

【SII-5-2】(JPMEERF19S20520) 令和元年度～令和3年度

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

〈研究代表機関〉
東海大学

〈研究分担機関〉
長崎大学、農研機構九州沖縄研究センター

〈研究代表者〉
市川 勉

1.はじめに(研究背景)1

阿蘇カルデラ

● 草原

野焼き・放牧・採草によって長い間維持
生物多様性、景観、文化、水循環を形成

● 地下水

水を浸透させやすい有機質火山灰
土の存在
多量の降雨が地下に浸透

● 資源

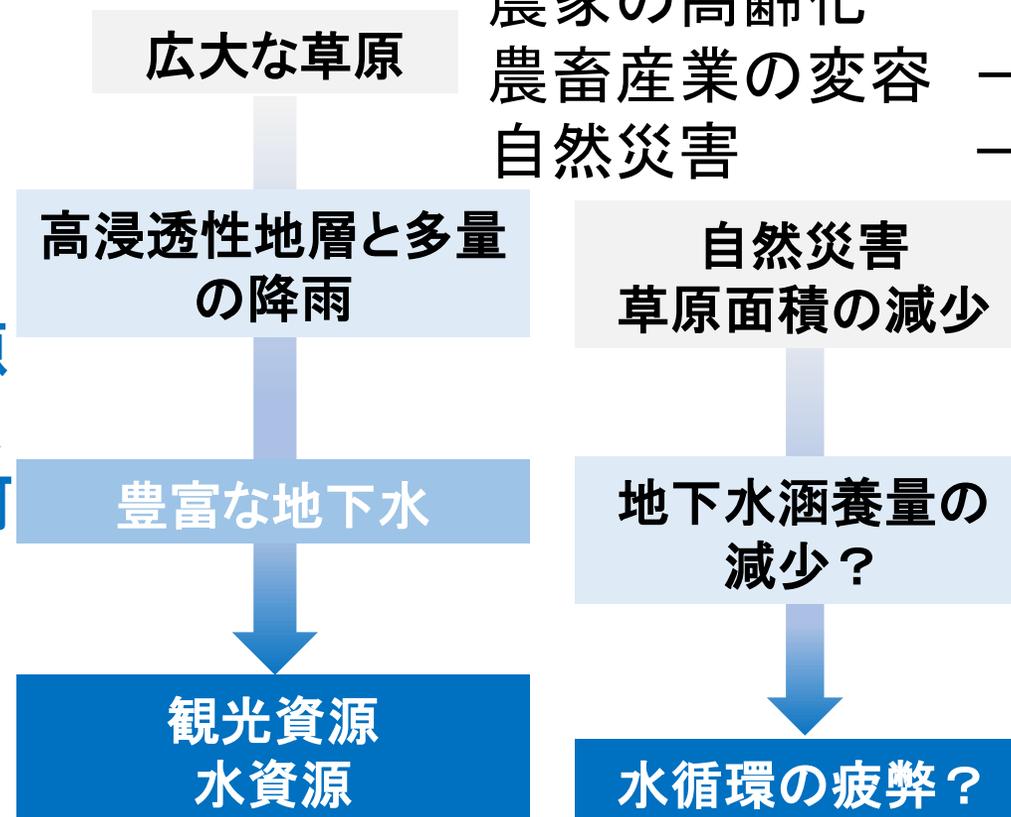
草原(景観)や白川水源は**観光資源**
地下水は地域住民の貴重な**水資源**
阿蘇カルデラは九州の6つの1級河
川の源流域

● 自然災害

2012年九州北部豪雨 → 土砂災害
2016年熊本地震 → 土砂災害、
水田の地割れ

● 草原面積の減少

農家の高齢化
農畜産業の変容 → 野草需要減少
自然災害 → 土砂災害



これまで、水文
現象に関わる
包括的な調査・
研究は行われ
ていない。

1.はじめに(研究背景)2

将来の(求められる)社会

● 地域循環共生圏

阿蘇の豊かな自然と水資源を背景とした農畜産業
自然や文化を中心とする観光
農村部と都市圏を連携する一つのモデル

● 創造的復興

環境・生命文明社会の構築を見据える



**地域循環共生圏を構築する創造的復興が、
今後の持続可能な社会構築に不可欠。**

2. 研究開発目的1

阿蘇カルデラの抱える問題

- 定量的な水文調査は断片的で、必ずしも系統的ではない。
- 森林に比べて草原が水循環に及ぼす効果についての知見は限られている。
- 各種災害からの復興について、創造的復興に至っているとさえ、それに資する資料も少ない。

問題をクリアすることで

- 阿蘇草原の持続可能な在り方について提言。
- 阿蘇における農畜産業などの産業資源、自然景観などの観光資源の保全活性化の方向性を打ち出す。

熊本都市圏との人的、経済的交流という活力ある地域循環共生圏構築への1つの方向性を提示。

2. 研究開発目的2

具体的な目的

① 土地被覆の変化

衛星画像から、水循環の中核をなす水田と草原面積の変化を把握

② 水文データ観測

地表面浸透能、水田の減水深、河川流量、地下水位、湧水量等の把握。

③ 水循環シミュレーション

①と②で得られるデータから水循環モデルを構築し、これまでの土地被覆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。

④ 政策提案

草原や水田の保全策を提案。

3. 研究目標

- 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を評価
- 熊本地震等の災害による水循環への影響を評価
- 水循環における草原、水田等農畜産業の重要性を評価

