

# 阿蘇世界文化遺産登録推進 「若手研究」成果論文集

## 第3号

2026年

白川・黒川流域におけるSWATを用いた地下水への窒素負荷の広域推定 .....	荻野 亮介	1
阿蘇地域の半自然草地はあか牛に選ばれる草地なのか: 採食場所と植生および栄養的検討 .....	賀来 真悠子	18
阿蘇草原のOUVを支える住民主体型の草原管理の継続方策に関する考察 ～世界遺産登録後を見据えて～ .....	竹内 亮	34
中世阿蘇地方の仏神像に関する基礎的研究 .....	萬納 恵介	51



はじめに

#### 阿蘇の文化と地下水保全の重要性

阿蘇地域において、地下水と農業は文化の根幹を成す要素の一つである。阿蘇神社や国造神社は湧水が豊富な地点に建立されており、水が地域文化の形成において重要な役割を果たしてきたことが示されている(田中, 2000)。阿蘇神社の主祭神である健甞龍命は農業神としての性格を有し、地域の生産活動を守護する存在として信仰されてきた(田中, 2000)。こうした信仰を背景に、阿蘇地域では草肥や厩肥を水田で利用し、畜産資材として稲わらを活用する「耕畜連携」に基づいた循環型農業が発展した。この農業システムによって維持されてきた草原景観と農業形態は、文化的・生態学的に高い価値を有すると評価され、2013年には世界農業遺産に認定されている。しかし、こうした集約的な農業活動を含む人間活動により、阿蘇地域を含む熊本県の地下水質の悪化が懸念されている(富家ら, 2011)。特に、地下水中の硝酸性窒素濃度の上昇が問題視されており、熊本県は水資源の保全を目的として、2024年に「地下水中の硝酸性窒素対策に関する熊本県基本計画」を策定した。同計画において、農地からの窒素溶脱は地下水への主要な負荷要因の一つとして位置づけられており、持続可能な水資源利用を実現する上で、農業由来の地下水への窒素負荷の実態把握が重要な課題となっている。

#### 阿蘇カルデラ内における窒素動態解明の課題

阿蘇カルデラ内の水文学的側面については、水田を介した地下水涵養量とそのメカニズムが詳細な現地調査に基づき解明されてきた(Amano et al., 2025)。一方、窒素動態の解明には課題が残されている。現在、阿蘇カルデラ内の地下水質モニタリングは年2回程度の頻度に留まっており、流域を対象とした統計データに基づく広域的な窒素収支の試算(北崎ら, 2017)は、熊本市を含む白川流域全体の大まかな傾向把握に主眼が置かれている。地下水中の窒素濃度は施肥や降雨パターンによって季節的に変動することが報告されているが(Kawagoshi et al., 2019)、現在の観測頻度や広域的な統計解析のみでは、こうした時空間的変動を十分に捉えることには限界がある。したがって、複雑な水文・土壌プロセスを考慮可能な水文モデルを活用し、農地利用の実態を反映した窒素負荷の推定手法を構築することが求められている。

## 意思決定のための広域推定の必要性

地下水中の硝酸性窒素濃度の上昇は、乳幼児のメトヘモグロビン血症のリスクを高めるため、公衆衛生上の重要な課題である。特に、水道水源の大部分を地下水に依存する熊本県において、地下水質の保全是市民の健康維持に直結している。これまで、窒素同位体分析等を用いた発生源の特定手法(細野ら, 2015)により、現状の負荷要因が明らかにされてきた。しかし、同位体解析は過去から現在までの状況を評価する手法であり、将来の土地利用の変化や農業施策の変更が地下水質に及ぼす影響を定量的に予測することには限界がある。モデリングを通じた広域推定は、空間的な環境負荷の発生源の特定や、入力条件を変更したシナリオ解析による将来予測を可能とする。したがって、阿蘇地域全体の土地利用や農業活動の実態を反映した評価手法を確立することは、行政担当者や生産者といったステークホルダーが科学的根拠に基づいた水質保全施策を策定する上で有用な基盤となる。

## 河川流域単位での広域水文・水質モデリング

広域における水の動態と、それに伴う窒素の環境負荷を包括的に把握するためには、地形や水系の影響を強く受ける河川流域を解析単位とすることが適している(Kimura et al., 2010)。阿蘇カルデラ内の白川・黒川流域は、それ自体が独立した地下水盆を形成していると同時に、下流に位置する熊本地域への主要な水供給源となっており、この流域単位での評価は水資源管理の観点から有用である。本研究では、農業活動に起因する面源負荷を評価するため、物理学ベースの準分布型水文モデルである Soil and Water Assessment Tool(SWAT)を用いた。SWATは、施肥や耕起といった詳細な農作業をモデル内に組み込むことが可能であり、多様な営農形態を有する農地からの窒素負荷を精度よく推定できる(Gassman et al., 2007)。本研究の目的は、阿蘇カルデラ内の白川・黒川流域を対象に SWAT モデルを構築・検証し、複雑な農業活動に起因する窒素負荷の時空間変動特性を明らかにすることである。

## 第1章 材料と方法

### 対象流域の概要

本研究の対象流域は、熊本県阿蘇市、南阿蘇村、および高森町にまたがる阿蘇カルデラ内の白川・黒川流域(流域面積:約 379 km<sup>2</sup>)である(図 1)。阿蘇火山は九州中央部に位置し、東西 18 km、南北 25 km のカルデラを形成している。本地域の地形は、中央火口丘群である阿蘇五岳を境界として、北側の阿蘇谷と南側の南郷谷に区分される。気象庁阿蘇乙姫観測所(標高 490 m)の統計によると、年平均気温は 13.2°C、年間降水量は 3,010 mm、平均年

間日射時間は 1,697 時間である。

## SWAT 概要

本研究では、流域スケールでの水文過程および窒素動態を推定するため、物理学ベースの準分布型水文モデルである Soil and Water

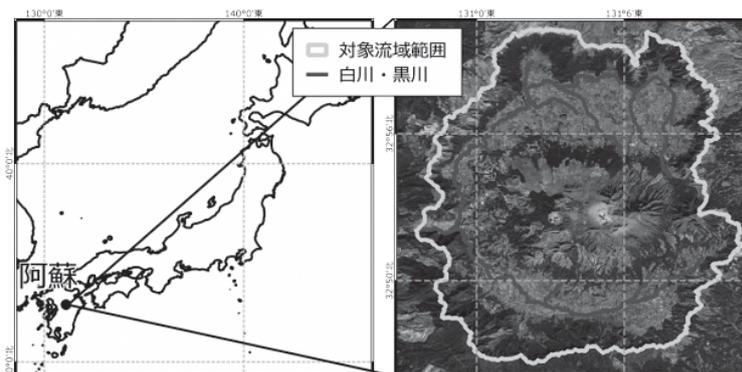


図 1. 阿蘇カルデラ内の白川・黒川流域

Assessment Tool (SWAT) を使用した。SWAT は、地形情報に基づいて流域を複数のサブ流域に分割し、さらに土壌・土地利用・傾斜の組み合わせに基づいて最小計算単位である Hydrologic Response Units (HRU) を作成する。モデルの構築には、SWAT 2012 rev. 692 をベースとし、以下の改良モジュールを組み込んだ。土壌中の地温推定精度を向上させるため、SWAT-FSP (Mihara et al., 2024) を導入した。また、本地域の主要な土地利用である水田における湛水管理、浸透挙動、および還元的環境下での窒素動態を再現するため、SWAT-PADDY (Tsuchiya et al., 2018) を本研究の対象地域に合わせて一部改良して適用した。モデルの基本的な計算アルゴリズムの詳細は、Neitsch et al. (2011) に準拠している。

## 入力データとモデルの構築

本研究では、河川の長期観測データ、既往研究によるデータ、および本研究で実施した現地調査データを収集し、モデルへの入力データセットを構築した。シミュレーション期間は 2010 年 1 月 1 日から 2024 年 12 月 31 日までの 15 年間とし、このうち最初の 5 年間 (2010 年～2014 年) をウォームアップ期間とした。

白川・黒川流域の地形データには、国土地理院の 5 m メッシュ数値標高モデル (DEM) を使用した (図 2(a))。GIS 上で立野地点を流域最下流と定義し、DEM から算出した傾斜に基づき、勾配を 0-17.20%、17.20-34.41%、34.41-71.60%、および 71.60% 以上に分類した。サブ流域分割において、阿蘇市では水土里ネット熊本の水利施設分布図 (図 2(b)) および熊本県阿蘇草原再生・世界遺産推進課の阿蘇景観単位を参照し、同一サブ流域内で水田の主要な灌漑水源の種別 (地下水または河川水) の傾向に基づき分割した。南阿蘇村は河道を境界として南北に分割し、高森町は単一のサブ流域とした。また、白川と黒川の合流点から立野ダムまでの立野地域を独立したサブ流域として設定した。これらの結果、対象流域全体を 11 のサブ流域に分割した (図 2(c))。

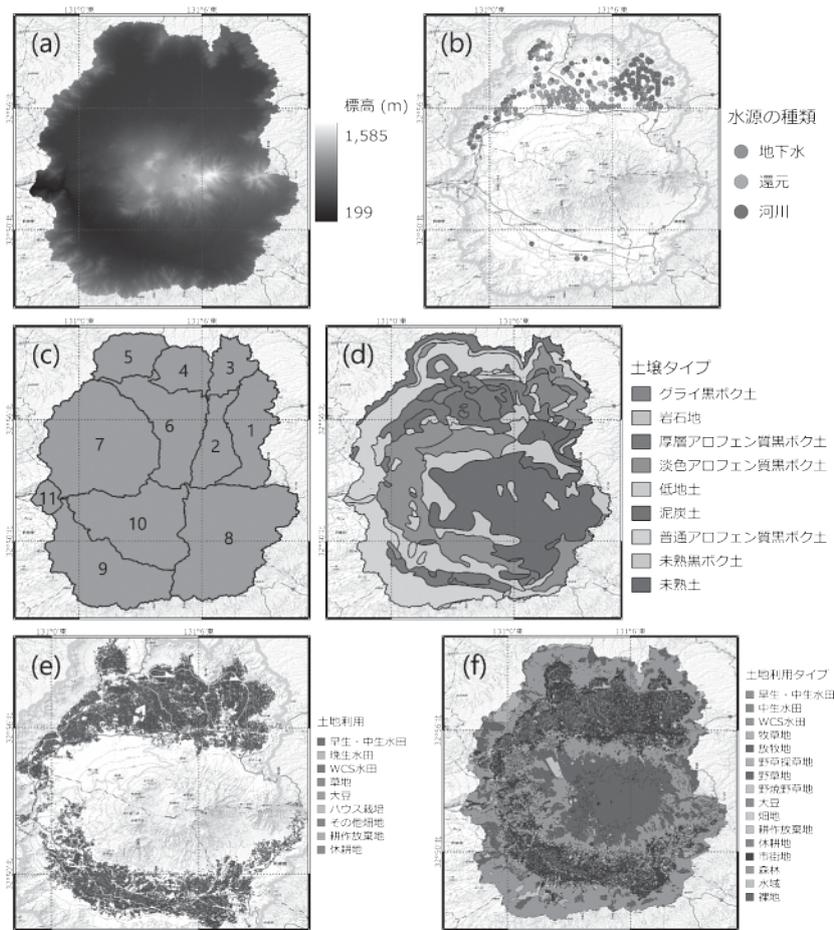


図 2. SWAT の入力データとして使用した 5 m DEM(a)、水土里ネット熊本から提供いただいた水利施設分布図 (b)、本研究におけるサブ流域分割 (c)、SWAT の入力データとして使用した土壤図 (d)、本研究で調査した筆ポリゴンごとの土地利用 (e)、SWAT の入力データとして使用した土地利用図 (f)

流域内の土壤図には、農研機構が公開している包括的土壤分類第 1 次試案 (小原ら, 2011) に準拠した縮尺 20 万分の 1 土壤図を使用した。河川や居住域における欠損データは補完処理を行い、面積割合が小さい土壤タイプは主要な土壤タイプへ統合した (図 2(d))。土壤の理化学性パラメータは、土壤タイプに応じて異なるデータベースを参照した。流域内に広く分布する黒ボク土 (普通アロフェン質黒ボク土、淡色アロフェン質黒ボク土、厚層アロフェン質黒ボク土、未熟黒ボク土) の 4 種類には、農研機構の土壤断面データベースに記載された阿蘇地域のデータを使用した (参照 ID: 畑 43137、畑 43055、mono0120、畑 43058)。同データベースに記載のない項目は、山口ら (2017) および朝田ら (2025) の文献値を参照した。グライ黒ボク土、低地土、泥炭土、および未熟土には、朝田ら (2025) の Solphy-J データベースより、各土壤型の土壤深度、仮比重、粒径組成、飽和透水係数、および炭素含量の平均値

を引用した。礫含量は Solphy-J にデータが欠落していたため、全土壌タイプにおいて土壌断面データベースの値を採用した。岩石露出地のパラメータは SWAT データベースの値を適用した。また、全土壌タイプにおいて最大土壌深度を 1000 mm に統一した。モデルに入力した土壌の理化学性パラメータの詳細を表 1 に示す。

