肥料で栽培する「南阿蘇村おあしす米生産組合」（<https://www.minami-aso.com/>）であり、もう 1 つは酒米の山田錦を農薬・肥料を用いず自然農法で栽培する「喜多いきいきくらぶ」である。いずれも最初は少数の農家が試行錯誤しながら始めた活動であるが、継続する中で参加者を増やし、現在はそれぞれ 20 戸前後の農家が参加している。初期から参加する農家は高齢化が進んでいるが、世代交代した後継者や新規就農者など、比較的若い農家も参加している。これらの稲作は、収益性の高さにも特徴があり、**南阿蘇村おあしす米生産組合**はインターネットを活用した直接販売（図 3.9）、**喜多いきいきくらぶ**は、自分達から酒造会社に話を持ち込み、独自ブランドの日本酒用に買い上げてもらうなど、独自の販路を確立している。農協（JA）などを通じた慣行栽培の米に比べると 2 倍程度の価格である。

阿蘇市でも、合鴨農法など、化学農薬の使用を減らす試みを行っている農家は、震災以前からある。また、阿蘇地域で環境保全型の農法で栽培した米の販売を引き受け、インターネット通販を行う「阿蘇のなかストア」（<https://asononaka.com/>）など、新しい販路が確立されつつある。

農協（JA）が取り組んでいる特別栽培米（化学農薬・窒素肥料の使用量をおよそ半分以下で栽培する米）や、熊本県独自の規格であるくまもとグリーン農業の活用に加え、2021 年度から農水省が打ち出した「みどりの食料システム戦略」など、環境保全型農業に追い風となる政策を市町村レベルで有効に活用することが望まれる。特に無農薬栽培における最大の問題である雑草防除のために、作業が容易で除草効果が大きい乗用型水田用除草機（約 400 万円）の購入に補助金を出すなどの行政の支援が重要である。



図 3.9 南阿蘇村の「おあしす米生産組合」ホームページ

## ②水田からの牧草地や湿地への転換の可能性

上述のような取り組みを進めてもなお、農業従事者の減少・高齢化が進み、水田としての利用が難しくなった場合の水田利用も考えておく必要がある。

飼料作物（牧草）については、熊本地震により水田や用水路が破損し、1年～数年にわたって稲作が実施できなかった阿蘇市の農家水田において農研機構九州沖縄農業研究センターの研究者ら（本サブテーマの分担者の加藤直樹を含む）が、農家と協力して牧草栽培の実施調査を行い、阿蘇地域で水田からの転換畑で牧草を栽培するための下記のようなマニュアルをインターネットで広く公開している<sup>2,3,4)</sup>。

転換畑では湿害に対する対策が必要であるが、その点さえ気を付ければ、水稻よりもかなり省力的な栽培が可能であり、刈り取りは牧草を利用する牧場に任せるなどすれば設備投資も少なくて済む。サブテーマ1・2でみたように、雨水の地下浸透という点では、畑であっても水田に劣らないことから水循環の保全という意味で有効であろう。

ちなみに、熊本地震前の2014年から2015年にかけては飼料作物の増加する傾向が見られたのに対し、地震の発生した2016年は1397haに低下した（表3.2）。また水田に作付される「その他飼料作物」の作付面積は2016年から2018年にかけて、200haを上回る作付があり、地震被害により、飼料用イネ等の代替作物として飼料作物が利用されたと考えられた。その後、2019年以降の「その他飼料作物」の作付面積は100ha以下に低下しており、水田の復旧に伴い飼料作物の作付面積が低下したと考えられた。

表3.2 阿蘇地域の水田における飼料作物の作付面積の推移 ※1

年次	作物名 (ha)								合計 (ha)
	トウモロコシ	ソルゴー	イタリアンライグラス	エンバク	レンゲ	リードカナリーグラス	飼料用イネ※2	その他	
2014	53	10	832	11	6	27	1223	35	2197
2015	71	20	928	17	2	32	1484	57	2610
2016	41	35	918	7	1	13	1397	244	2655
2017	37	25	843	4	2	15	1452	263	2641
2018	33	26	881	7	0	11	1518	208	2683
2019	23	10	980	6	0	16	1526	48	2609
2020	20	11	1098	9	0	12	1576	75	2800

※1: 熊本県畜産統計より作成した。※2: 飼料用米含む。

また、阿蘇地域には、草原だけでなく水田においても貴重な昆虫が生息するが、そのなかには、耕作放棄水田であっても常時浅く湛水しておくことで生存できる種があることも分かっており、ビオトープ的な利用により、種の多様性と水環境の保全に役立つと考えられる。