減水深、河川流量、地下水位、湧水量等の水文データの収集 【サブテーマ1】

阿蘇カルデラ内から熊本地域の水循環を解析するモデルを構築 【サブテーマ1】

衛星画像およびGISによる阿蘇・熊本地域の土地利用変化を評価 【サブテーマ2】

草原および森林の浸透能力を評価 【サブテーマ2】

- 中山間農地における土地利用の変化と災害からの復旧状況を評価

衛星画像およびGISによる阿蘇・熊本地域の土地利用変化を評価 【サブテーマ2】

聞き取りと統計データによる農業への地震被害と復旧状況評価 【サブテーマ3】

- 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

【テーマ全体】

4. 研究開発内容1

<サブテーマ1>

【水文調査】

- 水田の減水深
- 湧水の湧出量
- 地下水の観測データ
- 冬季湛水
- 地盤の透水係数
- 立野火口瀬の地下水

<サブテーマ2>

【衛星画像解析・水文調査】

- 阿蘇カルデラの土地被覆
- 熊本地域の土地被覆
- 地震被害(土砂崩壊)
- 森林・草原の浸透能

<サブテーマ3>

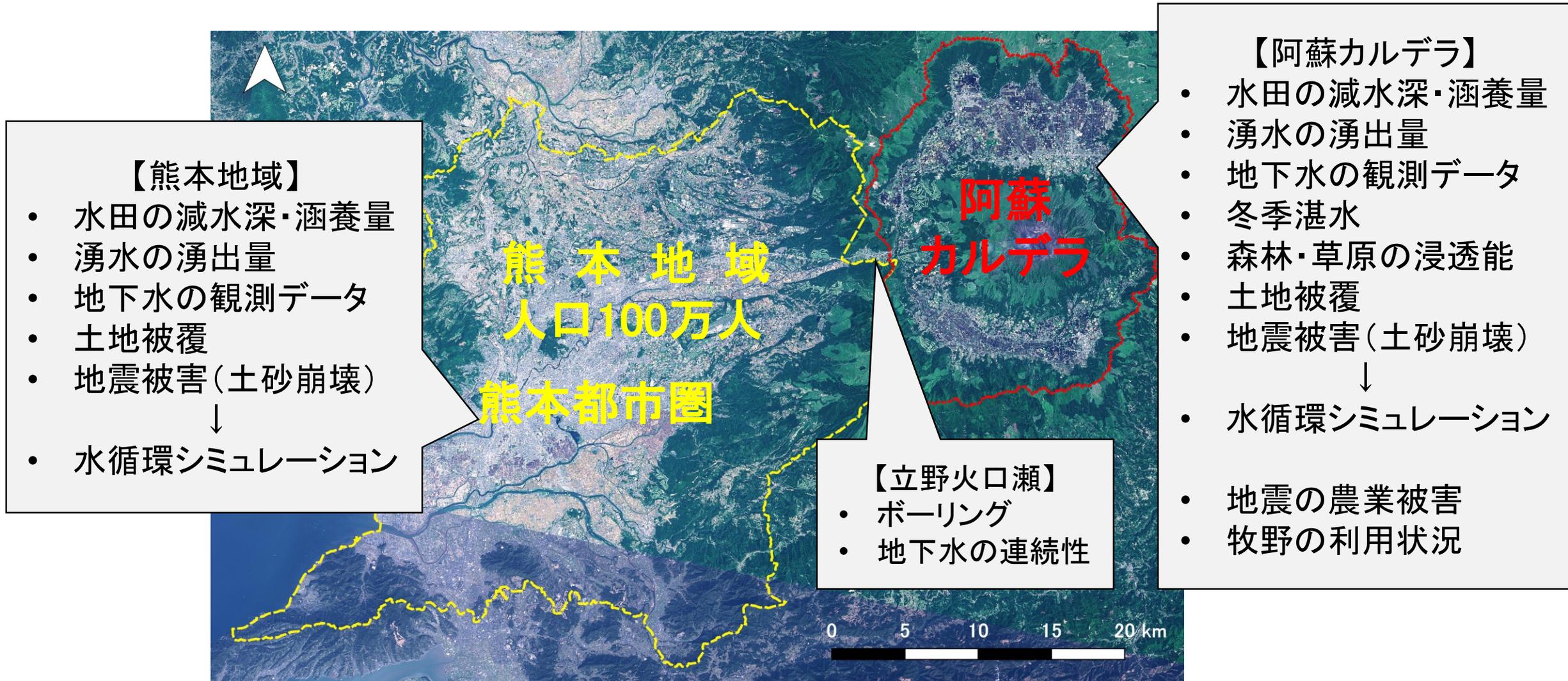
【聞き取り調査・衛星画像解析】

- 地震の農業被害
- 牧野の利用状況

水循環シミュレーション(阿蘇カルデラ・熊本地域) <サブテーマ1>

政策提案(創造的復興・地域循環共生圏)

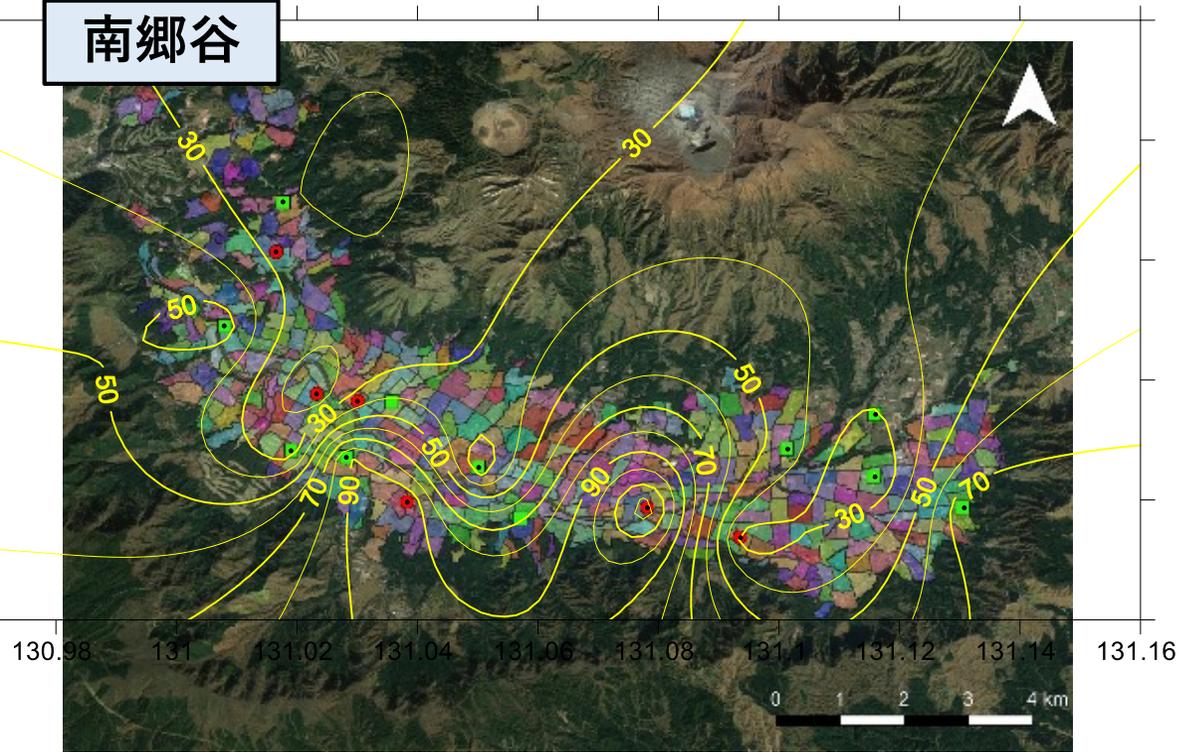
4. 研究開発内容2



出展: 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))

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-水田の減水深と涵養量

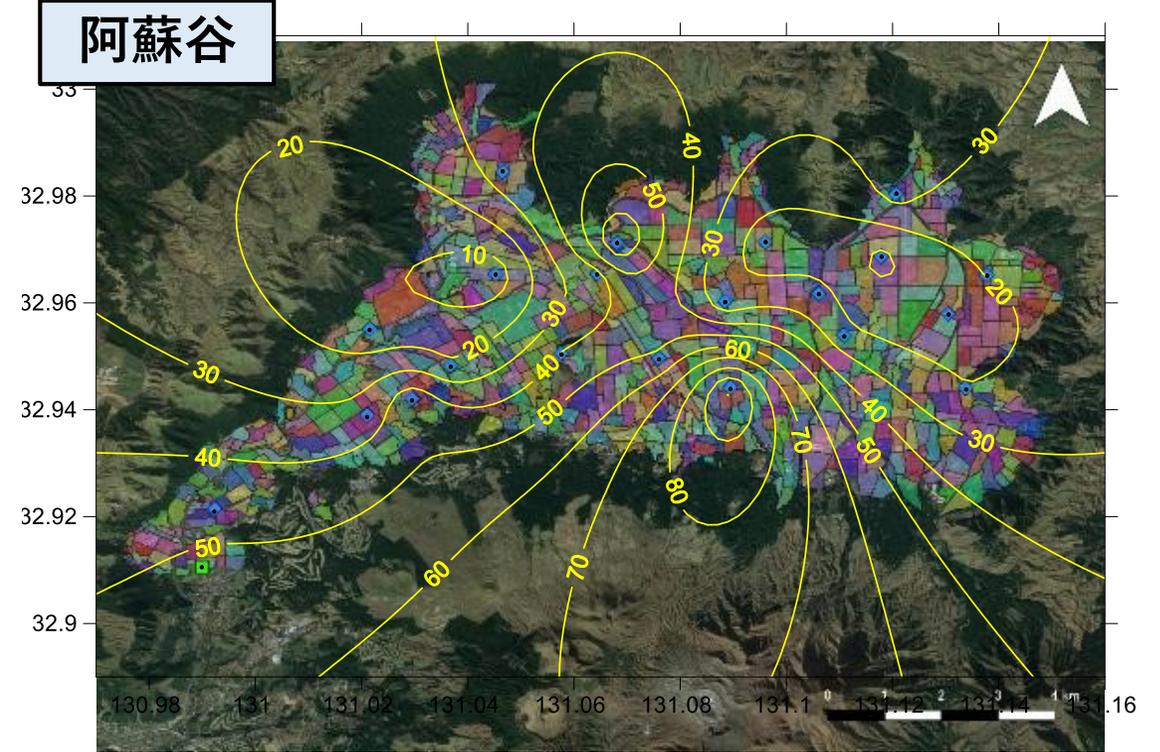
南郷谷



中干前の減水深 (mm/日)

- 水田面積 : 1,340 ha
- 中干前減水深 : 12.0 ~ 127.8 mm/日 (平均47.5mm/日)
- 中干後減水深 : 29.3 ~ 217.9 mm/日 (平均87.6mm/日)
- 涵養量 : 82.4 百万m³

阿蘇谷



中干前の減水深 (mm/日)

- 水田面積 : 3,068 ha
- 中干前減水深 : 4.4 ~ 102.0 mm/日 (平均33.6mm/日)
- 中干後減水深 : 25.3 ~ 235.2 mm/日 (平均74.1mm/日)
- 涵養量 : 154.4 百万m³