表 1. SWAT に入力した土壌理化学性データベース

土壌名	層	深度	仮比重	有効	飽和透水	炭素含量	粘土	シルト	砂	礫	USLE_K
		mm	g cm <sup>-3</sup>	水分量 mm mm <sup>-1</sup>	係数 mm hr <sup>-1</sup>	%	%	%	%	%	[1]
普通アロフェン 質黒ボク土	1	180	0.870	0.187	225	3.69	6.20	20.4	73.4	0.100	0.164
	2	300	1.00	0.209	136	3.47	5.70	20.4	73.9	0.00	-
	3	1000	0.598	0.265	48.8	1.78	0.00	7.50	92.5	0.400	-
淡色アロフェン 質黒ボク土	1	110	0.618	0.115	205.9	2.94	10.1	17.0	72.9	6.20	0.155
	2	550	0.849	0.121	88.1	2.69	7.80	19.8	72.4	4.40	-
	3	1000	0.793	0.123	87.9	2.64	6.20	38.5	55.3	0.00	-
厚層アロフェン 質黒ボク土	1	180	0.340	0.128	243	8.00	17.0	17.3	65.6	0.00	0.155
	2	390	0.270	0.171	59.3	6.70	18.3	19.0	62.7	0.00	-
	3	530	0.280	0.171	61.1	12.5	30.7	18.5	50.9	0.00	-
	4	600	0.270	0.171	61.1	13.1	46.1	24.7	29.2	0.00	-
	5	780	0.280	0.160	66.8	15.3	46.1	24.7	29.2	0.00	-
	6	1000	0.330	0.157	66.8	6.70	22.5	28.8	48.7	0.00	-
未熟黒ボク土	1	180	0.682	0.126	67.9	2.52	6.11	20.7	73.1	0.900	0.165
	2	450	0.815	0.130	36.3	2.16	5.02	19.9	75.1	1.00	-
	3	1000	0.809	0.112	58.8	1.74	7.30	20.7	72.0	0.900	-
グライ黒ボク土	1	200	0.690	0.219	39.0	3.97	23.7	29.8	46.5	0.00	0.164
	2	420	0.820	0.171	7.71	4.26	24.8	29.7	45.5	0.00	-
	3	1000	0.490	0.279	3.84	3.67	8.10	24.5	67.4	0.00	-
低地土	1	160	0.921	0.175	85.6	3.09	26.8	31.1	42.0	0.00	0.162
	2	390	1.08	0.147	36.3	2.62	30.1	33.7	36.3	0.00	-
	3	670	1.03	0.170	6.98	2.49	27.7	34.6	37.7	0.00	-
	4	1000	0.920	0.171	1.58	3.15	28.0	29.3	42.7	0.00	-
未熟土	1	270	1.04	0.129	43.2	2.13	2.54	7.67	89.8	17.7	0.0902
	2	470	1.17	0.154	97.2	3.50	1.25	6.60	92.2	30.9	-
	3	1000	1.01	0.273	173	1.66	11.1	16.2	72.7	37.4	-
泥炭土	1	160	0.814	0.155	242	5.13	25.0	29.3	45.8	0.00	0.162
	2	330	0.801	0.108	88.8	8.61	28.6	31.3	40.0	0.00	-
	3	1000	0.728	0.125	2.99	12.2	29.6	32.8	37.6	0.00	-
岩石	1	1000	2.50	0.0100	180	0.00	5.00	25.0	70.0	98.0	0.0100

[1] 0.013 t m<sup>2</sup> hr (m<sup>3</sup> t cm)<sup>-1</sup>

土地利用図の作成には、詳細な農業利用状況を反映させるため、複数のデータソースを統合した。農地区画の判別には農林水産省の筆ポリゴンを使用した。各区画の作物分類には、2025年8月に現地展望台から撮影した画像と、2025年の生育期間中(5月、7月、10月)の雲のない Sentinel-2 衛星画像を使用して、ランダムフォレストを用いて、9種類の土地利用への分類を行った(図 2(e))。この手法により分類された食用米水田(早生水田および晩生水田)の推定面積を、JA 阿蘇より提供された 2024 年度の水稲品種別作付面積と比較したところ、両者は良好な一致を示した。最終的な流域全体の土地利用図は、QGIS 3.22.10 を用い、環境省による第 6 回・第 7 回自然環境保全基礎調査(植生調査)のデータをベースマップと

し、その上に阿蘇草原再生情報プラットフォームの土地利用データおよび本研究で作成した農地利用図を順次重ね合わせて作成した(図2(f))。土地利用は、畑地、裸地、休耕地、放牧地、森林、野焼野草地、野草地、野草採草地、採草地、早生水田、晩生水田、WCS水田、耕作放棄地、水域、市街地、大豆の16種類に分類した。

傾斜・サブ流域・土壌・土地利用に基づいて2400のHRUを作成した。

日単位の気象データには、農研機構が提供するメッシュ農業気象データを使用した。シミュレーション期間中における各サブ流域の重心点の、日降水量(mm)、日最高気温および日最低気温(°C)、日平均風速( $\text{m s}^{-1}$ )、日積算日射量( $\text{MJ m}^{-2}$ )、相対湿度(%)を取得し、モデルへの入力値とした。また、欠測データの補完に用いるWeather Generatorの統計パラメータ算出には、日最大30分間降水量および露点温度のデータを使用した。これらの項目は気象庁の阿蘇乙姫、南阿蘇、および高森の各観測所における観測値を使用した。露点温度は、気象庁データの気温と相対湿度から算出した。

水田の営農管理および施肥体系は、地域の公的な栽培指針と現地調査に基づく実態を統合して設定した。基本的な水田の栽培スケジュールは、JA阿蘇が公開している令和7年度特別栽培米栽培暦を基準とし、早生水田にはコシヒカリを、晩生水田にはヒノヒカリの管理暦をそれぞれ適用した(表2)。化学肥料の投入量も、同栽培暦の施肥設計に基づき、窒素の各分量に換算してモデルに入力した。さらに、水田については基肥の約1ヶ月前に $8,000 \text{ kg ha}^{-1}$ の堆肥を散布するように設定した。その他の土地利用(WCS水田、畑地、牧草地等)に関する詳細な営農記録は実データの入手が限定的であったため、一般的な栽培体系を想定した標準的な管理スケジュール(表2)を入力した。また、SWATモデルの植物成長サブモデルで使用される作物生育パラメータは、既往文献の値を参照し、本地域の環境条件に合わせて調整を行った上で使用した。

表 2. SWAT に入力した主要 5 土地利用の農地管理スケジュール

	コシヒカリ	ヒノヒカリ	WCS	大豆	放牧地
4/8	牛糞施肥 68 kgN ha <sup>-1</sup>	牛糞施肥 68 kgN ha <sup>-1</sup>	牛糞施肥 68 kgN ha <sup>-1</sup>		
5/4	基肥 40 kgN ha <sup>-1</sup>				
5/5	代掻き				
5/9		基肥 kgN ha <sup>-1</sup>			放牧開始
5/10	移植・深水 <sup>-1</sup> kgN ha <sup>-1</sup>	代掻き			
5/15		移植・深水			
5/17				基肥・耕起 kgN ha <sup>-1</sup>	
5/18			基肥 kgN ha <sup>-1</sup>		
5/19			代掻き		
5/21			移植・湛水		
5/23				播種	
6/2	浅水				
6/11		浅水			
6/25	中干し	間断灌溉			
7/5	間断灌溉	中干し			
7/15		間断灌溉			
8/3	深水				
8/12		深水			
8/15	間断灌溉				
8/21					放牧終了
9/2		間断灌溉			
9/10	落水				
9/18	収穫				
9/27		落水			
10/3		収穫			
10/12				収穫	
10/24			落水		
11/10			収穫		

流域内における点源負荷として、南阿蘇村に位置する下水処理場からの排水を考慮した。モデルへの入力データには、南阿蘇村水・環境課より提供された、同処理場から白川への排水量および全窒素濃度や硝酸態窒素濃度などの排水水質の観測値を使用した。データの制約上、本研究では南阿蘇村の処理場のみを考慮した。

#### 流域における校正および検証

立野地点では、2016 年以降の国土交通省による流量観測データが公開されていないため、同地点の 2016 年以降の流量を推定するため、上流（白川地点）および下流（陣内地点）の観測流量を説明変数とした重回帰モデル（式 (1)）を構築した。

$$Q_{tateno} = -6.71 + 1.22 \times Q_{shirakawa} + 0.71 \times Q_{jinnai} \quad (1)$$

ここで  $Q_{tateno}$  は立野地点における河川流量 ( $m^3 s^{-1}$ )、 $Q_{shirakawa}$  は白川地点における河川流量 ( $m^3 s^{-1}$ )、 $Q_{jinnai}$  は陣内地点における河川流量 ( $m^3 s^{-1}$ ) である。2016 年以前のデータによる交差検証の結果、決定係数  $R^2$  は 0.95 以上の再現性が確認されたため、本研究ではこのモデルで算出された推定値を、2016 年以降の流量データとしてモデルの校正・検証に用いた。

流量と土砂負荷量の関係については、当研究室が 2023 年および 2024 年に実施した現地観測と、2016 年以前の国土交通省による立野地点における流量・水質観測に基づき、流量-負荷量関係式 (L-Q 式) を作成した (式 (2))。

$$L_{SS} = 0.0141 \times Q^{2.20} \quad (2)$$

ここで  $L_{SS}$  は土砂負荷量 ( $t \text{ day}^{-1}$ )、 $Q$  は河川流量 ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ ) である。作成した L-Q 式の決定係数  $R^2$  は 0.97 であったため、本研究では式 (2) で算出された流量からこの L-Q 式により推定した土砂負荷量を、モデルの校正・検証に用いた。

立野地点では、2016 年以降の水質観測データが入手できないため、本研究では 2016 年以前の観測データを用いて、高流量時の観測データに重み付けを適用した L-Q 式を作成した (式 (3))。

$$L_{TN} = 120 \times Q^{0.916} \quad (3)$$

ここで  $L_{TN}$  は全窒素負荷量 ( $kgN \text{ day}^{-1}$ )、 $Q$  は河川流量 ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ ) である。作成した L-Q 式の決定係数  $R^2$  は 0.90 であったため、本研究では式 (2) で算出された流量からこの L-Q 式により推定した全窒素負荷量を、モデルの校正・検証に用いた。

SWAT の出力値が白川・黒川流域内での観測値と一致するようにパラメータの校正と検証を実施した。SWAT の物理式は様々な閾値や係数などのパラメータを持つ。実測値の適用や推定が困難なパラメータに対しては、設定範囲内で各パラメータを変化させ、流域全体における比較可能な指標 (河川流量、水質など) を目的変数として、観測値と SWAT 推定値を比較した。このプロセスは 2 つの段階に分けられる。1 つ目の校正段階では、観測値と推定値の一致度が最大となるパラメータセットを作成する。2 つ目の検証段階では、校正で作成したパラメータセットを校正とは異なる期間に適用し、観測値と推定値の一致度を評価する。本研究では、校正期間で最も一致度の高かったパラメータセットを用いて全期間および検証期間のパフォーマンス評価を行った。パラメータは特定の範囲内でランダムに変化させ、校正と検証を実施した。校正と検証の目的変数は白川・黒川流域最下流の立野地点における日流量、土砂負荷量、全窒素負荷量とした。本研究では校正期間を 2015 年から 2019 年、検証期間を 2020 年から 2023 年に設定した。

校正と検証の目的変数における観測値と SWAT 推定値の一致度を評価するために、決定係数 ( $R^2$ ; 式 (4))、ナッシュ・サトクリフ係数 (NSE; 式 (5))、パーセントバイアス (PBIAS; 式 (6)) の 3 つの評価指標を使用した。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - O_{ave})(S_i - S_{ave})]}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_{ave})^2]} \quad (4)$$

$$NSE=1-[\sum_{i=1}^n(O_r S_i)^2 / \sum_{i=1}^n(O_r O_{ave})^2] \quad (5)$$

$$PBIAS=[\sum_{i=1}^n(S_i-O) / \sum_{i=1}^n O] \times 100 \quad (6)$$

ここで、 $O_i$  は  $i$  番目の実測値、 $O_{ave}$  は実測値の平均値、 $S_i$  は  $i$  番目の推定値、 $S_{ave}$  は推定値の平均値、 $n$  はデータの総数である。

#### 水田および地下水における校正と検証

本研究では、河川の再現性に加えて、阿蘇地域の水循環において重要な役割を果たす地下水涵養プロセスがモデル内で適切に表現されているかを検証するため、水田および地下水において既往研究の実測値および推定値を用いたパラメータの校正を行った。