## ③用水路の活用

南阿蘇村久木野地区では、2021年4月に南阿蘇水力発電株式会社による、用水路を活用した小水力発電が始まり、売電による収益の一部が農家らで構成する土地改良区に支払われている。こうした用水路の多角的活用も、今後の水田・用水路の保全の方策として検討すべきである。

なお、南阿蘇村では、熊本地震の後に長く停電が続いたことを強く覚えている住民も多い。上述の久木野地区の小水力発電は大手の電力会社への売電を行っているが、災害への備えという点では、地域での電力活用も今後の課題である。

## 牧野（草原）の維持に向けて

阿蘇の草原は、褐毛和牛（あかげわぎゅう：阿蘇のあか牛）の飼育に活用されてきた。すなわち、夏は牧野で放牧して野草を食べさせ、冬のはじめに大量のかや（すすき）を採取して来て冬の間の畜舎飼いの飼料として活用していた（夏山冬里）。野焼きは、草原が藪や林に変遷していくのを防ぎ、草原と

して維持するための営みである。

しかし、近年では、畜産農家の高齢化により、傾斜地を行き来して牧柵を修繕するなど体力的に負担の大きい作業を続けることや、傾斜地で見通しの悪い場所での危険な機械作業を行うことが困難となり、放牧での牧野（草原）利用が減っている。また、日本人の嗜好が霜降り肉に大きく偏っているために、草を食べ放牧で運動した牛の赤身肉よりも、狭い畜舎で運動させずに栄養価の高い輸入トウモロコシを飼料として飼育した牛の肉の方が高く売やすいという理由で、周年で畜舎飼いするあか牛が主流となっている。

このために、牧野組合にとっては、牧野（草原）を維持する動機づけが希薄となり、放置される牧野が増えている。サブテーマ1・2で見たように、草原の大幅な減少が危惧される状況である。

### ①あか牛放牧の復活

農研機構沖縄農業研究センター、熊本県農業研究センター、東海大学農学部は、南小国町などの自治体と協力して、スマート農業の利用や周年放牧などで労力を軽減することなど、あか牛放牧の研究を実施している。また、東海大学農学部の学生らが、生産だけでなく、流通や消費者までを対象に、霜降り肉一辺倒の価値観から、環境保全を考慮した赤身肉の見直しを進めるための EcoBeef 活動<sup>5)</sup>を進めている。近年日本でも知られるようになってきた、赤身肉をおいしくするドライエージングなどの熟成肉加工の技術も活用が期待される。

また、阿蘇市では、従来の牧野組合を単位とした地域ごとの管理だけでなく、比較的若い作業車によるオペレーター組合を組織し、牧野横断型の管理を試みている。

現在の肉牛飼料の主流である配合飼料は、その原料の多くをアメリカなどからの輸入トウモロコシに依存しており、日本は、国際市場のトウモロコシの2割弱を買い占める世界最大のトウモロコシ輸入国である。年間の消費量を見ても米が約700万トンであるのに対して、トウモロコシは1,000万トンを越えている。こうしたトウモロコシの輸入は、フードマイレージを大きく増大させ、二酸化炭素排出量など、環境負荷を大きくしている。今回のサブテーマ3で分担者の岡本が既往のデータ<sup>6,7)</sup>を基に試算したところでは、日本での一般的な肉牛の飼養において、胎仔期から肥育終了（約40ヵ月）までの輸入濃厚飼料由来の二酸化炭素排出量は、1頭当たり1.1t程度（1ヵ月当たりでは27.5kg/頭）と推定された。熊本県では約6万5千頭の肥育牛が飼養されているので、全体で1,800t/月程度の二酸化炭素排出量があることになり、輸入トウモロコシ由来はこの内の74%程度と推定される。すべてを牧野の野草に切り替えることは難しいが、阿蘇のあか牛、あるいは繁殖牛だけでも、配合飼料を減らし牧野の野草に切り替えることで、**二酸化炭素排出量の削減に大きく寄与できる**可能性がある。農水省が打ち出した「みどりの食料システム戦略」では、二酸化炭素排出量の削減が大きな目標であることから、そうした補助金などの活用も検討すべきであろう。