※地図はGoogle mapを使用。水田面積および涵養量は、2015年の食料用水稲とWCSのデータ。

地下水涵養量が大きく、阿蘇の水田が水循環の中で果たす役割は大きい。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-地震の農畜産業への影響

● 水田

【直接被害】

- 地割れ、不陸(ふろく; 地表面の凹凸)、液状化

【間接被害】

- ポンプや地下水道の破損により、河川からの用水の停止

【被害なし】

- 山からの自然水(湧水)が使えた水田は耕作を継続できた



水田被害状況

● 畜産

【被害】

- 畜舎の倒壊、家畜用の水を供給する水道管や地下水をくみ上げるポンプが破損

【対応】

- 自然水(湧水)を代替水源として、水を供給



代替水源(湧水)からの水供給

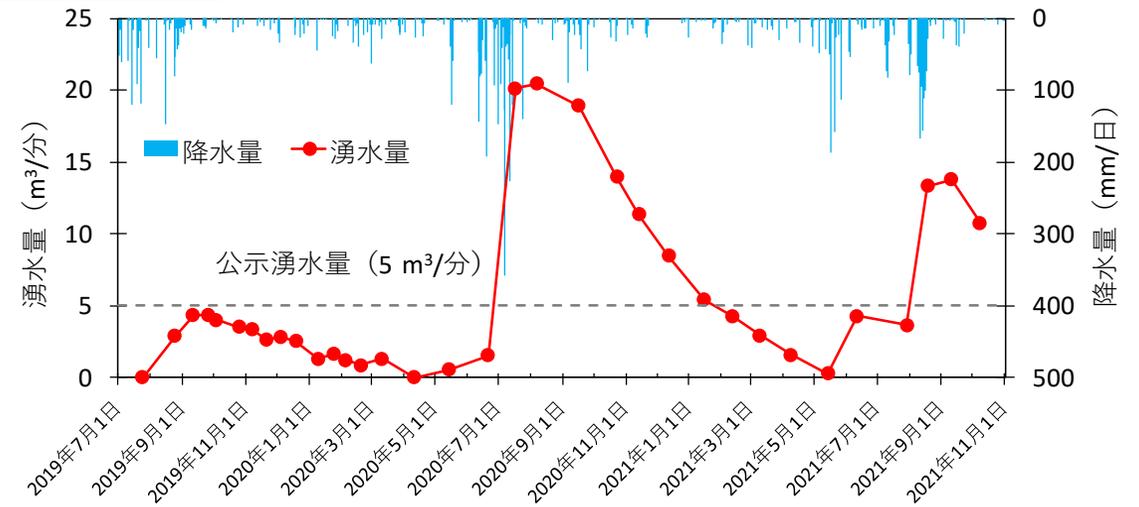
自然水(湧水)は、災害時にも利用することができる。→ 災害発生時は自然水の存在が極めて重要。
塩井社水源のように、場所によっては地震により枯渇する可能性がある。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-湧水量

名前	公示湧水量 (m ³ /分)	平均湧水量 (m ³ /分)	最大湧水量 (m ³ /分)	最小湧水量 (m ³ /分)
塩井社水源	5	5.7	20.5	0.0(枯渇)
川地後水源	1	0.4	0.8	0.1
寺坂水源	5	4.0	6.9	1.9
湧沢津水源	5	2.3	3.8	1.7
池の川水源	5	9.4	21.6	5.4
小池水源	13	10.5	14.7	4.9
吉田城 御献上汲場	5	2.0	2.8	1.1
明神池 名水公園	2	2.8	6.3	0.5
白川水源	60	38.0	47.4	29.4
竹崎水源	120	41.3	53.3	31.2
妙見神社 の池	1	1.7	8.9	0.7

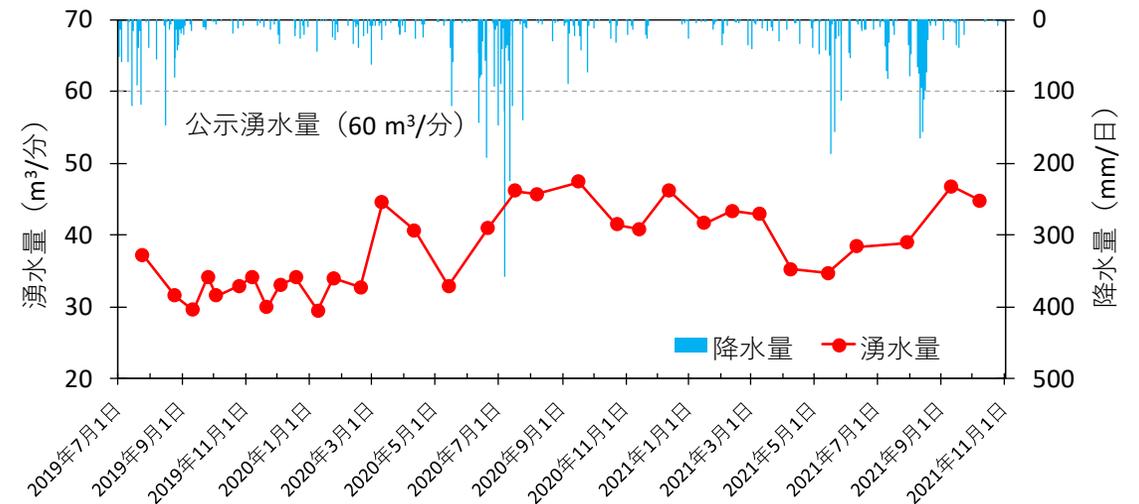
塩井社水源

梅雨前に枯渇or枯渇寸前



白川水源

1年を通じて、60m³/分を下回る



竹崎水源は、両併川へ直接、約60m³/分の湧出量があることを確認済み。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-冬季湛水