研究では水田の日減水深を  $33.6 \text{ mm day}^{-1}$  に設定した(市川ら, 2022)。また、山崎ら(2022)が流域内の実験水田において実測した地下浸透水量を実測値として、当該実験水田の条件に合致する HRU(サブ流域:6、土地利用:WCS 水田、土壌:厚層アロフェン質黒ボク土、傾斜:0-17.20%)における、山崎ら(2022)の観測期間における積算地下浸透水量のシミュレーション値が実測値と一致するように水田のすき床層の飽和透水係数を校正した。その後、南郷谷における水田から地下水への涵養量(天野ら, 2020)および阿蘇カルデラ内における涵養量(市川ら, 2022)について、南郷谷に該当するサブ流域(8, 9, 10, 11)および流域全体の水田から浅層帯水層への地下浸透水量をこれらの値と比較した。

阿蘇カルデラは閉鎖的な地下水盆を形成しているが、市川ら(2022)による広域的な水収支解析によると、カルデラ内の地下水盆から地下水を通じてカルデラ外へ流出する水量が年間約  $1,500 \text{ 万 m}^3$  存在すると推定されている。SWAT の構造上、地下水は浅層帯水層と深層帯水層の二層に区分され、深層帯水層へ移動した水は流域システム系外への損失として扱われる。また、SWAT では河道を通じた移動を除き、サブ流域間の地下水の水平移動は考慮されず、各サブ流域が独立した地下水貯留を持つ構造となっている。そこで本研究では、このモデル構造を利用し、全サブ流域における浅層帯水層から深層帯水層への移動量の総和をカルデラ外への地下水流出量とみなした上で、市川ら(2022)の値と比較した。

また本研究では、地下水中の硝酸態窒素濃度について検証を行った。実測値として、熊本県環境保全課が阿蘇カルデラ内において実施している井戸水質調査のデータ(硝酸態窒素濃度)を使用した。検証にあたっては、各調査井戸が位置するサブ流域を特定し、SWAT から出力される当該サブ流域の浅層帯水層における硝酸態窒素濃度(日単位)を抽出し、実際の調査日におけるシミュレーション値と井戸水中の実測値を比較した。

## 窒素負荷の時空間分析

本研究では、阿蘇カルデラ流域における農業活動が地下水への窒素負荷に与える影響を定量的に評価するため、SWAT モデルの出力結果を用いて以下の3つの解析を行った。第一に、土地利用ごとの窒素収支および地下浸透量の定量化を行った。SWAT の最小計算単位である HRU ごとの年平均出力値に基づき、主要な土地利用（水田、畑地、草地、森林など）における窒素のインプット（施肥、固定、降雨）およびアウトプット（作物吸収、脱窒、揮散、河川流出、地下浸透）の年間負荷量を算出した。第二に、窒素負荷発生の時期的特性を明らかにするため、主要な土地利用区分ごとの月別地下浸透窒素量を算出した。第三に、流域内における窒素負荷の空間分布特性を把握するため、各サブ流域に含まれる全 HRU からの硝酸態窒素溶脱量を積算し、サブ流域ごとの年間総負荷量を算出した。

## 第2章 結果

### 流域におけるパラメータの校正と検証

流域最下流における流量、土砂負荷量、全窒素負荷量のパフォーマンスが最も良くなるようにパラメータを調整した。表3に最も評価の高いパラメータセットを使用した際の、校正期間、検証期間、および全期間における SWAT のパフォーマンス評価を示す。

表3. 全期間、校正期間および検証期間における流量、土砂、全窒素のシミュレーション評価

要素	評価指標	期間		
		全期間	校正	検証
流量	R <sup>2</sup>	0.849	0.771	0.893
	NSE	0.797	0.727	0.836
	PBIAS (%)	-11.0	-8.76	-13.8
土砂	R <sup>2</sup>	0.809	0.672	0.858
	NSE	0.437	0.395	0.450
	PBIAS (%)	-7.94	24.1	-27.9
全窒素	R <sup>2</sup>	0.664	0.598	0.735
	NSE	0.619	0.451	0.716
	PBIAS (%)	-16.2	-10.7	-23.0

### 地下浸透水量の比較

山崎ら (2022) における 2015/7/9 から 2015/9/8 の水田 1 と 2 と本研究における比較から、水田のすき床層の飽和透水係数を  $1.77 \text{ mm hr}^{-1}$  に設定した。設定した際の地下浸透水量を比較した結果を表4に示す。

表4. 山崎ら (2022) と本研究における 2015/7/9 から 2015/9/8 の地下浸透水量 ( $\text{mm day}^{-1}$ ) の比較

	地下浸透水量 (水田 1)	地下浸透水量 (水田 2)	水田 1 と 2 の平均	本研究
平均値	34.9	27.8	31.3	32.0
標準偏差	6.65	5.40	3.55	0.0412

水田のすき床層の飽和透水係数を設定したのちに、南郷谷における水田から浅層帯水層への年間の地下浸透水量の総量を算出し、天野ら (2020) における 2015 から 2018 年の水田

からの地下水涵養量を比較した結果を表 5 に示す。

表 5. 天野ら (2020) と本研究における南郷谷の地下水涵養量 ( $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$ ) の比較

年	天野ら (2020)	本研究	相対誤差 (%)
2015	$7.61 \times 10^7$	$7.57 \times 10^7$	-0.505
2016	$7.00 \times 10^7$	$7.95 \times 10^7$	13.6
2017	$6.91 \times 10^7$	$7.45 \times 10^7$	7.80
2018	$6.92 \times 10^7$	$7.19 \times 10^7$	3.86
平均値	$7.11 \times 10^7$	$7.54 \times 10^7$	6.04

また、市川ら (2022) では 2015 年の阿蘇カルデラ内における水田から浅層帯水層への地下水涵養量は年間約 2.3 億  $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$  と推定されており、本研究の 2015 年の流域全体における水田からの地下浸透水量は 2.48 億  $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$  であり、相対誤差は 7.76% であった。また、本研究で推定された浅層帯水層から深層帯水層への年間の水の移動量の平均値は  $1.54 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$  であり、市川ら (2022) の推定値との相対誤差は 2.62% であった。

#### 地下水の硝酸態窒素

熊本県環境保全課が調査した井戸水と本研究で SWAT を用いて推定した地下水中の硝酸態窒素濃度を比較した結果を表 6 に示す。相対誤差は 2021/11/1 のサブ流域 9 における -79.6% から 2019/5/22 のサブ

流域 8 における  $1.00 \times 10^4 \%$

の範囲であった。

#### 窒素負荷の時空間分布

SWAT によって算出された土

地利用ごとの窒素収支を表 7

に示す。いずれの土地利用にお

いても地下浸透は主要な窒素負

荷経路であった。3 種類の水田

における地下浸透窒素量は、早

生水田で  $82.8 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 、

晩生水田で  $127 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 、

WCS 水田で  $127 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$

と算出された。一方、森林や

野焼野草地からの溶脱量は 10

表 6. 熊本県環境保全課が調査した井戸水と本研究の地下水中の硝酸態窒素濃度 ( $\text{mgN L}^{-1}$ ) と相対誤差 (%)

サブ流域	日付	熊本県	本研究	相対誤差 (%)
2	2016/3/17	1.1	2.16	96.1
2	2016/12/8	2.5	2.12	-15.2
2	2017/10/30	2.6	2.08	-20.2
3	2018/10/9	2.6	2.01	-22.7
4	2016/3/17	0.24	2.15	797
6	2016/3/17	0.63	2.26	259
6	2017/10/12	3.9	2.21	-43.4
7	2016/3/17	0.22	2.17	885
7	2016/12/8	2.6	2.13	-18.1
7	2017/10/12	7.2	2.09	-71.0
7	2017/10/30	3.1	2.08	-32.7
7	2022/8/22	8.8	1.86	-78.9
8	2018/10/9	0.25	2.06	722
8	2018/10/9	4.3	2.06	-52.2
8	2018/10/9	5.7	2.06	-63.9
8	2019/5/22	0.02	2.03	$1.00 \times 10^4$
8	2019/8/26	0.67	2.02	201
8	2022/8/8	1.9	1.88	-0.895
9	2016/3/11	1	2.13	113
9	2021/11/1	9	1.84	-79.6
10	2016/3/11	0.56	2.17	287
10	2016/3/11	2.7	2.17	-19.8
10	2021/11/1	5.2	1.89	-63.6
10	2021/12/1	1.9	1.89	-0.632
10	2022/8/1	2.4	1.86	-22.6
10	2022/8/22	7.1	1.86	-73.9

kgN ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> 以下であった。土地利用ごとの地下浸透窒素量の月別変動を図 3 に示す。水田 (早生・晩生・WCS) における窒素負荷の発生時期には明瞭な二峰性のピークが確認され、第一のピークは 5 月、第二のピークは 8 月から 9 月に見られた。サブ流域ごとの単位面積当たりの年間窒素負荷量の空間分布を図 4 に示す。流域中央部に位置するサブ流域 6 において窒素負荷が最も大きく、窒素負荷の顕著なホットスポットであることが特定された。サブ流域 6 に隣接するサブ流域 2、8 においても比較的高い負荷強度が確認された。一方、サブ流域 9 や 10 では負荷量は相対的に小さかった。

表 7. 土地利用ごとの窒素収支

土地利用	インプット (kgN ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )			アウトプット (kgN ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )						
	施肥	窒素固定	降雨	残渣	灌漑	脱窒	NH <sub>3</sub> 揮散	植物吸収	河川流出	地下浸透
畑地	60	-	7.95	20.3	-	$7.72 \times 10^{-3}$	1.01	86.2	21.1	34.1
裸地	-	-	8.25	0.00871	-	$2.05 \times 10^{-4}$	0.210	0.0113	29.3	13.1
休耕地	-	-	7.63	1.77	-	0	0.176	31.2	13.4	10.7
放牧地	-	-	8.24	-	-	$1.45 \times 10^{-5}$	0.0380	34.2	5.15	3.48
森林	-	-	7.01	-	-	$3.82 \times 10^{-3}$	0.157	15.0	6.19	9.19
野焼野草地	-	-	7.96	-	-	$1.46 \times 10^{-4}$	0.183	19.9	2.77	8.46
野草地	-	-	7.98	-	-	$5.31 \times 10^{-4}$	0.189	18.2	5.98	10.5
野草採草地	-	-	7.99	1.82	-	$4.62 \times 10^{-8}$	0.016	33.2	8.80	3.63
水域	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
採草地	66	-	7.65	8.36	-	$2.60 \times 10^{-3}$	0.713	101	6.14	5.41
早生水田	108	-	7.86	16.6	56.9	15.4	0.212	127	5.96	82.8
晩生水田	123	-	7.89	9.34	66.1	39.4	0.620	71.0	7.43	127
WCS 水田	168	-	7.88	9.03	67.4	58.3	0.874	114	10.2	127
耕作放棄地	-	-	7.98	-	-	$1.77 \times 10^{-2}$	0.190	21.7	2.13	19.4
市街地	-	-	7.86	47.8	-	$7.68 \times 10^{-3}$	0.493	47.8	2.59	31.9
大豆	15	46.3	7.97	34.1	-	$3.71 \times 10^{-2}$	0.476	90.0	25.4	55.2

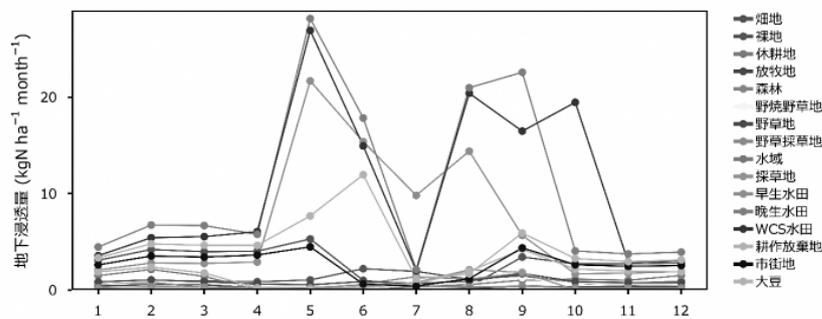


図 3. 土地利用ごとの土壌から浅層帯水層への月間地下浸透窒素量 (kgN ha<sup>-1</sup> month<sup>-1</sup>)

### SWAT による水動態の推定

本研究で構築したSWATにおける河川流量のシミュレーション結果は、Moriasi et al. (2015) が提示する流域モデルの適用性判断基準 ( $R^2 > 0.60$ 、 $NSE > 0.50$ 、 $|PBIAS| < 15\%$ ) を、校正期間・検証期間・全期間ともに満たしており (表 5)、本モデルが対象流域の河川流出挙動を

再現可能であることが示された。また、水田からの地下浸透について、本研究では山崎ら (2022) の知見に基づき、水田 HRU におけるすき床層の飽和透水係数を  $1.77 \text{ mm hr}^{-1}$  に設定した。その結果、モデルで算出された流域全体の水田からの年間地下浸透水量 ( $2.48 \text{ 億 m}^3 \text{ year}^{-1}$ ) は市川ら (2022) による推定値 (約  $2.3 \text{ 億 m}^3 \text{ year}^{-1}$ ) との相対誤差は 8.27% であった。また、天野ら (2020) による 2015 年から 2018 年の推定値との比較においても、相対誤差は