バーチャルウォーターの観点からも、牛肉1kgの生産に必要な水は15,000～20,000リットルと言われており、その多くは餌のトウモロコシ栽培に必要な水である。年間降水量が多い阿蘇の地で飼育するあか牛のために、農業生産の制限要因として水不足が強く懸念されるアメリカから大量のトウモロコシを輸入し続けることは合理性に欠ける。

このように、牛の飼育における草原利用の利点は大きいですが、一方で、野焼きやそのための輪地切りなど、人手が多く必要な作業が多い。高齢化が進んだ地域住民だけでは実施が難しく、熊本市などの市街地からの参加者も含めたボランティアに大きく依存している現状がある。今後、**阿蘇地域の住民だけでなく下流域の住民にも、阿蘇の草原の重要性と、水道水や水害など、自分らの生活との関りを理解してもらい、ボランティアの参加者を増やしていく必要がある**。公益財団法人阿蘇グリーンストックが多面的機能支払交付金を活用して実施している草原学習活動<sup>8)</sup>は、そのモデルケースとして有用である。

### ②畜産以外の野草（ススキ）の活用

畜産だけでは消費しきれずに、毎年3月の野焼きで無為に燃やしている野草（ススキ）について、

経済的な価値をつけることも、牧野組合が牧野（草原）を維持していく上で重要である。

すでに試みは始まっているものとしては、JA 阿蘇が推進する野草堆肥の利用や、文化財の建物などでの萱（かや）<sup>9)</sup> としての利用がある。野草堆肥はススキをロールベアラーなどで収穫し1～2年おいて醗酵させたものであり、土壌改良剤としての効果が期待される。特にハウスでのトマト栽培などでは、病害の軽減に効果があることが知られている。

このほか、ススキの地下茎や根として地中に固定される炭素の量は大きく、二酸化炭素の削減効果が期待できることから、それに対する経済的報酬を検討すべきである。

## 5. 研究目標の達成状況

聞き取り調査を通じて、地震による水環境の攪乱が、作物栽培・畜産にもたらす問題を具体的に明らかにできた。そのなかで、災害発生時の代替水源として、湧水や自然水といった在来の天然水資源が、事前の予想を大きく超えて、重要な役割を果たしたことが浮き彫りになると同時に、そうした天然の水資源の減少・枯渇が懸念される状況であることも明らかとなった。

このため、このサブテーマの当初目標にはなかった、天然水源を維持するための牧野（草原）の保全をどうするかといった課題をも取り扱うことになった。

水の地下浸透や一時貯水で地下水涵養や水害防止に重要な水田をはじめとする農地を耕作放棄から守り、牧野（草原）を維持するために、阿蘇のきれいな水を守るという社会的意義と収益性という両面からみて阿蘇地域の農業・畜産をどう創造的に展開していくか、また行政や、阿蘇の下流域で恩恵にあずかっている市民がどう支援していくかについて、結果及び考察で述べたように、いくつかの提言をおこなうことができた。以上のようなことから、研究目標は達成されたと考えられる。

## 引用文献

- 1) 中島峰広：古今書房、東京、(1999) 日本の棚田 保全への取り組み
- 2) 農研機構：雑草に強く管理が容易で作付けしやすいスーダングラスの栽培技術  
<https://www.naro.go.jp/disaster/kumamoto201604/03/info18.html>
- 3) 農研機構：暖地高標高地の耕作放棄地における飼料用トウモロコシの不耕起栽培技術  
<https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/karc/2009/konarc09-25.html>
- 4) 農研機構：水田における飼料生産の手引き ～阿蘇地域版～ 2018年版  
[https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/publication/pamphlet/tech-pamph/076017.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/076017.html)
- 5) 樫村 敦、服部法文、橋村義宣、岡本智伸、伊藤秀一、河原崎達雄、プラダン ラジブ、稲永敏明、松本大和、今井早希、阿部 淳、神鷹孝至、實田正博、山中 猛、今川和彦、森友靖生：Support for African/Asian Great Apes 21 要旨集、19、(2018) 阿蘇草原を活かした「草原あか牛 “eco beef”」を題材とした教育プログラム開発
- 6) L. FOREMAN: Econ. Inf. Bull., EIB-7, 1-28, (2006) Characteristics and Production Costs of U.S. Corn Farms, 2001
- 7) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」：独立行政法人農業工学研究所、つくば市、1-261 (2006). バイオマス利活用システムの設計と評価
- 8) 公益財団法人阿蘇グリーンストック：多面的機能支払交付金事業、  
<http://www.asogreenstock.com/activities/tamen/>
- 9) 柳沢 直、柏 春奈、竹田勝博、松本八十二：農文協、東京 (2018) 地域資源を活かす 生活工芸 双書 萱