湛水時に代掻き

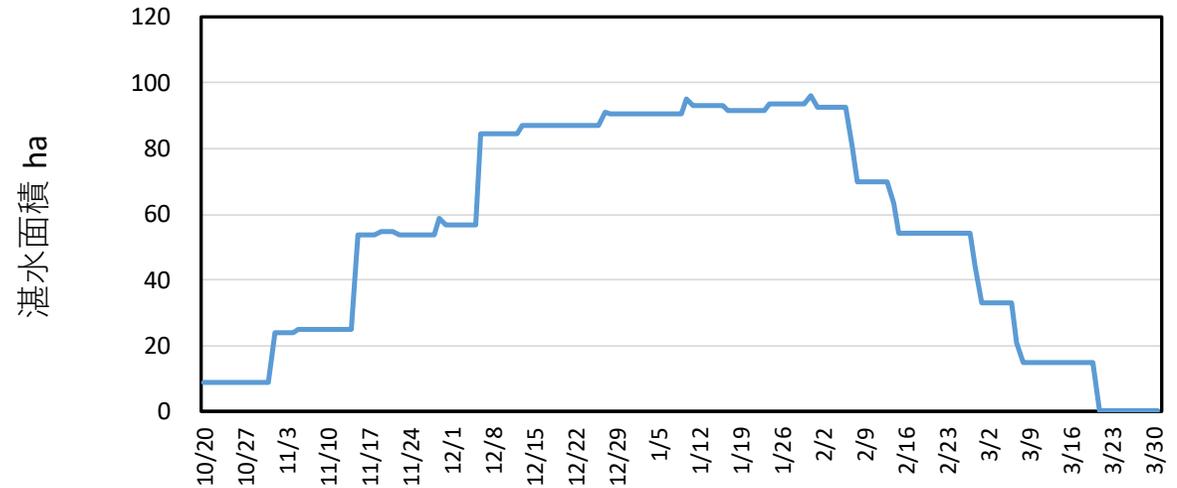
湛水方法は、
農家で異なる。



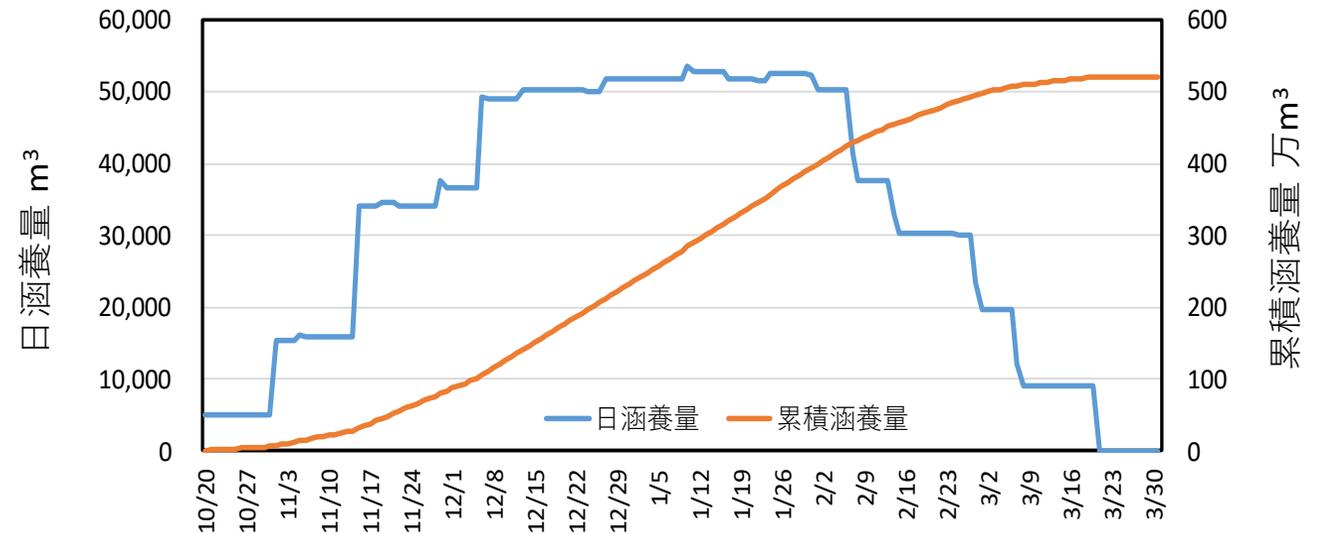
収穫後そのまま湛水

冬季湛水による地下水涵養量は、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^3 の約6.5%に相当する。

湛水面積; 最大約90 ha



累積涵養量; 約520万 m^3



5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-浸透能

S2(牧草:放牧地)



7.8 mm/hour

S6(草原:野焼きなし)



96.5 mm/hour

S7(草原:野焼きあり)



91.1 mm/hour

S11(針葉樹:手入れなし)



197.6 mm/hour

S4(草原:野焼きあり)



野焼き前:99.2 mm/hour
野焼き後:57.8 mm/hour

S8(草原:野焼きあり)

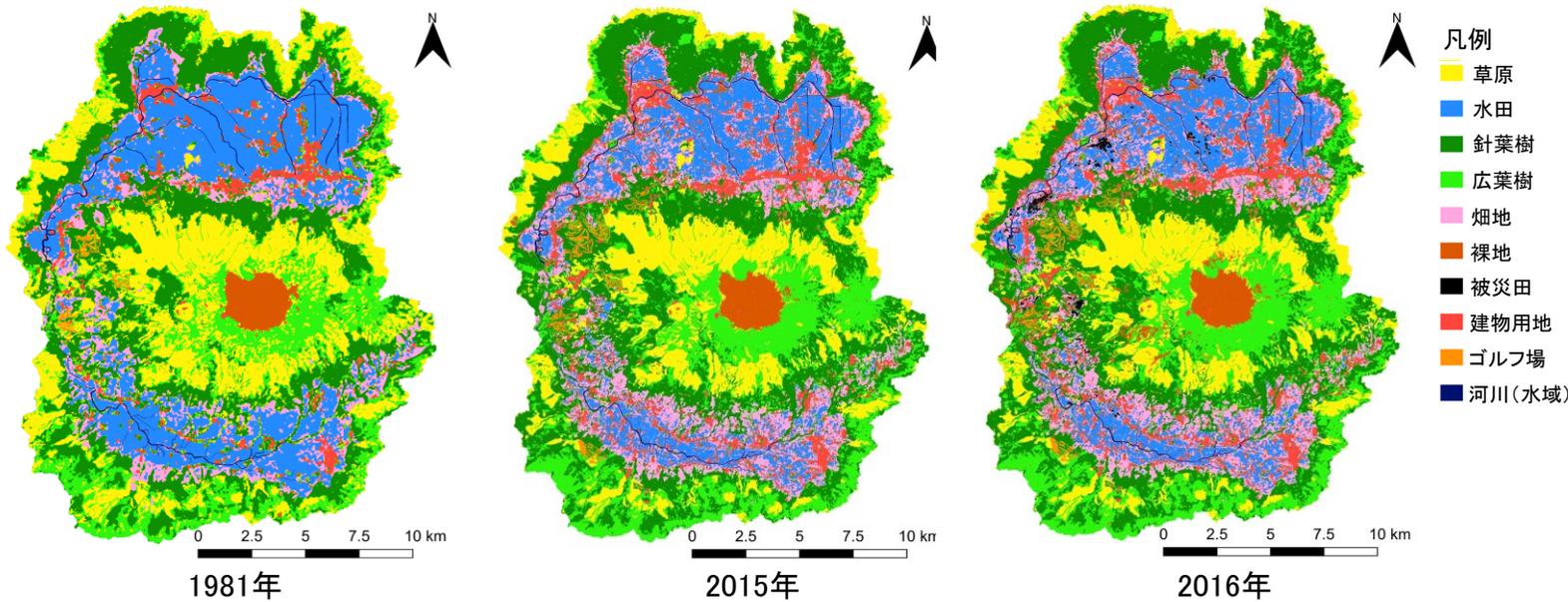


112.7 mm/hour

植生	浸透能(mm/hour)
針葉樹	125.5
広葉樹	194.9
草原(ススキ、ササ)	100.0
草原(牧草)	23.9

※既往の研究を含めた、平均値。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-土地被覆分類

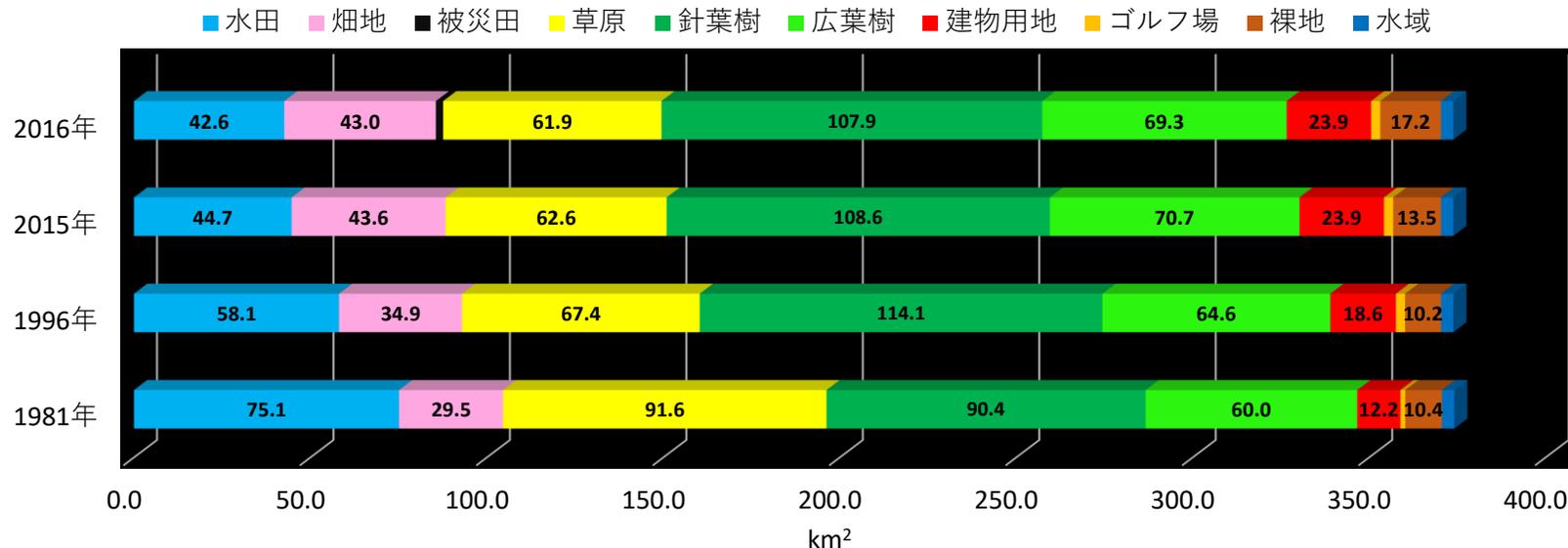


● 1981年から2015年までの変化

- ・水田 : 約40減少
- ・草原 : 約30%減少
- ・森林 : 約20%増加
- ・建物 : 約100%増加

● 熊本地震の影響 (2015年から2016年の変化)