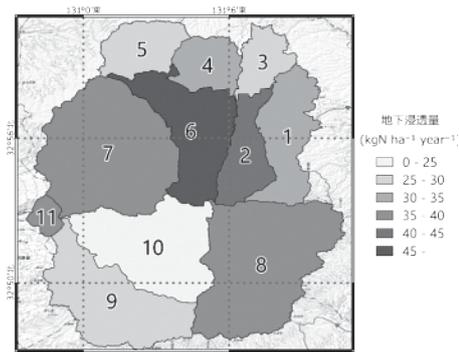


図 4. サブ流域ごとの土壌から浅層帯水層への年間地下浸透窒素量 ( $\text{kgN ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )

-0.125%から 14.5%の範囲であった。これらの既往研究との整合性は、本モデルが河川流量の時系列を再現するのみならず、水田から地下水への鉛直方向の水移動量を定量的に表現できていることを示唆している。さらに、本研究で推定された浅層帯水層から深層帯水層への年間移動量 ( $1.49 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ ) は、市川ら (2022) の推定値 ( $1.50 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ ) と良く一致しており、相対誤差は -0.688%であった。これは、降雨から河川流出に至るプロセスにおいて、地下深部への漏水を含む流域全体の水収支が適切に計算されていることを意味する。以上より、本研究で構築した SWAT は、水田を介した阿蘇特有の地下水涵養プロセスや、深層帯水層を含む流域規模での水動態を再現できたと考えられる。

#### SWAT による窒素動態の推定

本研究で構築した SWAT による土砂および全窒素負荷量の推定結果は、土砂負荷量の校正期間の NSE を除き、Moriassi et al. (2015) が推奨する基準 (土砂・栄養塩の場合:  $R^2 > 0.5$ 、 $\text{NSE} > 0.4$ 、 $|\text{PBIAS}| < 30\%$ ) を満たした (表 3)。これにより、本モデルは対象流域の土砂および窒素負荷を一定程度再現可能であることが示された。一方、モデルで算出された地下水中の硝酸態窒素濃度は、井戸水の実測値と比較して時間変動が小さく、実測値との相対誤差は -79.6%から  $1.00 \times 10^4\%$  の範囲で大きくばらついた。この不一致の要因として、SWAT における地下水質の計算アルゴリズムと、実際の水理地質構造との差異が考えられる。SWAT では、土壌層から浅層帯水層へ溶脱した硝酸態窒素は、帯水層内の貯留水全体と速やかに完全混合されると仮定されている。その結果、新たに流入した窒素負荷は帯水層の貯留水によって希釈され、帯水層全体で均一な濃度として算出される。しかし、実際の帯水層内では、硝酸態窒素は拡散・移流により深度方向に濃度勾配を形成する。特に、河川への基底流出に寄与するのは地表付近の浅層地下水であり、これらは汚染負荷の影響を受けやすい。

本研究では、SWAT の完全混合仮定により地下水中の硝酸態窒素濃度が平準化され、実測値に見られる季節変動や空間変動を再現できなかつたと推察される。このことは、阿蘇カルデラのように地下水貯留量が多い流域において、SWAT の地下水質モデルを適用する際の限界を示唆している。

#### 窒素負荷の時空間分布

SWAT による窒素収支の解析の結果 (表 7)、全ての土地利用において、地下水への浸透が主要な窒素流出経路であることが明らかになった。これは、阿蘇地域が日本国内でも有数の多雨地域であることに加え、流域内の土壌が火山性特有の透水性の高い黒ボク土で構成されているため、降雨や灌漑水が地中深部へ浸透しやすい環境にあることに起因すると考えられる。土地利用ごとの比較では、森林や野草地といった自然生態系からの窒素負荷が相対的に小さかったのに対し、3種類の水田 (早生・晩生・WCS 用) からの負荷量は高い値を示した。自然生態系では窒素循環が系内でほぼ完結しているのに対し、農地では生産性向上のために投入される化学肥料や堆肥などの施肥が、地下水への窒素負荷を増大させる主要因となっていることが示唆された。

水田からの地下浸透窒素量の月別変動 (図 3) には明瞭な季節性が確認され、5 月付近と 8 ～ 9 月付近に二峰性のピークが現れた。この変動メカニズムは、農作業スケジュールおよびイネの生育段階と関連していると考えられる。第一のピークである 5 月の負荷増大は、4 月に行われる堆肥の施用と、5 月の田植え前の基肥施用に起因する。施肥直後に代かきや灌漑による入水が行われることで、土壌中の溶存態窒素が地下へ浸透したと推察される。続く 6 月から 7 月にかけては、負荷量が一時的に減少した。これはイネの分けつ期から伸長期にあたり、生育が活発化することで、土壌中で硝化された窒素の大部分がイネによって吸収されたためと考えられる。なお、早生水田においてはこの時期の減少幅が他の水田より小さかったが、これは早生品種の生育サイクルが早く、この時期においては晩生や WCS 用イネほど急激な窒素吸収を示さなかつたためと推察される。第二のピークである 8 月から 9 月にかけての再上昇は、気象条件と植物生理の両面から説明できる。夏季の高温は土壌中有機態窒素の硝化を促進するが、この時期の集中的な降雨により、生成された硝酸態窒素が溶脱しやすい状況にあった。加えて、イネが登熟期を迎え成熟が進むにつれて窒素吸収能力が低下するため、土壌に残存した窒素が流出しやすくなったと考えられる。また、この第二のピークの収束時期には、品種ごとの栽培管理 (落水時期) の違いが反映されている。早生水田では 9 月に収穫に向けた落水が行われるため 9 月以降の負荷は急減するが、晩生水田では 10 月に

かけて負荷が減少する。一方、WCS 用水田は収穫まで湛水期間を長く保つため、10 月まで高いピークが継続した。

窒素負荷の空間分布 (図 4) を見ると、サブ流域ごとの土地利用傾向が窒素負荷に影響している。流域中央部の平坦地に位置するサブ流域 2 や 6 は、森林面積割合が小さく、施肥を伴う水田の面積割合が大きいため、窒素負荷が集中するホットスポットとなっている。対照的に、外輪山や山間部に位置するサブ流域 10 などは、森林面積割合が大きく農地が少ないため、窒素負荷は低く抑えられていた。これにより、流域全体の水質保全においては、平坦部の農業地帯に対する重点的な管理対策が重要であることが示された。

本研究では SWAT モデルを適用することで、阿蘇カルデラ流域における地下水への窒素負荷が「いつ (季節性)」「どこから (土地利用・サブ流域)」「どのくらい (定量評価)」発生しているのかを包括的に評価することができた。今後は構築したモデルを活用し、土地利用変化のシナリオ解析 (例: 水田から畑地への転換が進んだ場合や、野草地が放棄され森林へと遷移した場合の影響評価) や、気候変動下での降雨パターンの変化が窒素溶脱に与える影響の将来予測などへと研究を発展させる必要がある。一方、本研究の課題として放牧地からの窒素負荷の過小評価が挙げられる。一般に放牧地では家畜排泄物に由来する窒素負荷が大きいとされるが、本解析では低い値にとどまった。これはモデル設定における家畜密度や排泄物の還元プロセスのパラメータ調整に起因する可能性があるため、今後は放牧地における実態調査を含めた詳細な検証が必要である。

## おわりに

本研究は、阿蘇地域の農業活動実態を反映した入力データセットを整備し、水・物質循環の定量評価において一定の信頼性を有するモデルを構築した。モデル解析の結果、水田からの地下浸透が主要な負荷経路であり、施肥管理や気象条件と連動して 5 月および 8～9 月に負荷が集中する季節変動が認められた。また、水田が密集する流域中央部の平坦地が窒素負荷のホットスポットであることが示された。本研究成果は、窒素負荷の発生源と発生時期を空間的・時間的に可視化するものであり、阿蘇地域における持続可能な地下水保全策の策定に資する科学的知見を提供する。

## 謝辞

本研究は令和 7 年度 (2025 年度) 「阿蘇」世界文化遺産登録推進若手研究の援助を得て行

われた。本研究の実施に際し、熊本県阿蘇草原再生・世界遺産推進課、熊本県環境保全課、南阿蘇村水・環境課、鹿児島大学農学部、水土里ネット熊本の方々には貴重な情報を提供していただいた。本紙面を借りて深謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] 天野弘基, 市川勉, 平野葉一, 中川啓「阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について」『土木学会論文集 G (環境)』 76(5), 495-503 (2020).
- [2] Amano, H., Nakagawa, K., Ichikawa, T., & Berndtsson, R. 「Potential Effects of Grassland Restoration on the Water Resources in Nango-Dani, Aso, Japan」『Water (Switzerland)』 17(16) (2025).
- [3] 朝田景, 江口定夫, 高田裕介「日本の農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ」『農研機構研究報告』 23, 77- (2025).
- [4] Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. 「The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions」『Transactions of the ASABE』 50(4), 1211-1250 (2007).
- [5] 市川勉, 平野葉一, 天野弘基, 中川啓「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」『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」』 (2022).
- [6] Kawagoshi, Y., Suenaga, Y., Chi, N. L., Hama, T., Ito, H., & Duc, L. van. 「Understanding nitrate contamination based on the relationship between changes in groundwater levels and changes in water quality with precipitation fluctuations」『Science of the Total Environment』 657, 146-153 (2019).
- [7] Kimura, S. D., Toma, Y., Mu, Z., Yamada, H., & Hatano, R. 「Eco-balance analysis of land use combinations to minimize environmental impacts and maximize farm income in northern Japan」『Sustainability Science』 5(1), 19-27 (2010).
- [8] 北崎結子, 松添直隆, 石橋康弘, 小林淳「白川流域における河川水および湧水の窒素濃度の経月変化と収支」『環境と安全』 8(1), 39-45 (2017).
- [9] Mihara, K., Kuramochi, K., Toma, Y., & Hatano, R. 「Effect of water movement in frozen soil on long-term hydrological simulation of Soil and Water Assessment Tool in cold

- climate watershed in Hokkaido, Japan」『Soil Science and Plant Nutrition』 70(3), 160–173 (2024).
- [10]Moriyasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. 「Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria」『Transactions of the ASABE』 58(6) (2015).
- [11]Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. 『COLLEGE OF AGRICULTURE AND LIFE SCIENCES Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009』 (2011).
- [12] 小原洋, 大倉利明, 高田裕介, 神山和則, 前島勇治, & 浜崎忠雄 「包括的土壌分類 第1次試案」 (2011).
- [13] 田中伸廣 『阿蘇山と水九州の水のふるさと . 一の宮町史自然と文化阿蘇選書 8』 (2000).
- [14] 富家和男, 糸満尚貴, 松山賢司, 柿本竜治, 川越保徳 「熊本都市域における地下水中硝酸性窒素濃度の現状と地理情報システムおよび窒素安定同位体分析による窒素負荷要因の解明」『水環境学会誌』 34(1), 1-9 (2011).
- [15]Tsuchiya, R., Kato, T., Jeong, J., & Arnold, J. G. 「Development of SWAT-paddy for simulating lowland paddy fields」『Sustainability (Switzerland)』 10(9) (2018).
- [16] 山口典子, 久保寺秀夫, 草場敬, 島武男, 瀧山律子 「阿蘇北外輪における黒ぼく土土壌断面の特徴と分類—非アロフェン質の黒ぼく表層の分布中心およびアロフェン質との分布境界の土壌断面—」『ペドロジスト』 61(1), 3-15 (2017).
- [17] 山崎陽, 荒川真紀子, 松添直隆 「阿蘇地域における水田の地下水かん養機能の評価」『農業生産技術管理学会誌』 28(3), 73-82 (2022).