### 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) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：土木学会論文集B1(水工学)、77, 2, I\_133-I\_138 (2021).  
水収支解析による阿蘇南郷谷における熊本地震の影響評価
- 2) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：土木学会論文集G(環境)、77, 5, I\_115-I\_123 (2021).  
熊本県大津町真木地区における河川の断流と湧水の枯渇に関する一考察
- 3) 天野弘基、市川 勉、平野葉一、中川 啓：土木学会論文集G(環境)、76, 5, I\_495-I\_503  
(2020). 阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について

###### 【サブテーマ2】

- 1) H. AMANO and Y. IWASAKI: Sustainability, 14, 1, 545, 19 pages (2022) (IF:3.251)  
Estimation of Groundwater Recharge in Kumamoto Area, Japan in 2016 by Mapping Land Cover Using GIS Data and SPOT 6/7 Satellite Images
- 2) H. AMANO, Y. IWASAKI and T. ICHIKAWA: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 728, 012002, 8 pages (2021)  
Classification of Land Cover in Kumamoto Area, Japan to Evaluate Infiltration and Surface Runoff
- 3) H. AMANO, Y. IWASAKI and T. ICHIKAWA: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 633, 012012, 8 pages (2021)  
Identification of paddy fields using temporal NDVI changes in Minamiaso Village, Kumamoto Prefecture, Japan to estimate groundwater recharge
- 4) Y. IWASAKI, T. TAMAKI, K. MURATA, A. KOGA and K. FUJIMOTO: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 581, 012044, 8 pages (2020)  
Detection of Land Cover Changes before and after the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan Using Remote Sensing for Evaluation of Environmental Impacts
- 5) H. AMANO and Y. IWASAKI: Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 18, 6605, 18 pages (2020) (IF:3.390)  
Land Cover Classification by Integrating NDVI Time Series and GIS Data to Evaluate Water Circulation in Aso Caldera, Japan

##### <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1】

- 1) 市川 勉：熊本平野・阿蘇カルデラの水田による涵養力の評価に関する調査報告書、105p (2021)

###### 【サブテーマ2】

- 1) K. HASHIMOTO and K. CHO: Proc. 7th IIEEJ Int. Conf. Image Electron. Vis. Comput. (IEVC 2021), 4A-3, 1-2 (2021)  
Evaluating the Suitable Resolution of UAV Images for Identifying Different Vegetation

- 2) K. CHO, O. UCHIDA and K. UTSU: Proc. 40th Asian Conf. Remote Sens., ThF3-1, 1-8 (2019)  
Development of the Glocal Monitoring System
- 3) 天野弘基、岩崎洋一郎、市川 勉：電気学会研究会資料 計測研究会 2020年3月27日、23-26 (2020) 熊本県南阿蘇村を対象とした土地被覆によるNDVIの経時変化

## (2) 口頭発表 (学会等)

### 【サブテーマ1】

- 1) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：日本地下水学会 2021年秋季講演会 (2021)  
「阿蘇カルデラから熊本地域への地下水流動について」
- 2) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：第66回水工学講演会 (2021)  
「水収支解析による阿蘇南郷谷における熊本地震の影響評価」
- 3) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：土木学会 令和3年度全国大会 第76回年次学術講演会 (2021)  
「阿蘇カルデラと熊本地域の地下水の連続性について」
- 4) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：第29回地球環境シンポジウム (2021)  
「熊本県大津町真木地区における河川の断流と湧水の枯渇に関する一考察」
- 5) H. AMANO, T. ICHIKAWA and K. NAKAGAWA: Asia Oceania Geosciences Society 18<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, Online, 2021  
“Effects of sabo dam construction on water circulation in Maki, Ozu, Kumamoto.”
- 6) 天野弘基、市川 勉、平野葉一、中川 啓：第28回地球環境シンポジウム (2020)  
「阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について」
- 7) 市川 勉、岩崎洋一郎、阿部 淳、福崎 稔、平野葉一：東海大学2019年度研究交流会 (2019)  
「阿蘇をモデル地域とした地域循環共生圏の構築と創造的復興に関する研究」
- 8) 市川 勉、平野葉一、中川 啓、天野弘基：東海大学2019年度研究交流会 (2019)  
「熊本地震による阿蘇・熊本地域の地下水・湧水などの水循環に与えた影響」
- 9) 市川 勉、天野弘基、中川 啓、藤本邦昭：日本地下水学会2019年秋季講演会 (2019)  
「熊本県阿蘇山南郷谷南阿蘇湧水群の動向」
- 10) 天野弘基、市川 勉、中川 啓：日本地下水学会2019年秋季講演会 (2019)  
「2016熊本地震後の矢護川上流部の湧水枯渇と断流」
- 11) T. ICHIKAWA, K. NAKAGAWA, H. AMANO and R. BERNDTSSON: Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting, Singapore, 2019  
“The 2016 Kumamoto earthquake effects on groundwater level characteristics.”