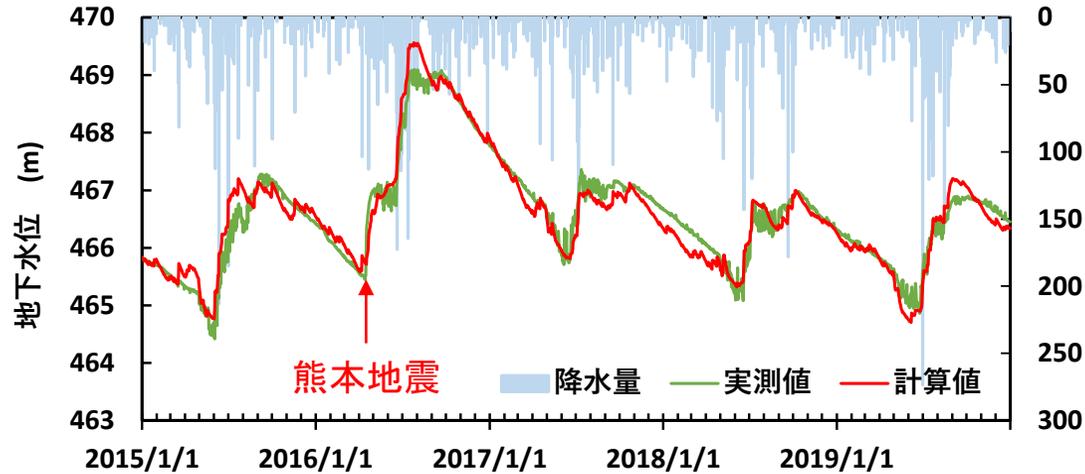
- ・水田・畑地 : 約3%減少
- ・草原 : 約1%減少
- ・森林 : 約1%減少
- ・裸地 : 約27%増加



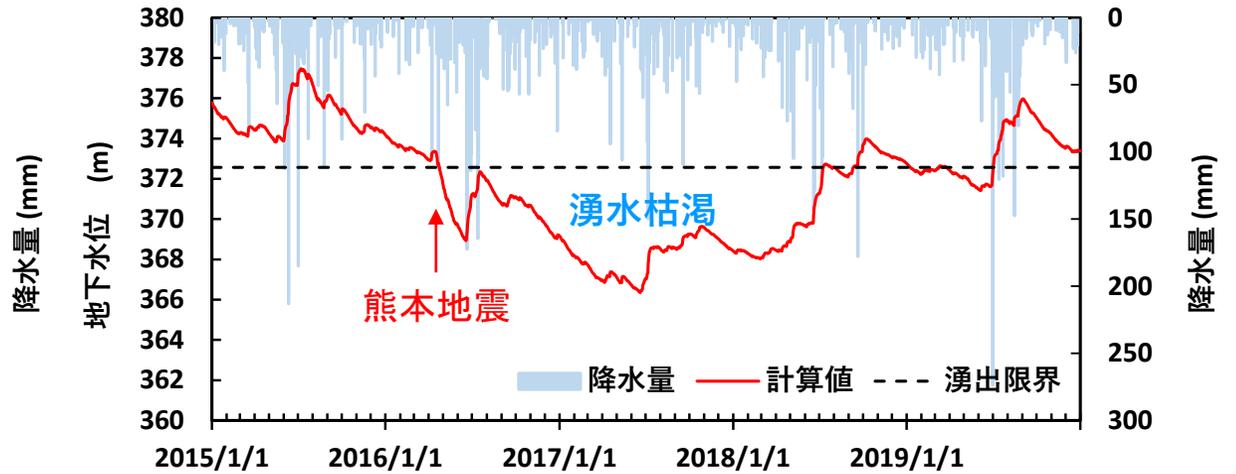
地震による土地被覆の変化は、地震前までの土地被覆の変化に比べて小さい。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-水循環シミュレーション

南郷谷白水における地下水位と水収支計算結果



塩井社水源の属するタンクの計算結果



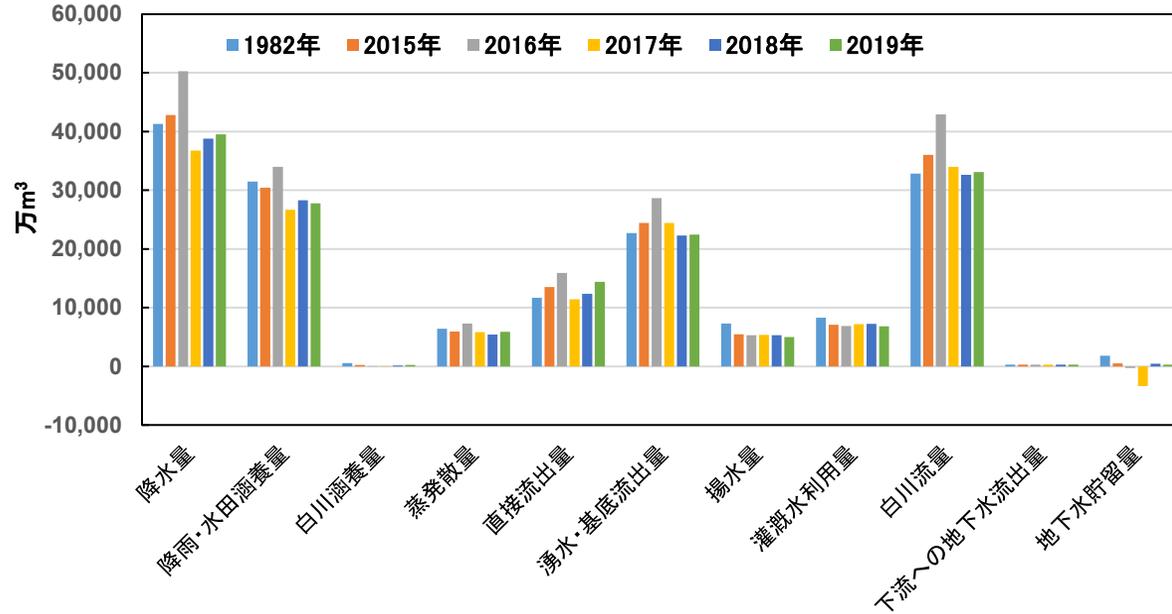
● 地層の透水性の変化

- ・地震によって地層の透水性が上昇したことによって、山体地下水が排水。
- ・山体地下水を受け取る低地部では、地下水位が上昇(左図)。
- ・山体地下水が排水され地下水位が低下することで、湧水(塩井社水源)は枯渇(右図)。

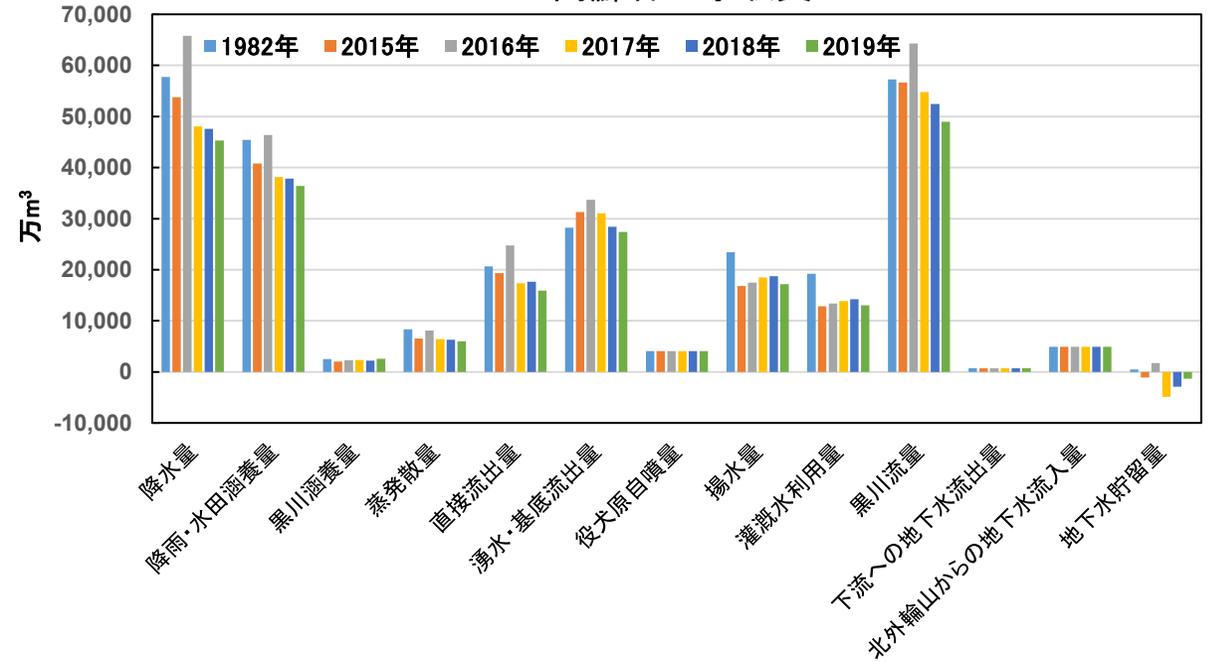
上昇した透水性は元の状態に戻っておらず(地下水が貯留されにくい状態が続いていおり)、塩井社水源は梅雨前に枯渇するようになっている。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-水循環シミュレーション