## はじめに

阿蘇地域の草原の特徴として、その大部分を半自然草地が占め、放牧や採草、火入れによって維持されている<sup>1</sup>。そして、これらの人為的攪乱を受けながら維持された半自然草地において阿蘇地域の豊かな生物相が生まれ、半自然草地の維持は生物多様性保全の視点からも注目される<sup>2</sup>。熊本県においては半自然草地を利用した地域品種、褐毛和種（以下、あか牛）の放牧による子牛生産が行われている。あか牛の放牧は、畜産振興だけでなく阿蘇地域の文化的景観の一部としても重要視され<sup>3</sup>、放牧を含めた人と自然が共生して育んだ文化的景観はかけがえのないものとなる。

一方で、あか牛の冬季飼料の確保や放牧期間の延長を目的<sup>4, 5, 6</sup>として半自然草地の草地造成<sup>7</sup>や、未利用草地の人工林への転換が進められ<sup>8</sup>、さらには地域社会の情勢の転換によってこれまでに阿蘇地域の半自然草地は減少の一途をたどっている<sup>9</sup>。

他方で、半自然草地と人工草地が混在した草地（以下、混在型草地）における、あか牛の採食時間に着目すると、人工草地のみに依存するのではなく、経日的に半自然草地の利用時間が長くなり、日内においては時間帯で人工草地と半自然草地を食べ分けて<sup>10</sup>おり、あか牛にとっても半自然草地が不可欠なハビタットであることが示唆される。その一因について、牧草の質であったり、草高や葉部量であったり、供給草量によって両草地での採食時間が変わる<sup>11</sup>ことが示されている。したがって、あか牛の生態を考慮すると、人工草地拡大の推進ではなく半自然草地の利用可能性が高いことに着目し、その維持を重視するべきである。それにより、阿蘇地域の生物多様性だけでなく、あか牛放牧の文化的景観の維持にもつながると考えられた。しかし、その生態において、半自然草地の高い利用可能性がいかに推移していくか、直接観察に依存した従来の手法では複数日に亘る情報を得ることが難しく詳細は明らかになっていない。

近年では、GPSにより家畜の利用場所の選好性を検証し管理技術の向上をはかる数多くの研究があり<sup>12</sup>、国内においても数多くの実証試験が行われ<sup>13</sup>、ヒト用活動量計を応用した採食判定技術も確立され<sup>14,15</sup>、さらには、ドローン画像や正規化植生指数（NDVI）を用いた草

地での植被度<sup>16</sup>、摂食草量<sup>17</sup>、それらに加えて栄養価などの様々な推定が試みられている<sup>18</sup>。これらの知見から、混在型草地においてGPSとヒト用活動量計を装着した放牧牛の数日間の採食利用場所を把握し、ドローン画像からの植生の量あるいは質を評価できれば、放牧牛のハビタット選択と植生との関係を評価できる。これにより、あか牛のハビタットとしての半自然草地の価値を人工草地と比較して明らかにすることができる。さらには、Raspberry Pi Picoなど低コストなシングルボードコンピュータ（Single-Board Computers; SBC）の生物学分野での汎用性の高さが認められており<sup>19</sup>、これまでは比較的高価なGPSや活動量計のロガーを自作することで、より一般的な技術としての普及が期待できる。

## 第1章 本研究の目的

阿蘇地域における半自然草地の減少は、生物多様性の保全の他に文化的背景やその価値から、少なくとも現状を維持しなければならない。そして、阿蘇の草原でのあか牛放牧は文化的景観だけでなく、あか牛の生態を考慮すると半自然草地が彼らにとってのハビタットとしても重要な要素を担うと考えられる。しかし、あか牛にとっての半自然草地の高い利用可能性の詳細が明らかになっていない。さらに、近年発達してきたドローン画像解析やSBCを用いたロガーによって、あか牛の生態と半自然草地との関係について詳細の解明が期待できる。そこで、本研究では、阿蘇地域の半自然草地の混在型草地におけるあか牛の採食場所の選択からハビタットとしての半自然草地の重要性を評価した。また、ドローン画像による混在型草地における植生構造の変化だけでなく、今後の栄養評価のためにもNDVIが草地のどの化学成分を反映するもしくは、反映しにくいのかを成分別に検証して技術確立と、Raspberry Pi Picoによる行動記録用のデータロガーの開発を試みた。

## 第2章 方法

### 第1節 混在型草地におけるあか牛の採食場所選択の評価

#### 調査地および供試動物

本研究の調査地として、東海大学農学部阿蘇フィールド（熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽）内の混在型草地を利用した（図1）。本フィールド内には約17haの草地が存在し、半自然草地と人工草地が混在する混在型草地があり、この混在型草地は令和元年（2019）から令和3年（2021）に約4.1ha、令和4年（2022）以降は約4.9haに拡大した（図1）。人工草地はトールフェスク（*Festuca arundinacea* Schreb）やオーチャードグラス（*Dactylis*

glomerata L.) が主体であり、半自然草地はシバ (*Zoysia japonica* Steud.) やネザサ (*Pleiblastus chino* (Franch. et Savat) Makino var. *viridis* (Makino) S. Suzuk) が優占し<sup>11</sup>、人工草地は主要な種以外の出現種数が少ないが、半自然草地は優占種以外の出現種数が多い<sup>20</sup>。

供試動物は、本フィールドにおいて令和元年 (2019) から令和 4 年 (2022) までに放牧されていた約 14 頭の褐毛和種の繁殖雌牛のうち 4 頭 (個体 A から D) のうち、令和元年から年ごとに 3 頭を組み合わせデータ取得した個体を用いた。これらの供試動物は代々親子放牧されており、4 月から 5 月に混在型草地で、6 月から 8 月には半自然草地を中心に、一時的に混在型草地でも放牧を行った。その後、9 月から翌年の 4 月まで混在型草地で自家生産した牧草のサイレージを給与しながら放飼した。

#### 口ガー装着および調査期間

供試動物の位置情報の取得には GPS ロガー (i-gotUGT600, Mobile Action technology, Inc., New Taipei) を、採食判定にヒト用活動量計 (生活習慣記録機ライフレコーダー GS4 秒版, 株式会社スズケン, 愛知) を用いた。GPS ロガー、活動量計を一般的なカメラポーチに入れ、ゴム伸縮性ベルトを縫い付けて自作の首輪とし、供試動物に装着した。

首輪は、ポーチがウシの首真下にくるようにした (図 2)。この時、ベルトと首の隙間に指 2 本入る程度を目安にベルトを締めて補強のために結束バンドをバックル部分に通した。

調査期間は表 1 に示した通りで、混在型草地においてロガーによるデータが 3 日以上、かつ複数頭で取得できた期間とした。



図 1. 東海大学農学部阿蘇フィールド放牧地内の混在型草地。黄色および黄色破線が混在型草地の牧区境界および半自然草地の区域を示し、実線が令和元年から 3 年までの区画を、破線が令和 4 年以降に追加された区画を示す。赤線は人工草地の区画を示す。なお、衛星画像は東海大学情報技術センターにより取得されたものを引用している。



図 2. 首輪をウシに装着した様子

表 1. 本研究における調査期間と供試動物

令和元年 (2019) (個体 A, B, C)	令和 2 年 (2020) (個体 A, B, C)	令和 3 年 (2021) (個体 B, C, D)	令和 4 年 (2022) (個体 B, C, D)
7 月 26 日～7 月 29 日 (4 日間)	7 月 21 日～7 月 23 日 (3 日間)	6 月 13 日～6 月 14 日 (2 日間)	5 月 26 日～5 月 28 日 (3 日間)
9 月 10 日～9 月 13 日 (4 日間)	9 月 21 日～9 月 22 日 (2 日間)	9 月 13 日～9 月 15 日 (3 日間)	6 月 4 日～6 月 6 日 (3 日間)
10 月 31 日～11 月 3 日 (4 日間)	10 月 30 日～11 月 2 日 (4 日間)		10 月 14 日～10 月 16 日 (3 日間)

年の下に示した括弧内の数字が供試個体の個体番号を示す。

## 採食場所選択性の解析

GPS ロガーで取得した 1 分毎の座標については、統計解析ソフト R (version4.5.0, R Core Team, 2021) の rgeos、sp パッケージを用いて全て UTM 座標に変換した。さらに、活動量計の運動データについては、渡辺ほか 14 にならって、各個体の直接観察から得た 1 分毎の採食、反芻、佇立、横臥、歩行などといった行動をリファレンスとして、同時間帯に活動量計で得た運動量から決定木解析 (JMP, version11.2, Institute Inc, Cary) により、採食とその他を行動に判定する閾値を決定した。そして、各個体の採食バウトを二曲点の折れ線回帰 (segmented パッケージ) により決定し、いずれか 1 個体の採食バウト開始から、すべての個体が採食バウトを終了するまでを一つの採食イベントとした。

本研究で供試した牛群の採食開始が薄明時であることから、1 日を日の出前から翌日の日の出前までと定義し、採食イベント時の UTM 座標を QGIS (ver.3.22, QGIS Development Team) 上にプロットし、1 日毎の人工草地および半自然草地の利用回数をカウントした。そして、各植生面積 (半自然草地 令和元年から令和 3 年に約 2.5、令和 4 年以降に約 3.3 ha、人工草地 約 1.6 ha) に対する個体ごとの 1 日毎の採食時の植生選択性を、JMP による  $\chi^2$  検定から検証した。

## 第 2 節 ドローン画像による植生解析手法の確立

### 調査地および使用機器

第 1 節と同様に東海大学阿蘇フィールド (熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽) 内の混在型草地 (図 1) を調査地として、マルチスペクトルカメラを搭載したドローン (MAVIC 3M, DJI JAPAN 株式会社, 東京) を用いて、混在型草地全体の RGB 画像および NDVI 画像を取得し、草本類の栄養価と NDVI 値との関係性を評価した。

## 混在型草地全体の画像取得

DJI Pilot2 (MAVIC 3M, DJI JAPAN 株式会社, 東京) において事前に撮影エリアをプロジェクト (飛行高度 50 m、移動速度 4.4 m/秒) として設定したうえで、直下視の RGB 画像と NDVI 画像を連続的に撮影した。11 月 17 日、11 月 22 日および 12 月 15 日に撮影した。当初は 11 月 17 日と 22 日の間に本混在型草地に牛群を放牧して、採食場所と NDVI 画像の差分から採食エリアの推定を行う予定であったが、当該期間に牧区移動せざるを得なくなり、11 月 17 日を起点として、その後に撮影した NDVI 画像から差分 NDVI を比較して植生の推移について確認した。

## 草本類の栄養価と NDVI との関係

混在型草地の草本類の化学成分とドローン画像から算出した NDVI との関係を検討するために、草本試料の乾物率、粗脂肪、灰分および中性デタージェント繊維 (NDF) を測定した。

乾物率 (すなわち採集時の水分含有率) は、草本の生理的状态や新鮮度を反映する指標であり、NDVI が葉のクロロフィル量や内部構造、水分状態の影響を受けることから、両者の関連性が期待される項目として選定した。粗脂肪もまた、草本の生育段階や葉量と関係する成分であり、NDVI が示す群落の緑量や生育状態との関連性を検討する目的で測定した。一方、灰分は草本中の無機成分の割合を示す指標であり、植生の反射特性との直接的な関係は弱いと考えられる。NDF は草本の細胞壁成分を示す指標で、成熟度や消化性と密接に関係するが、NDVI のような広帯域の反射率指標では直接的な推定が困難であると考えられる。これらの成分を測定することで、NDVI を用いた草地評価の適用可能性と限界を検証した。

さらに、草本類の栄養価評価において重要な指標である粗タンパク質についても、NDVI との関連性を検討するため測定項目に含めた。衛星画像由来の NDVI と実地測定した粗タンパク質との間に有意な相関が報告されており、NDVI を用いた牧草栄養価評価の実用性が示されている<sup>21</sup>。なお、本研究では分析機器の不具合により粗タンパク質の測定が一時的に遅れているが、機器復旧後に分析を進めている。

これらの分析用サンプルとして、令和 7 年 (2025 年) 9 月 22 日、11 月 17 日、および 11 月 22 日に、半自然草地あるいは人工草地の植物を採集した。採集の際には塩ビ管 (φ 13 mm) で作成した 1 m × 1 m のコドラートを複数設置し、各サンプリング地点においては、コドラート設置後にドローンを高度 15 m、30 m および 45 m でホバリングさせて直下視での RGB 画像および NDVI 画像を撮影した。その後、9 月に 1 m<sup>2</sup>、以降は 0.25 m<sup>2</sup> の植物を

刈り取った。刈り取った植物は、60℃で48時間乾燥させて乾物率を測定後に、粉碎サンプルを作成した。

#### NDVI 画像の生成および NDVI の取得

ドローン画像の地理情報付きの画像ファイル生成については、DJI Terra Pro (DJI JAPAN 株式会社, 東京) を用いた。撮影した画像ファイルをプロジェクト毎、あるいは植物のサンプリング地点毎に DJI Terra Pro に読み込んだうえで、可視光や NDVI 画像を GeoTiff 形式で生成した。このときの NDVI はドローンに搭載されたマルチスペクトルセンサーで取得した赤色域および近赤外域の反射率を用い、DJI Terra Pro により標準的な手法に基づいて算出された。

生成した画像を QGIS に読み込み、RGB 画像と NDVI 画像を配置した。調査地全体の NDVI 画像による植生の状態を確認するために、カラーランプを RdYlGn (赤-黄-緑) として、最小値を 0、最大値を 0.8 とした。これによりマイナスの値を示す道路などの人工物は赤く、植生が疎である場所は黄色く、植生が豊かな場所は濃い緑で示されるように設定した。また、11月17日の NDVI 画像を基にラスタ演算機能により11月22日および12月15日の各 NDVI 画像から差分の NDVI 画像を生成した。差分 NDVI 画像においては、カラーランプを RdBu (赤-白-青) として、最小値を -0.5、最大値を 0.5 とし、これにより植生が減少あるいは衰退している場合は赤く、植生が増加あるいは発達している場合は青く表示されるように設定した。

植物サンプリング地点のコドラート内の NDVI 値を抽出するために、各コドラート設置地点の RGB 画像においてコドラート範囲内のポリゴンを指定して、対応する NDVI 画像レイヤーからコドラート内の NDVI (画素値) を抽出した。そして、以降の解析では平均 NDVI を説明変数として用いた。化学成分との関連については、一次解析で Spearman の順位相関 ( $\rho$ ) を用い、単調関係の有無を評価した。そして、二次解析で Pearson 相関 ( $r$ ) と単回帰により、線形効果量(傾き)を推定した。これにより、Spearman が有意で Pearson が非有意のときは「影響点は少ないものの直線としては弱い」、Pearson が有意で Spearman が非有意のときは「直線傾向はあるものの影響点の可能性を含む」と判断した。