### 【サブテーマ2】

- 1) 岩崎洋一郎、野島明博、天野弘基：2022年電子情報通信学会総合大会 (2022)  
「阿蘇地域草原の植生分類に対するドローン空撮画像と衛星画像との連携」
- 2) 岩崎洋一郎、天野弘基、村田浩平：令和4年電気学会全国大会 (2022)  
「リモートセンシングによるキムラグモ類生息地の評価」
- 3) 村田浩平、中内拓海、岩崎洋一郎、天野弘基、岡田 工：日本蜘蛛学会第53回大会 (2021)  
「キムラグモ類の生息に及ぼす巨大地震と阿蘇火山活動の影響」
- 4) 岩崎洋一郎、天野弘基、野島明博：東海大学2020年度研究交流会 (2020)  
「ドローンを用いた高解像度リモートセンシングによる阿蘇地域二次草原の植生分類およびドローン空撮画像と衛星画像との連携」

- 5) 岩崎洋一郎、天野弘基、村田浩平：日本蜘蛛学会第52回大会（2020）  
「キムラグモ生息数減少地域の特定を目的とした衛星リモートセンシングによる熊本地震被害領域の抽出」
- 6) 中内拓海、村田浩平、永野智大、岩崎洋一郎、福崎 稔：日本蜘蛛学会第52回大会（2020）  
「阿蘇地域におけるヒゴキムラグモの生息環境に及ぼす熊本地震および災害復旧工事の影響」
- 7) H. AMANO, Y. IWASAKI and T. ICHIKAWA: 2020 11th International Conference on Environmental Science and Technology, Online, 2020  
“Classification of land cover in Kumamoto area, Japan to evaluate infiltration and surface runoff.”
- 8) 岩崎洋一郎、天野弘基、野島明博：2020年度（第73回）電気・情報関係学会九州支部連合大会（2020）  
「阿蘇地域二次草原の植生分類に対するドローンを用いた高解像度リモートセンシングの有効性」
- 9) H. AMANO, Y. IWASAKI and T. ICHIKAWA: 2020 3rd International Conference on Green Energy and Environment Engineering, Online, 2020  
“Identification of paddy fields using temporal NDVI changes in Minamiaso Village, Kumamoto Prefecture, Japan to estimate groundwater recharge.”
- 10) Y. IWASAKI, T. TAMAKI, K. MURATA, A. KOGA and K. FUJIMOTO: 2020 10th International Conference on Future Environment and Energy, 2020  
“Detection of land cover changes before and after the 2016 Kumamoto earthquake in Japan using remote sensing for evaluation of environmental impacts.”
- 11) 岩崎洋一郎、村田浩平：東海大学2019年度研究交流会（2019）  
「環境省環境研究総合推進費 SII-5 テーマ2サブテーマ(2) 環境への影響評価を目的としたリモートセンシングによる熊本地震前後の土地被覆変化の検出」
- 12) 岩崎洋一郎、玉木智子、藤本邦昭：2019年度（第72回）電気・情報関係学会九州支部連合大会（2019）  
「リモートセンシングによる熊本地震前後の土地被覆変化の検出」
- 13) 村田浩平、岩崎洋一郎、古賀 存、福崎 稔：日本蜘蛛学会第51回大会（2019）  
「阿蘇地域における熊本地震以降のヒゴキムラグモの生息状況の推移」
- 14) K. FUJIMOTO, Y. IWASAKI, Y. MURAKAMI, M. FUJIMOTO, M. FUJIOKA and T. ICHIKAWA: 2019 14th International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2019  
“A Study of Spring Waters in the Aso Caldera.”

### 【サブテーマ3】

- 1) J. ABE, N. KATO, A. KASHIMURA, H. KINOUCI and C. OKAMOTO: 10th Asian Crop Science Association Conference, 2021  
“Importance of Water Resource Conservation in Agriculture of the Aso Region - Lessons from the Kumamoto Earthquake.”
- 2) J. ABE: 6th Conference of the East Asia Research Association for Agricultural Heritage Systems, 2019  
“Damage to the grasslands in Aso area by 2016 Kumamoto Earthquake.”