南郷谷の水収支



阿蘇谷の水収支



- **1982年→2015年**

- ・南郷谷では降水量は増加しているが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**

- ・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り地下水水位が上昇し湧水の湧出量は増加したと考えられる。
 - ・2016年は豪雨が発生したことで、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ない。

5-1. 成果の概要-阿蘇カルデラ-水循環シミュレーション

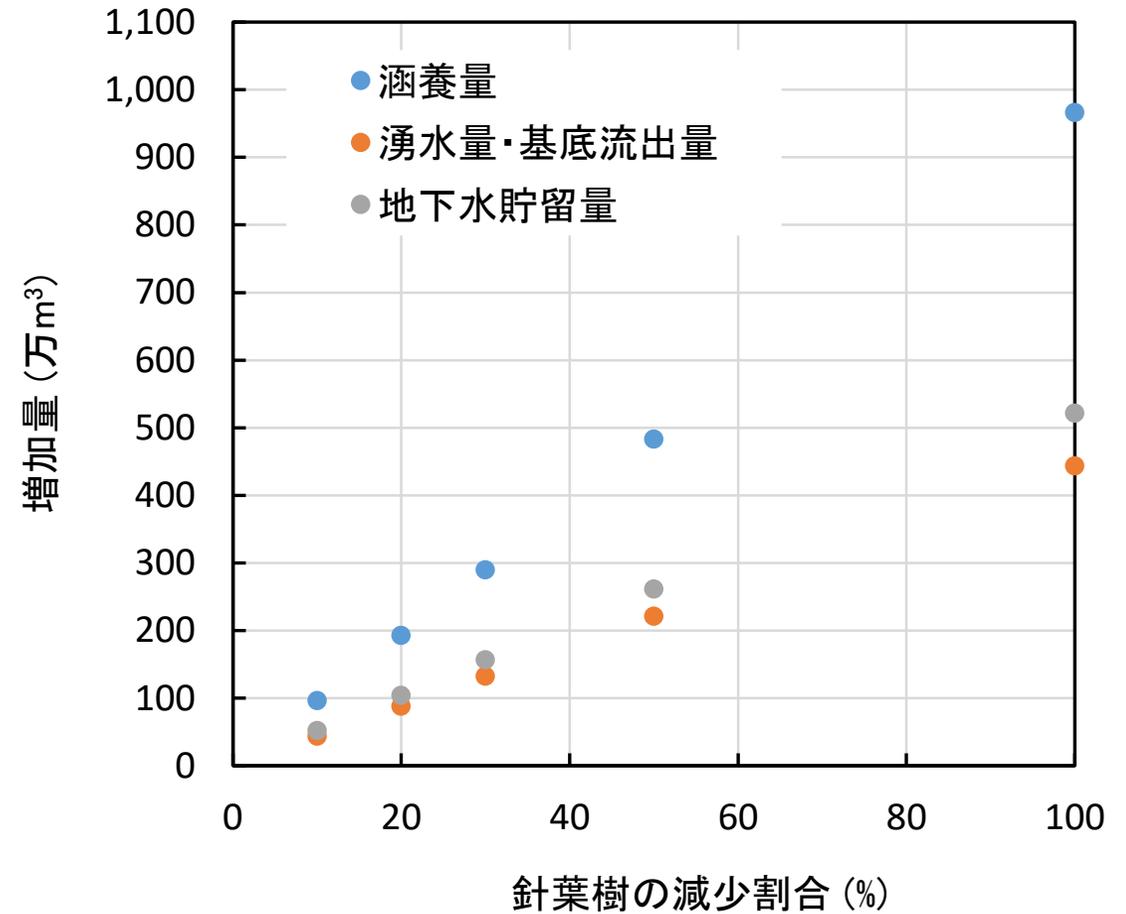
【将来】

- 南郷谷の針葉樹を草原に転換すると
 - ・涵養量は増加
 - ・湧水量・基底流出量は増加
 - ・地下水貯留量は増加

針葉樹を10%(約4.1km²)草原に転換するごとに涵養量は約100万m³増加

- 南郷谷の水田が無くなる(畑地に転換する)と
 - ・涵養量は6,444万m³減少
 - ・湧水量・基底流出量は595万m³減少
 - ・地下水貯留量は352万m³減少