### 第3節 行動記録用のデータロガーの開発

データロガーの開発にあたり、Raspberry Pi Pico (Raspberry Pi Foundation, Cambridge) をベースとし、RTC (リアルタイムクロック) モジュール (DS3231, Analog Devices)、加

速度センサー (MPU6050)、GPS モジュール (Pico-GPS-L76K, Waveshare Electronics)、そして MicroSD カードリーダーモジュール (AE-microSD-LLCNV) を準備した。各モジュールを Raspberry Pi Pico の GPIO ピン (汎用入出力ピン)、GND ピン (電流の帰着点) そして電源供給ピンに配線した。ソフトウェアは Thonny を使い、MicroPython (MicroPython Software Foundation, Delaware) により年月日・時刻の取得、加速度センサーおよび GPS の読取り、ならびにモバイルバッテリーによる駆動が可能なデモ機を構築した。当初は 1 台の Raspberry Pi Pico にすべてのモジュールを集約する構成を想定していたが、配線の取り回しが複雑化し、エラー発生時の原因究明が煩雑となった。このため、加速度記録系と GPS 記録系を物理的に分離し、Pico 2 台による構成へと変更した。

### 第 3 章 結果および考察

#### 第 1 節 混在型草地におけるあか牛の採食場所選択の評価

令和元年から令和 4 年の 6 月から 11 月にかけての混在型草地における半自然草地および人工草地に対する、各供試個体の 1 日あたりの採食時利用頻度と選択性を表 2 に示した。

令和元年は、7 月および 9 月に半自然草地の利用頻度自体は高い日が多い一方で、面積選択性は人工草地優位の日が多かった。11 月には、個体 A で放牧 2 および 3 日目に半自然草地への高い選択性が現れたのち、4 日目以降は人工草地選好へ移行した。他の 2 個体については、選択性が認められる場合は人工草地への高い選択性が示された。

令和 2 年は、7 月に個体 A が一貫して半自然草地を選好し、個体 C でも 2 および 4 日目に半自然草地選好が見られた。9 月は全個体で 2 日目に人工草地選好が強まり、11 月は個体 A を中心に半自然草地選好の日が優勢となった。

令和 3 年は、6 月に顕著な選択性が乏しく、9 月は個体 D が一貫して人工草地を選好、個体 B・C も複数日で人工草地選好を示した。

表 2. 混在型草地における個体ごとの半自然草地と人工草地の採食時の利用頻度と選択性

年	月	放牧 日数	個体A		個体B		個体C		個体D	
			半自然草地	人工草地	半自然草地	人工草地	半自然草地	人工草地	半自然草地	人工草地
令和元年	7	2	230	341 ***	91	502 ***	203	377 ***	-	-
		3	287	327 ***	253	425 ***	348	271	-	-
		4	368	192	371	243	475	281	-	-
		5	261	208			293	182	-	-
	9	2	218	194 **	182	164 **	213	197 **	-	-
		3	258	137	190	149	241	149	-	-
		4	220	160	133	230 ***	201	252 ***	-	-
	11	5	284	297 ***	187	219 ***	399	260	-	-
		2	456 ***	183	267	313	268	283	-	-
		3	511 ***	168	271	177	-	-	-	-
4		183	208 ***	155	211	-	-	-	-	
	5	204	181 *	162	183	-	-	-	-	
令和2年	7	2	316 ***	54	353	245	292 ***	63	-	-
		3	401 ***	127	240	416 ***			-	-
		4	391 ***	71	384 ***	115	420 ***	59	-	-
	9	2	79	227 ***	138	242 ***	135	298 ***	-	-
		3					167	265 ***	-	-
	11	2	492 ***	106	361	244	374	347 **	-	-
		3	358 ***	55	410 ***	113	298	161	-	-
		4	367 ***	74	329 ***	101	297 *	137	-	-
		5	459 ***	100	409 ***	59	474 **	205	-	-
	令和3年	6	2	-	-	526	357	470	448 **	-
3			-	-	327	230	381	246	-	-
9		2	-	-	222	212 **	194	263 ***	159	277 ***
		3	-	-	361	272 *	-	-	187	223 ***
		4	-	-	190	173	-	-	171	186 ***
令和4年	5	2	-	-	210	146	290	205	-	-
		3	-	-	338	252	341	292 **	-	-
		4	-	-	271	152	314	288 *	-	-
	6	2	-	-	289	281 **	311	353 ***	217	222 ***
		3	-	-	249	192	273	332 ***	210	149
		4	-	-	406	250	421	227	-	-
	10	2	-	-	361 ***	80	310 ***	81	283 **	91
		3	-	-	415 ***	32	440 ***	45	460 ***	20
	4	-	-	417 ***	64	320 ***	54	290 ***	64	

\*\*\*はP<0.001, \*\*はP<0.01, \*は $\leq 0.05$ の水準でもう一方の草地に比べて選択性が認められたことを示す。

令和4年5月から6月にかけては、人工草地への選択性が優勢で、特に6月の2日目は顕著であった。10月になると、全個体が2から4日目を通じて一貫して半自然草地を選択した。

このように、季節により半自然草地と人工草地の選択性についての向きが入れ替わることが明らかとなった。概して初夏～夏季は人工草地が選択されやすく、秋季（特に10月）に

は半自然草地の選好が明瞭になる。特に、令和4年10月には全個体で半自然草地選好が連続日で確認され、令和2年11月と令和元年11月の一部日でも半自然草地選好が現れた。

これらは、供給草量や草質の季節推移が選択に影響するという岡本<sup>10</sup>の指摘と整合的である。放牧解禁直後の初夏は両草地とも提供量が十分で、栄養価の高い人工草地が相対的に選ばれやすい一方、秋季には半自然草地が集中的に選ばれる局面が生じており、人工草地に繁茂するチカラシバ (*Pennisetum alopecuroides*) を避けて、半自然草地のネザサを採食していた可能性があり、必ずしも半自然草地が利用されないのではなく、条件が整うと選択的に利用されることを示している。さらに、草地間の選好性がみられない日でも、少なくとも1日の採食の1/3以上の時間を半自然草地で過ごすことが確認でき(表2)、半自然草地は通年で継続的に利用されていることが裏付けられた。

これらのことから、混在型草地においては半自然草地があか牛の採食場所として常に利用される環境であり、そのうえで、ハビタットとして高い価値をもつ時期が明確に存在すると結論づけられる。年間を通じて常に半自然草地が最優位というわけではないが、秋季には個体横断的に選好性が収斂することから、混在型草地のなかで半自然草地は季節に依存した不可欠な機能を担うと考えられた。

## 第2節 ドローン画像による植生解析

### 混在型草地全体の各種画像および差分の NDVI 画像による植生の推移

東海大学農学部阿蘇フィールドの混在型草地で得られた RGB 画像を図3に示した。11月17日撮影(図3a)と11月22日撮影(図3b)の間では、視覚的に顕著な差異は認められなかった。一方、12月15日撮影(図3c)では、草地全体で黄化が進み、地上部の枯死が進行した様子が明瞭となった。RGB 画像から半自然草地の境界は概ね把握できるものの、植生状態の変化や12月のように著しく黄化した時期には、視覚的手がかりだけで境界を安定的に認識するのは難しかった。

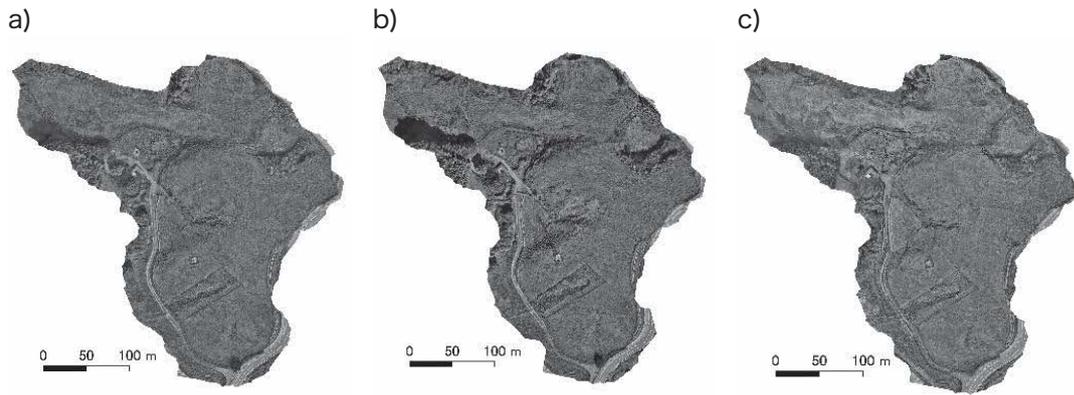


図3 ドローンにより撮影した混在型草地の可視光 (RGB) 画像。a) が11月17日、b) が11月22日、c) が12月15日に撮影したものを示す。

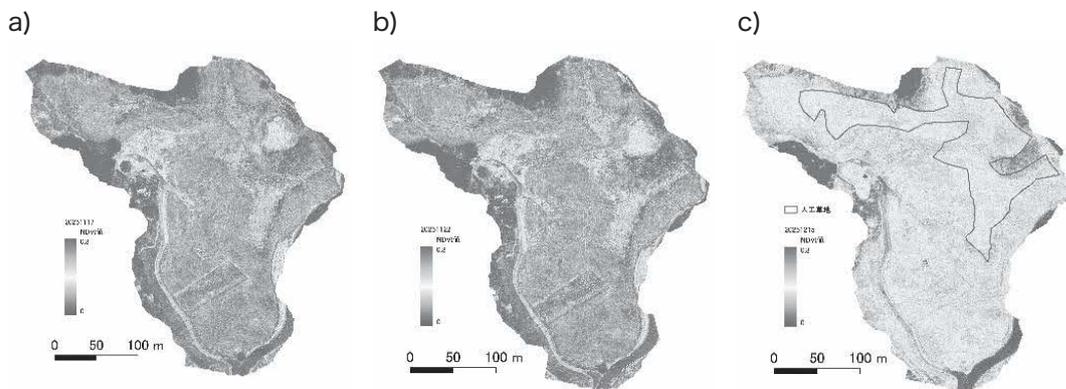


図4. ドローンにより撮影した混在型草地の NDVI 画像。a) が11月17日、b) が11月22日、c) が12月15日に撮影したものを示し、赤線は人工草地のエリアを示す。

そこで、同日に取得した NDVI 画像 (図4) を参照した。11月17日 (図4a) および11月22日 (図4b) は、植生が豊かな領域を示す高 NDVI (緑色) から、疎な植生を示す中 NDVI (黄系) まだがモザイク状に分布していた。12月15日 (図4c) では、植生の衰退を示す低 NDVI (赤系) が散在し、とくに人工草地の区画内で低 NDVI の集中が目立った。さらに、これらの撮影日を通じて、人工草地の方が中から低 NDVI (黄～赤系) が広がり、半自然草地には高 NDVI (緑系) が相対的に多く分布した。これには、人工草地で繁茂したチカラシバが十分に採食されないまま枯死し、冬期に向けて NDVI が低下した一方、半自然草地ではネザサの地上部が当該時期も枯死し切らず、相対的に NDVI が高く評価されたことが影響している可能性が高い。特に12月には人工草地で NDVI 低下が顕在化し、半自然草地が相対的に高 NDVI を維持した点は、前節で示した行動選好 (秋期に半自然草地が集中的に利用される局面) を指示できる。

11月17日を基に、11月22日と12月15日それぞれの差分のNDVI画像を図5に示した。11月22日までの差分NDVI画像においては、各日に撮影したRGBおよびNDVI画像のみでは検出できなかった植生の

衰退が赤色で表示され、特に人工草地内に赤が分布していた(図5 a)。12月15日までの差分NDVI画像においては、さらに全体的に赤色が強く示され混在型草地全体で植生が衰退し、特に人工草地において著しく衰退していることが示された(図5 b)。一方、牧区周辺の道路な

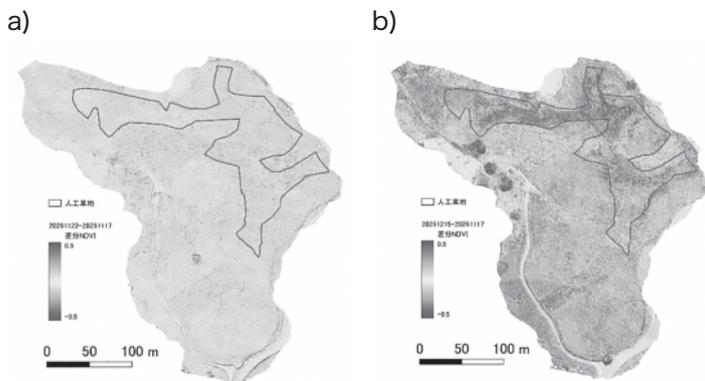


図5. ドローンにより撮影したNDVI差分画像。a)が11月17日を基準とした11月22日のNDVI差分画像、b)が11月17日を基準とした12月15日のNDVI差分画像を示し、赤線は人工草地のエリアを示す。