## (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

### 【サブテーマ1・2・3】

- 1) 第1回環境省環境研究総合推進費（SII5-2）報告会「熊本地震による阿蘇カルデラの地下水を中

心とした水循環への影響」(主催：東海大学、2021年11月26日、熊本城ホール・シビックホール、聴講者約60名)

**【サブテーマ1】**

- 1) 地域循環共生圏シンポジウム「阿蘇における地域循環共生圏とは～地域復興につながる環境研究」(主催：環境省、熊本県、南阿蘇村、東海大学、2019年12月8日、東海大学阿蘇実習フィールド、参加者約130名)にて成果紹介
- 2) 「2016熊本地震と地下水のその後」(主催：阿蘇自然守り隊、2019年5月25日、南阿蘇村久木野旧庁舎、参加者約100名)にて講演

**(4) マスコミ等への公表・報道等>**

**【サブテーマ1】**

- 1) 朝日新聞(2020年5月13日、熊本版、23頁、「阿蘇の湧水量減る」)

**(5) 本研究費の研究成果による受賞**

- 1) 天野弘基：日本地下水学会 2021年秋季講演会(2021)  
「若手優秀講演賞」
- 2) 天野弘基：土木学会 令和3年度全国大会 第76回年次学術講演会(2021)  
「土木学会年次学術講演会優秀講演者」
- 3) H. AMANO: 2020 3rd International Conference on Green Energy and Environment Engineering, Online, 2020  
“Best Oral Presenter Award”

## IV. 英文Abstract

**Study on the Evaluation of the Impact of the Kumamoto Earthquake on the Water Cycle, Especially Groundwater in the Kumamoto Area from the Aso Caldera**

Principal Investigator: Tsutomu ICHIKAWA

Institution: Tokai University, 9-1-1 Toroku, Higashi-ku, Kumamoto 862-8652,  
JAPAN

Tel: +81-96-386-2706 / Fax: Not Applicable

E-mail: it061082@tsc.u-tokai.ac.jp

Cooperated by: Nagasaki University, National Agriculture and Food Research Organization  
Kyushu-Okinawa Agricultural Research Center

[Abstract]

Key Words: Water circulation, Kumamoto earthquake, Grassland, Groundwater, Agricultural field

In this study, water cycle simulations were conducted to evaluate the effects of land cover changes such as grasslands and paddy fields, and disasters such as the Kumamoto earthquake on the water cycle in the Kumamoto area from within the Aso caldera. The results showed that if paddy fields within the caldera were to disappear, groundwater recharge would decrease significantly, having a significant impact on the amount of water cycle. In Minamiaso, where grasslands have already been greatly reduced, it was also found that an increasing grasslands will lead to an increase in the amount of water cycle. Hence, the importance of grasslands and paddy fields in the water cycle was confirmed. Although no significant changes in the water cycle were observed in the caldera as a whole due to the earthquake, groundwater discharged from the mountain body due to the large shaking of the earthquake, and local changes in the water cycle, such as depletion of springs at high locations, were observed. The local changes affected the irrigation system. Although the depleted springs are recovering, the increase in groundwater outflow has not subsided six years after the earthquake, and the depletion occurs before the rainy season.

Groundwater flow was discovered at the Tateno Barranco, the connection between the Aso caldera and the Kumamoto area, and it is estimated that about 15 million m<sup>3</sup> of groundwater flows through the Barranco per year. Furthermore, rainfall infiltration water on the western slope of the Aso Outer Rim discharges approximately 130 million m<sup>3</sup> per year into the groundwater in the Kumamoto area. Then, water of 70 million m<sup>3</sup> per year is recharged from the paddy fields and waterlogging projects using the Shirakawa River, which emanates from the Aso caldera, into the groundwater in the Kumamoto area. The total of these amounts occupies about 38% of the annual water supply to the groundwater in the Kumamoto area. Therefore, the Aso caldera and the Kumamoto area are considered to constitute a close regional water circular and ecological sphere. As a creative recovery from the Kumamoto earthquake, residents of the Kumamoto metropolitan area and companies that use groundwater downstream must increase their interaction with the Aso caldera upstream so

as to build a sustainable agriculture and livestock industry that will maintain grasslands and paddy fields.