湧水や河川水を利用する水田が無くなることで水循環量が衰退



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

5-1. 成果の概要-立野火口瀬の地下水

● 地層の特徴

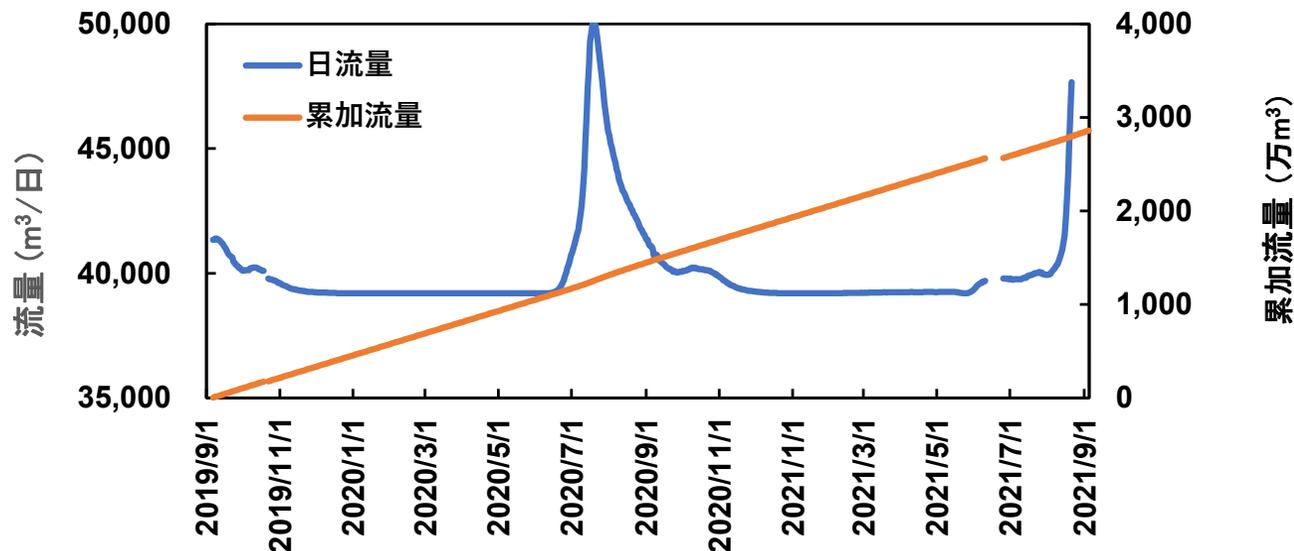
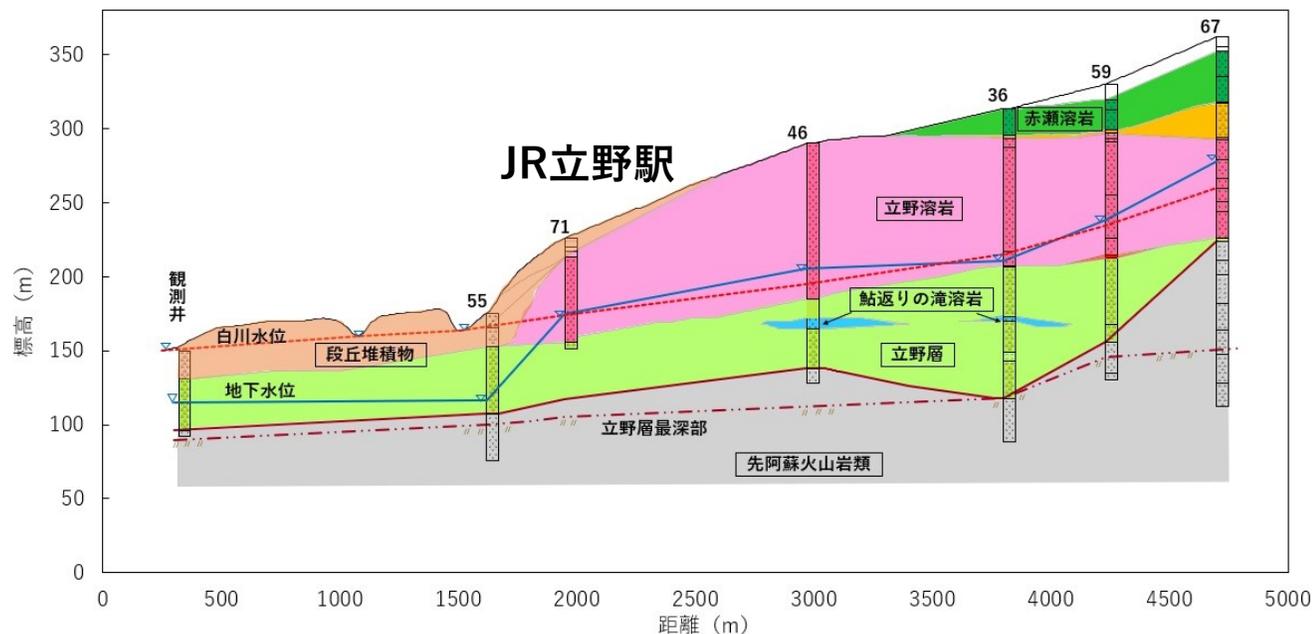
- 立野層(砂礫層)が帯水層を形成
- 平均透水係数が $8.96 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ と高い
- 赤瀬溶岩と鮎返りの滝溶岩は、阿蘇谷と南郷谷でそれぞれ確認

地質学的に阿蘇カルデラと立野火口瀬は連続している。

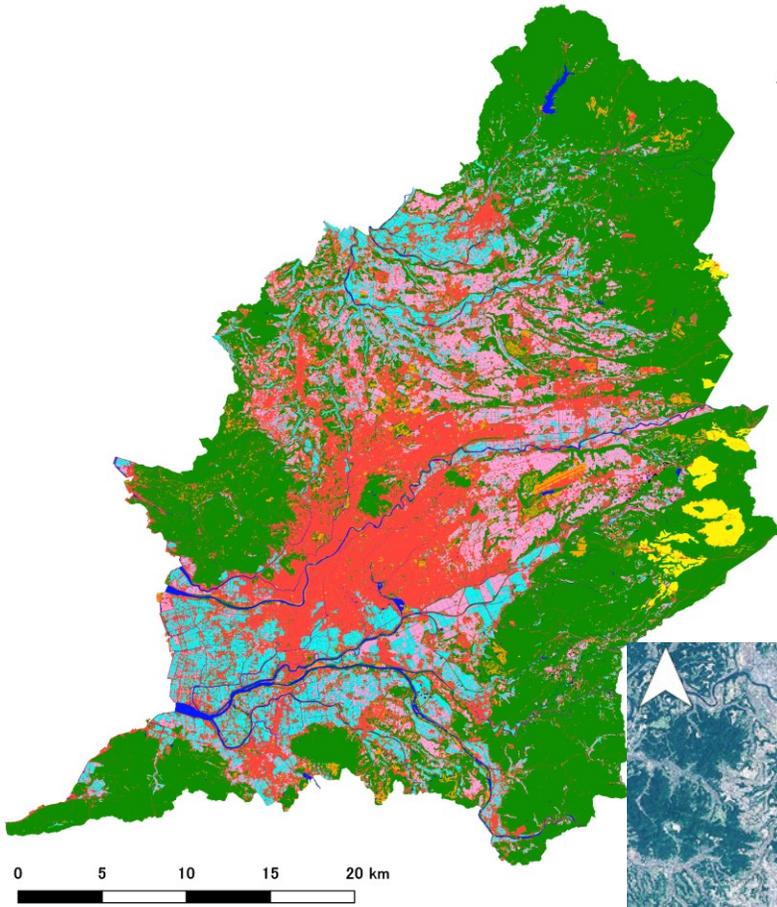
● 地下水流下量

- 日約4万 m^3 (年間約1,500万 m^3)

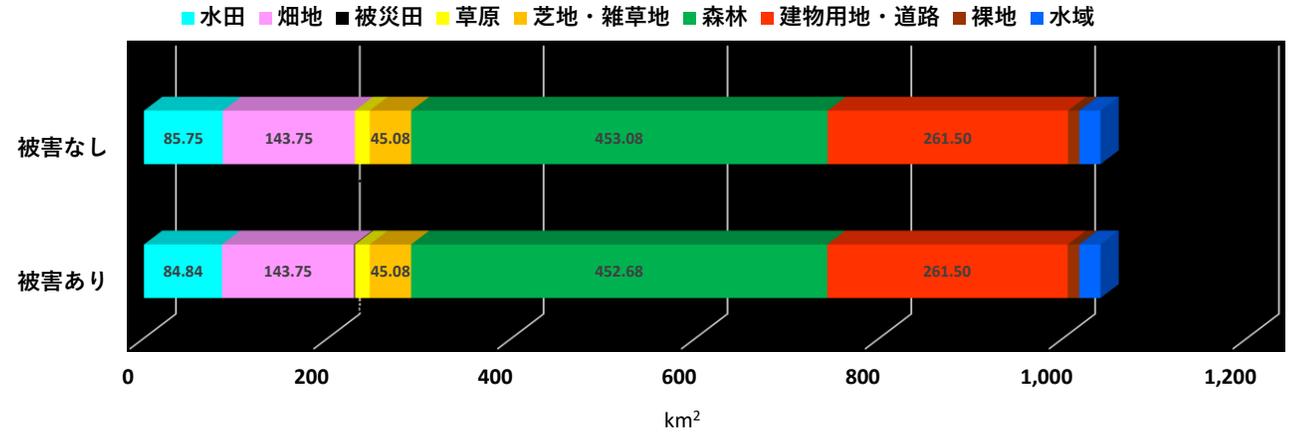
白川の水を使用する白川中流域で涵養される量と合わせると熊本地域の年間地下水涵養量5億5千万 m^3 の約15%が阿蘇カルデラから熊本地域へ供給される。