ど人工物の近辺や谷部、鉄塔の周辺では増加域(青色)が散見された。この現象については、撮影時の影によって生じている可能性が考えられる。日向と日陰では、日陰の方がNDVI値は高くなることから、例えば初日に日陰だった場所が2回目に日向になった場合は、差分のNDVI値が高くなり、過大評価された青色になる。道路やその周辺の切通部分など、混在型草地の区画外は排除が容易なもの、混在型草地の谷部分や草地内に設置された鉄塔部分にも青色が見られた。このことから、人工物だけでなく地形によっても測定誤差が生じる可能性に留意しなければならない。

### 草本類の栄養価とNDVI値との関係

本調査では、各コドラートの平均NDVIとコドラート内で採集した化学成分との関係を半自然草地と人工草地にわけることなく全データで評価した(表3)。

表3. 乾物率を含む化学成分とNDVIの関連

化学成分	n	Spearman		Pearson		傾き	傾きの信頼区間		R <sup>2</sup>
		$\rho$	p値	r	p値		95%下限	95%上限	
乾物率(%)	22	-0.3710	0.0892	-0.5579	0.0070	-54.7468	-92.7301	-16.7634	0.3113
粗脂肪(%)	17	0.5539	0.0210	0.4420	0.0757	1.5161	-0.1774	3.2096	0.1953
灰分(%)	22	-0.2027	0.3656	-0.2802	0.2066	-5.9262	-15.3959	3.5435	0.0785
NDF(%DM)	19	-0.2140	0.3789	-0.1749	0.4739	-5.6233	-21.8211	10.5745	0.0306

注1: 一次解析はSpearman(単調関係の有無)、二次解析はPearsonおよび最小二乗単回帰(線形効果量)とした。

注2: 推定値は相関係数 $r$ ( $\rho$ )、回帰傾きと95%CI、R<sup>2</sup>、n、p値を示す。NDVIは各コドラート内の平均値。

乾物率 (%) は NDVI と有意な負 (傾き  $-54.75$ ; 95%CI  $-92.73 \sim -16.76$ ) の直線的な関係を示し (Pearson  $r = -0.558$ ,  $p=0.007$ ,  $n=22$ ) 決定係数 ( $R^2$ ) から中程度の説明力を有する一方で、一部に大きく外れる値があった (Spearman  $\rho = -0.371$ ,  $p=0.089$ )。このことから、NDVI が高い区画ほど相対的に水分を多く含む (すなわち乾物率が低い) 群落状態であることが直線モデルから支持できる。

粗脂肪 (%) については、NDVI の増加に伴う単調な上昇 (傾き  $+1.516$ ; 95%CI  $-0.177 \sim +3.210$ ) が確認された (Spearman  $\rho = 0.5539$ ,  $p=0.021$ ) 一方、Pearson が  $r=0.442$ ,  $p=0.076$  で、決定係数 ( $R^2$ ) も低く線形モデルの説明力は限定的であった。また、回帰傾きの 95% 信頼区間が 0 をまたぐため強い効果が認められたとは言い難い。つまり、粗脂肪は、回帰直線の端部での緩やか曲線関係や少数の影響点が存在している可能性がある。今後の追加試験により、この正の関係についてサンプルの増強によって効果量の信頼性を高めることが次の課題となる。

灰分 (%), NDF(%DM) については、いずれの検定でも有意な効果は認められず、回帰傾きの 95% 信頼区間も 0 をまたいだ。今回のサンプル範囲では、NDVI とこれらの成分の間に明確な相関がみられなかった。これらの化学成分は、季節、植生組成など複数の要因の影響を受けやすい点や、NDVI からの推定は困難であることが示唆された。なお、粗タンパク質は、分析機器の故障により現在分析中の状態であるが、これまでも NDVI との高い関連性が示されていることから、その追加測定とサンプル数の拡充により、ここで得られた傾向の検証と推定精度の向上を図りたい。

### 第3節 行動記録用のデータロガーの開発

活動量計ロガーは、Raspberry Pi Pico に RTC モジュール、加速度センサー、MicroSD リーダーモジュールを図 6 のとおり接続して試作した。Thonny を介して MicroPython のコードを実行し、加速度と日時を記録するよう設定したところ、以下のように 1 秒間隔でのタイムスタンプと加速度からなるデータを取得し (表 4)、CSV ファイル形式で保存することができた。

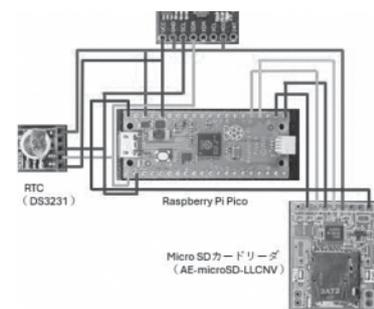


図 6 活動量ロガーの各モジュールと Pico の配線図

このことから、少なくとも試作段階において加速度センサーからの継続的な記録が実現可能であることが示された。今後は、この記録系を 1 分ごとの定常記録として運用できるよう

に設定を標準化していき、落下・断線・一時的な電源低下などが生じてログの連続性が担保されるよう調整していく。さらに、実装段階で各軸の閾値を定義し、ノイズを

踏まえた判定ルールを設ける必要がある。加速度ログを参照しながら、採食とその他の行動（佇立・歩行・反芻等の状態）における振幅や周波数帯の違いを手掛かりに、軸別の閾値と判定ルールを試験的に決定する必要がある。

次に GPS ロガーは、GPS モジュール、MicroSD リーダーモジュールを図 7 のとおり接続して構成した。GPS 測位可能条件下での試験であったため、RTC モジュールは接続していなかったものの、1 分ごとの緯度経度と UTM 座標を取得することができ、CSV ファイル形式への書き出しも行われた(表5)。今後は、GPS が測位できない状況においても、正しく時刻を記録可能なように RTC モジュールを追加で接続していく必要がある。

表 4. 加速度データの取得一例

datetime_jst	lat	lon	utm_zone	hemisphere	easting_m	northing_m
2026/1/16 15:33	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:34	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:35	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:36	32.835376	130.86982	52 N		675008.5	3634585.8
2026/1/16 15:37	32.835376	130.86982	52 N		675008.5	3634585.8



図 7 GPS ロガーの各モジュールの配線図  
Pico-GPS-L76K の裏側に Pico を接続している。

これらの結果から、各モジュールと Raspberry Pi Pico を用いた活動量および GPS のロガーについて、試作品が完成し、想定どおり動作することを確認した。

今後は、モバイルバッテリーで 1～2 週間の連続運用を見据えて記録間隔の最適化を進めるととも

表 5. GPS データの取得一例

datetime_jst	lat	lon	utm_zone	hemisphere	easting_m	northing_m
2026/1/16 15:33	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:34	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:35	32.83538	130.86982	52 N		675008.5	3634586
2026/1/16 15:36	32.835376	130.86982	52 N		675008.5	3634585.8
2026/1/16 15:37	32.835376	130.86982	52 N		675008.5	3634585.8

に、基板実装による配線の簡素化と安定性の向上、ならびに首輪装着を想定した 3D プリント製筐体の作製を行う。加速度系については前述の閾値設定と判定ロジックの実装を優先し、1 分ごとの定常記録と合わせて運用要件を満たすかをフィールドで検証する。現在の段階では、デモ機で個別の記録が可能であることを示すにとどまるが、上記の工程を順次進めることで、安価で実用的な行動記録用ロガーとしての運用に移行できる見通しが得られた。

おわりに

本研究により、混在型草地におけるあか牛の採食場所の選択においては、半自然草地があか牛が多く時間を過ごす重要な空間であるとともに、秋季など季節によりその価値が高まる時期があることが明らかになった。また、ドローン（UAV）画像によるNDVIの取得・解析から、植生の現存量や活性の空間分布を把握できた。さらに、NDVIと化学成分の関連性については、NDVIが高い区画ほど相対的に水分を多く含むといった強い関連を示す項目と、関連の弱い項目を明確にすることができた。行動記録用データロガー開発の第一ステップをクリアしたことで、今後はより多くの個体を対象とした採食場所選択の検証が可能になる見込みである。

これらの成果を基に、あか牛の生態に基づいた半自然草地のハビタットとしての重要性を明らかにすることで、阿蘇地域における生物多様性の保全だけでなく、文化的景観としてのあか牛の放牧の持続に資する半自然草地の価値を示していくことができるだろう。

本研究の遂行にあたり、多大なるご支援を賜りました熊本県阿蘇草原再生・世界遺産推進課に対し、深く感謝の意を表します。また、終始丁寧なご指導をいただき、本研究に関わる分析等にあたって有益な助言を賜りました東海大学農学部動物科学科 岡本智伸教授、服部育男教授、および檉村 敦准教授、あか牛の放牧管理等で協力をいただいた東海大学農学教育実習センター牧場部門 久保和弘氏をはじめとする職員の皆様に厚く御礼申し上げます。最後に、日々活発な議論を交わし、実験の実施にあたって多大なる協力をいただいた東海大学農学部動物科学科動物生理生態学研究室の皆様にご心より感謝いたします。

#### 引用・参考文献

- 1 山本 嘉人・進藤 和政・萩野 耕司・平野 清・中西 雄二・大滝 典雄.「阿蘇地域の半自然草地における火入れ中止にともなう植生の変化」『日本草地学会誌』48 巻 (2002) 416-420.
- 2 大窪 久美子.「日本の半自然草地における生物多様性研究の現状(<特集>草地学と保全2.草原生物多様性の保全の現場)」『日本草地学会誌』48 巻 (2002) 268-276.
- 3 熊本県阿蘇市.「阿蘇の文化的景観 阿蘇北外輪山及び中央火口丘群の草原景観保存活用計画」(2022) pp. 150.
- 4 丸岡 詮.「II 草地造成利用の技術的諸問題」『農業経営研究』11 巻 (1973) 25-41.
- 5 大滝典雄.「阿蘇地域における草地管理利用の現況と問題点」『日本草地学会九州支部会報』7 巻 (1977) 13-18.

- 6 大滝典雄・浜崎和雄.「熊本県における草地・飼料作に関する試験研究の流れ II. 農試阿蘇分場・畜試阿蘇支場・畜試における草地試験研究」『日本草地学会九州支部会報』14 巻 (1984) 13-18.
- 7 大滝典雄.『一の宮町史 自然と文化 阿蘇選書 10 草原の人々と営み』(城野印刷所、1997) 249pp.
- 8 国安俊夫.「草地景観の管理 阿蘇の草原景観の管理の事例を通して」『ランドスケープ研究』62 巻 (1998) 112-114.
- 9 阿蘇草原再生協議会.「阿蘇草原再生全体構想<第3期> 阿蘇の草原を未来へ」(2021) pp. 73.
- 10 岡本智伸.「阿蘇地方における野草と寒地型牧草の放牧利用について」『日本草地学会九州支部会報』23 巻 (1993) 26-31.
- 11 岡本智伸・梶田聖孝・菊地正武.「阿蘇地方における野草地と牧草地を両有する放牧草地の生産性: 2. 両草地間における放牧家畜の採食行動」『日本草地学会誌』40 巻 (1994) 53-60.
- 12 Rivero, M.J., P. Grau-Campanario, S. Mullan, S. D. E. Held, J. E. Stokes, M. R. Lee, and L. M. Cardenas.「Factors Affecting Site Use Preference of Grazing Cattle Studied from 2000 to 2020 through GPS Tracking: A Review」『Sensors』21 巻 (2020) 2696.
- 13 渡辺也恭.「放牧牛の研究・管理に向けての GPS の利用の展開」『日本草地学会誌』70 巻 (2024) 141-146.
- 14 渡辺也恭・坂上清一・川村健介・吉利怜奈.「加速度計測に基づく活動量計を用いた放牧牛の採食行動の識別 (<特集> 草地生態系のオーバーユースとアンダーユース)」『日本草地学会誌』59 巻 (2013) 226-230.
- 15 渡辺也恭・吉利怜奈・林 志炫・坂上清一.「教師なし学習による活動量データを用いた放牧牛の採食行動分類」『日本草地学会誌』66 巻 (2020) 152-157.
- 16 川村健介・林 志炫・吉利怜奈.「放牧地におけるドローンの活用: 植被と植生指数の季節変化」『日本草地学会誌』64 巻 (2018) 125-129.
- 17 橋本直之.「リモートセンシングによる摂食牧草量推定に向けたシバ型放牧草地における植生指数の比較に関する報告」『農業農村工学会論文集』90 巻 (2022) IV\_17-IV\_20.
- 18 Santos, W. M. d., L. D. C. d. S. Martins, A. C. Bezerra, L. S. B. d. Souza, A. M. d. R. F. Jardim, M. V. d. Silva, C. A. A. d. Souza, and T. G. F. d. Silva.「Use of Unmanned Aerial Vehicles for

- Monitoring Pastures and Forages in Agricultural Sciences: A Systematic Review」『Drones』  
8 卷 (2024) 585.
- 19 Jolles, J. W. 「Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for  
biologists.」 『Methods in Ecology and Evolution』 12 卷 (2021) 1562–1579.
- 20 岡本智伸・椛田聖孝. 「本学草地における出現植物種」 『九州東海大学農学部紀要』 21 卷  
(2002) 25-36.
- 21 Serrano, J., S. Shahidian, L. Paixão, J. Marques da Silva, and L. L. Paniágua. 「Pasture  
Quality Assessment through NDVI Obtained by Remote Sensing: A Validation Study in the  
Mediterranean Silvo-Pastoral Ecosystem.」 『Agriculture』 14 卷 (2024) 1350.
- 22 Aboutaleb, M., A. F. Torres-Rua, W. P. Kustas, H. Nieto, C. Coopmans, M. McKee.  
「Assessment of different methods for shadow detection in high-resolution optical imagery  
and evaluation of shadow impact on calculation of NDVI, and evapotranspiration.」 『Irrig  
Sci』 37 卷 (2019) 407-429.