5-1. 成果の概要-熊本地域-土地被覆分類



- 凡例
- 水田
 - 畑地
 - 芝地・雑草地
 - 森林
 - 建物用地・道路
 - 裸地
 - 被災田
 - 草原
 - 水域

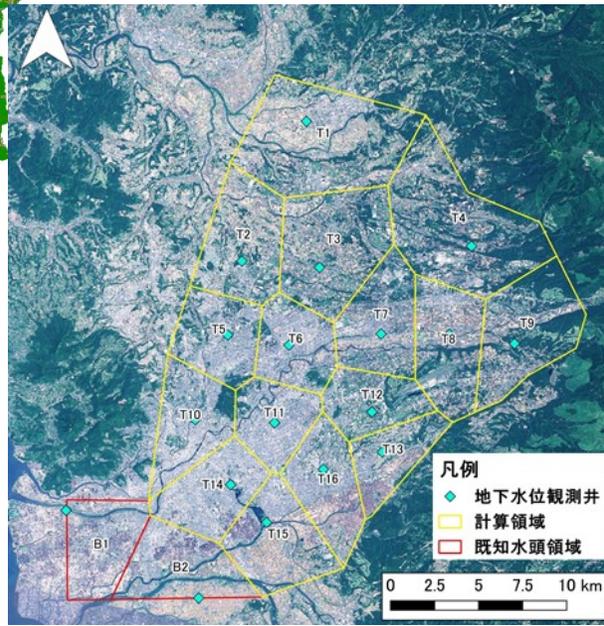


※被害なしは、被災田と土砂崩壊による草原と森林面積の減少がない場合。

● 熊本地震・豪雨の影響

- ・水田 : 約0.91km²減少
- ・草原 : 約0.01km²減少
- ・森林 : 約0.41km²減少

※水田は、畑地として利用された分を入れるとさらに減少していると推測される。

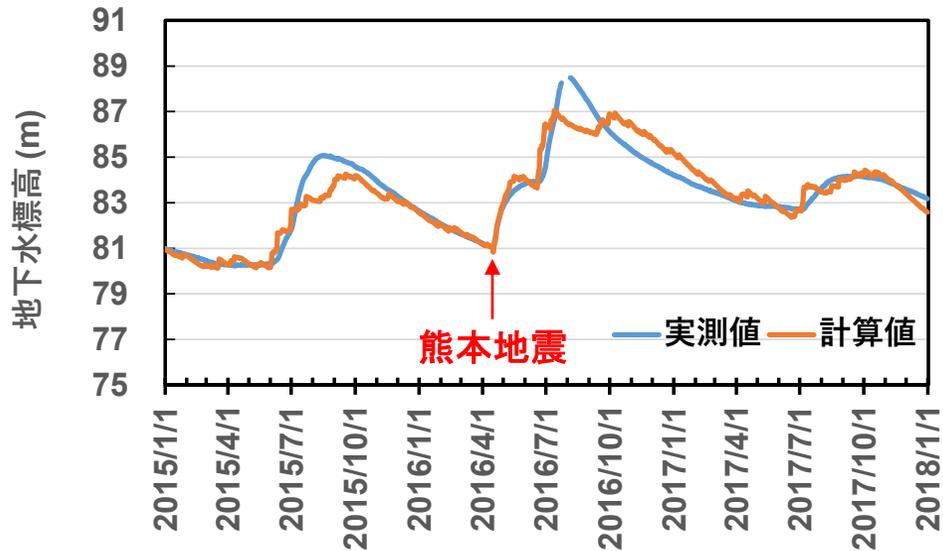


- 凡例
- ◆ 地下水位観測井
 - 計算領域
 - 既知水頭領域

熊本地震・豪雨による土地被覆の変化は、全体面積の1%にも満たない。

5-1. 成果の概要-熊本地域-水循環シミュレーション

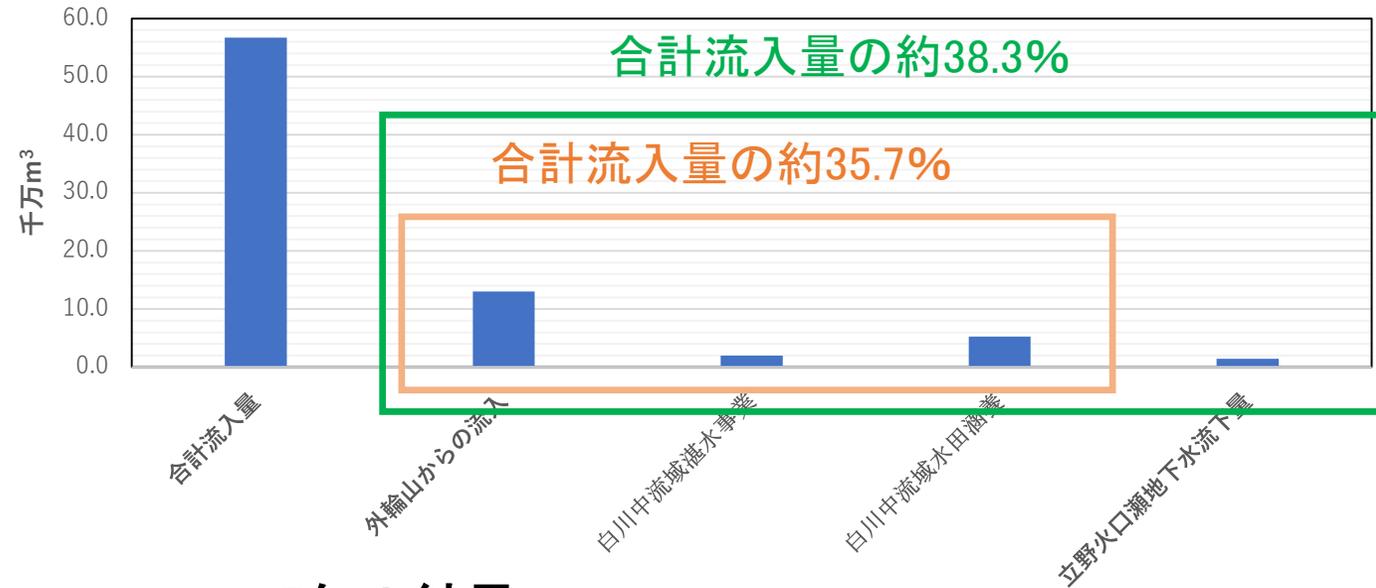
大津(熊本県管轄)の地下水位とT4の水収支計算結果



● 地層の透水性の変化

- ・地震によって地層の透水性が上昇したことによって、山体地下水が排水。
- ・外輪山の山体地下水が排水され地下水位が低下することで、俵山の湧水(揺ヶ池)は枯渇。

阿蘇外輪山西側斜面の山体地下水を受け取ることで、地下水位は異常に上昇(上図)。



● 2015年の結果

- ・合計流入量約5億6千万m³のうち約1億3千万m³は外輪山、約7千万m³は阿蘇を源流域とする白川の水を利用する白川中流域の水田および湛水事業により涵養される。
- ・立野火口瀬における地下水流下量を考慮すると、阿蘇外輪山から熊本地域へ2億2千万m³の地下水(全涵養量の約38.3%)が供給されている。

阿蘇山と熊本地域は、地域水循環共生圏を構成している。

● 地震被害と対応

湧水の枯渇、灌漑水路の破損のような農業被害

湧水回復に要する時間や農畜産業被害への対策事例調査

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。

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に資する資料として活用が期待。

5-2. 環境政策への貢献2

● 水田と草原

農業政策や地震による土地利用の変化

水文データ収集、衛星画像解析 → 水循環シミュレーション

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

草原の価値の見直しや水田の耕作放棄対策を提言

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。

5-2. 環境政策への貢献3

● 阿蘇カルデラと熊本地域の地下水

立野火口瀬に地下水位観測井を設置

阿蘇カルデラと熊本地域の地下水の連続性を確認

年間の地下水流下量を定量化

阿蘇カルデラと熊本地域が地域水循環共生圏を構築していると認識させるとともに、阿蘇カルデラの水保全政策への熊本地域（下流都市圏）の参画を促す資料として活用が期待。

6. 研究成果の発表状況1

誌上発表〈査読付き論文〉

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. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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

その他誌上発表〈査読なし〉

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). (熊本県農業技術課へ提出).
2. K. HASHIMOTO and K. CHO: Proc. 7th IEEEJ Int. Conf. Image Electron. Vis. Comput. (IEVC 2021), 4A-3, 1-2 (2021) Evaluating the Suitable Resolution of UAV Images for Identifying Different Vegetation
3. K. CHO, O. UCHIDA and K. UTSU: Proc. 40th Asian Conf. Remote Sens., ThF3-1, 1-8 (2019) Development of the Glocal Monitoring System.
4. 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

6. 研究成果の発表状況2

口頭発表〈学会等〉

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. 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.”
5. 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」
6. H. AMANO, T. ICHIKAWA and K. NAKAGAWA: Asia Oceania Geosciences Society 18th ANNUAL MEETING, Online, 2021 “Effects of sabo dam construction on water circulation in Maki, Ozu, Kumamoto.”
7. 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」
8. 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」
9. 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」
10. 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」
11. 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」
12. 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.”
13. 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」
14. 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」
15. 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.”
16. 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.”

6. 研究成果の発表状況3

国民との科学・技術対話

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)
2. 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
3. 「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

マスコミ等への公表・報道等

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

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 Presenter Award”

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	1件
本研究に関連する受賞	3件