## 阿蘇草原の OUV を支える住民主体型の草原管理の継続方策に関する考察

～世界遺産登録後を見据えて～

竹内 亮

### はじめに

本研究は、阿蘇の顕著な普遍的価値（OUV）を支える自然資源管理システムの学術的価値を、世界文化遺産の文脈で明確化し、将来にわたりその価値を継承するための方策を検討することを目的とする。阿蘇世界文化遺産登録推進協議会（2024）は、阿蘇の OUV を「活火山を含む阿蘇カルデラという地形条件のもとで、1000 年以上にわたり人々が地形を活用し高い生産性をあげてきた、人と自然の共生を示す文化的景観」と整理している。また、阿蘇カルデラの農業を特徴づける草地利用について、「野焼き—放牧—採草という一連の管理が長期にわたり維持され、他地域では近代化により消失した伝統的農業システムが、阿蘇では大規模かつ明確な視覚性を伴って残存している点」が強調されている。すなわち、阿蘇の草原は景観のみならず、地域と草原の関係性も評価の対象である。

こうした草原管理の中核を担ってきたのが牧野組合である。牧野組合の多くは入会慣行を基盤として草原の管理と利用を行ってきた。先行研究では、草資源需要の低下に伴う衰退過程<sup>(2),(3)</sup>（関司 2004、松木 2011）や、牧野組合の活動維持<sup>(4)</sup>（白石ほか 2024）、管理を支える地域的な仕組み<sup>(5)</sup>（竹内ほか 2025）などが議論されている。一方で、牧野組合による草原管理システムが長期にわたり持続してきた「強み」や制度設計上の意義は、十分に整理されていない。高橋（2012）では、阿蘇の草原を含む半自然草原の議論において、「利用の権利」に対して「管理の義務」についての配慮が不足していることが指摘されている<sup>(6)</sup>。しかし、管理およびその義務を分析するには、両者の構造を理解する必要がある。本報告では第 2 章で、牧野の管理の基盤となる入会権を踏まえて、国際的な資源管理理論であるコモンズ論の観点から牧野組合の制度的特徴を整理し、OUV の普遍性を補強する。

草原保全の議論では、管理作業の継続、ならびに採草・放牧等の資源利用の促進が主に論点となってきた。しかし、管理主体である牧野組合の状況、とりわけ土地所有形態や入会権者の減少は、草原管理の基盤にもかかわらず分析が限定的である。これは世界文化遺産としての OUV の基盤に関わる重要点である。本報告の第 3 章では現地調査に基づき、草原の所有と管理に着目して制度的課題を整理する。さらに、牧野組合の基盤となる入会権者が急速

に減少していることを踏まえ、第4章では第2章・第3章の知見をもとに、世界文化遺産登録後の草原管理の持続に必要な施策について提言する。

## 第1章 研究手法

本研究では、聞き取り調査、参与観察、資料分析を組み合わせて分析を行った。

聞き取り調査では、複数の牧野組合を対象に、聞き取り調査によって牧野の管理および利用の実態を把握した。対象牧野は、予備調査を通じて、所有形態や入会慣行に起因する課題が顕在化している牧野組合を選定した。本報告では、個別牧野が特定されないよう符丁を用い、分析に必要な範囲で特徴を記述している。なお、聞き取り調査および事例整理にあたっては、入会権・入会実態に知見を有する愛媛大学法学部・西脇秀一郎准教授、牧野組合の財政分析に知見を有する広島修道大学人間環境学部・白石智宙准教授の助言・協力を得た。また、本研究期間以前に執筆者が実施した聞き取り結果についても、必要に応じて参照している。

参与観察として、牧野組合による管理作業および公益財団法人阿蘇グリーンストックによるボランティア活動（輪地切り・輪地焼き）に参加し、作業手順や調整体制を観察した。あわせて、近年注目されている茅材採取および緑肥採取についても観察を行った。

資料分析では、執筆者が保有する牧野組合関連資料および阿蘇草原再生協議会が提供する牧野境界等の資料を用いた。本研究は政策実務者および関係者による利用を想定しているため、学術性を損なわない範囲で匿名性に配慮している。

## 第2章 阿蘇における地域主体の草原管理の理論的整理

本章では、牧野組合の制度的基盤となる入会権の概説をしたうえで、入会権を基盤とした牧野の所有・管理と利用の構造について整理する。牧野組合について、松木（1983）は「旧来の地元集落農家の総有としての採草放牧入会権が、戦前・戦後を通じて近代化される過程で形成され、主として山林・原野・造成草地を農民グループによって採草放牧利用する集団的土地経営体」と定義している<sup>(7)</sup>。入会権は、民法第263条に「共有の性質を有する入会権」、第294条に「共有の性質を有しない入会権」として規定されているが、その具体的な権利内容は、各地域における慣習、すなわち入会慣習に基づくものとされている。以下では、川島（1983）および中尾（2009）を参照しつつ、入会権に基づく入会慣習および入会慣行の基本的性質を整理した上で、阿蘇地域の牧野組合について考察を行う。

入会権の重要な性質として、入会権者は個人ではなく世帯（もしくはその代表者）であり、

原則として世帯単位で相続される点が挙げられる。一方で、入会権は譲渡や売買の対象とはならない。入会慣習に基づく資源管理において特に重要なのが、転出失権（離村失権）の原則である。入会権者であることは、入会集団の構成員であることによって認められるため、集落から転出した場合にはその地位を失い、入会権も消滅するという考え方である<sup>(8),(9)</sup>。また、転出していなくとも、集落の共同費用を負担しない、あるいは必要な出役に繰り返し参加しないなど、管理・維持に関する義務を果たさない場合には、権利を喪失する事例もみられる<sup>(9)</sup>（中尾 2009）。この点は、入会権が単に土地を利用するための権利ではなく、入会地を管理・維持する構成員としての地位に付随して認められる権利であることを示している。すなわち、入会権は「管理責任と不可分の関係にある権利」である。また、入会権は慣習が実証されれば、第三者の登記に対抗可能である。

地域に新たに移住した住民が、必ずしも自動的に入会権者となるわけではない。総会等での議論を経て入会権者としての加入が認められる可能性は否定されないものの、聞き取り調査の範囲では、そのような事例は確認されなかった。熊本県が実施した牧野基礎調査によれば、2021年度時点で把握されている161牧野組合のうち、2016年から2021年にかけて入会権者数が増加したのは4牧野にとどまっている<sup>(10)</sup>（熊本県 2022）。もっとも、これらの牧野についても、分家による増加なのか、従来把握されていなかった入会権者の存在が新たに確認されたものなのかなど、その実態については慎重な検討が必要である。なお、近年の入会林野を対象とした大規模調査では、転出失権の原則が必ずしも一律に適用されていない実態も指摘されている<sup>(11)</sup>（高村ほか 2023）。

さらに、入会権の主体はあくまで集落という共同体である。そのため、土地の大規模な改変や売却など、入会権者の土地利用に重大な影響を及ぼす事項については、入会権者の多数決ではなく、全権利者の同意を必要とする「全会一致の原則」が採用される例が多い。ただし、これらの運用についても、あくまで地域ごとの慣行に依拠するものであり、その具体的なあり方は地域や時代によって多様である。

阿蘇の草原においては、各牧野と紐づく集落が存在し、その地域における入会権を基盤として牧野組合が形成されてきた。近世から明治維新以降にかけての牧野の所有形態の変遷については、阿蘇市を中心とした事例をもとに大滝（1998）が詳しく整理している。入会林野と同様に、草地の大規模開発を中心とする経済利用の高度化が進展する中で、現在みられる多様な牧野組合の形態が形成されてきた<sup>(12)</sup>。牧野の所有形態は、大きく公有（市町村有）、共有（記名共有地）、私有、総有（入会地）に分類することができる。これに対し、牧野の

管理形態は、入会権者による管理が基盤となっており、公有地の場合には地役入会権に基づく入会慣行、総有地の場合には入会権に基づく管理が行われてきた。現在の阿蘇地域においては、牧野の所有形態と入会権の関係、また牧野組合と入会権の関係は地域ごとに相違がみられる。

阿蘇市を事例とすると、旧一の宮町では町有牧野として公有地において地役入会権に基づく入会慣行が行われていたのに対し、旧阿蘇町では共有地において入会慣行が維持されてきたことが指摘されている<sup>(12)</sup> (大滝 1998)。その後、市町村合併を経て阿蘇市となった後には、旧阿蘇町に属する牧野組合が牧野の土地を市に寄付し、慣行的な入会利用を継続している事例もある<sup>(3)</sup> (松木 2011)。このほかにも、入会権を解消して共有地として管理する事例、土地を個人に分配する事例、農事組合法人による管理へ移行する事例など、多様な展開が確認されている。こうした戦後の牧野組合の変遷については、阿蘇地域においても一定の研究蓄積が存在する<sup>(12),(13)</sup> (大滝 1998、青嶋 1983 など)。

牧野の管理において中核となる作業は、草資源の更新を目的として毎年春に実施される野焼きと、前年秋に行われる防火帯の整備であり、いずれも多くの労働力を必要とする。現在では、野焼きおよび防火帯整備における牧野組合と地区の入会権者との関係は一様ではなく、多様な形態がみられることが指摘されている<sup>(14)</sup> (高橋 2013)。牧野基礎調査においても、牧野ごとに輪地切りおよび野焼きの実施主体について、地区住民、入会権者、牧野組合、有畜農家の間で個別の取り決めが存在していることが確認されている<sup>(10)</sup> (熊本県 2022)。牧野の利用形態についても多様性がみられ、入会権者が自ら放牧や採草を行う場合のほか、牧野組合が入会集団(集落)に利用料を支払い放牧を行うケース、外部の酪農家や農家に貸し出すケースなどが存在する。さらに、牧野の利用には、貸付や採草といった直接的な経済利用にとどまらず、集落の後背地としての防災機能なども含まれている。阿蘇の牧野における現在の所有・管理・利用の主体を表1に整理した。

本研究において特に注目すべき点は、牧野組合が従来、入会権者の中でも主として有畜農家によって構成されてきたのに対し、近年では牧野組合員の中に無畜農家が増加し、無畜農家や非農家のみで構成される牧野組合が増えている点である。2021年時点では、牧野組合のうち32組合に有畜農家がない。この変化は、牧野組合の成り立ちや組織としての性質を踏まえると本質的な転換であり、管理の義務と利用の権利を一体的に有していた組織が消失・変質していることを示す。また、聞き取り調査および資料調査からは、準組合員として非入会権者が牧野組合の一員となっている事例も確認された。ただし、準組合員は、組合運

営に関する意思決定への参画や利益の分配において正規の組合員とは異なる扱いとなっている場合が多い。

文献調査および現地調査の結果を踏まえ、入会権が存在し、牧野組合や地区住民が牧野管理作業に関与する場合の牧野管理および牧野利用の構造を図1に整理した。この図に示すように、牧野組合と入会権者が完全に重なる場合や、入会権者と地区住民が完全に重なる場合など、その重なり方の違いによって、牧野の管理や所有のあり方は大きく左右される。ただし、図1に示した構造は代表的な類型であり、すべての牧野が必ずしもこの構造に当てはまるわけではない点には留意が必要である。

牧野の所有	牧野管理の主体	牧野の利用者
公有地 / (記名) 共有地 / 総有 (入会地) / 私所有地 (個人・組合・法人等) / 所有者不明	地区住民 / 入会権者 / 牧野組合 / 有畜農家 / 土地所有者	地区住民 / 入会権者 / 牧野組合 / 有畜農家 / 土地所有者

地域共同体など特定のコミュニティによって共同で管理される自然資源は、コモンズ (commons) として国際的に研究されてきた。入会に基づく阿蘇の牧野組合による草原管理も、その代表的な一例である。コモンズ管理に関する理論的整理としては、ノーベル経済学賞受賞者である E. オストロムが、世界各地の成功事例をもとに示した設計原理が (表2) 広く知られている<sup>(15)</sup> (Ostrom 1990)。これらの原則については、日本の入会林野を対象とした実証研究や<sup>(16)</sup> (McKean 1992)、農耕景観を特徴とする世界遺産を対象とした分析においても、その有効性が確認されている。以下では、牧野組合による阿蘇の草原管理および利用について、オストロムの8原理との対応関係を検討する。

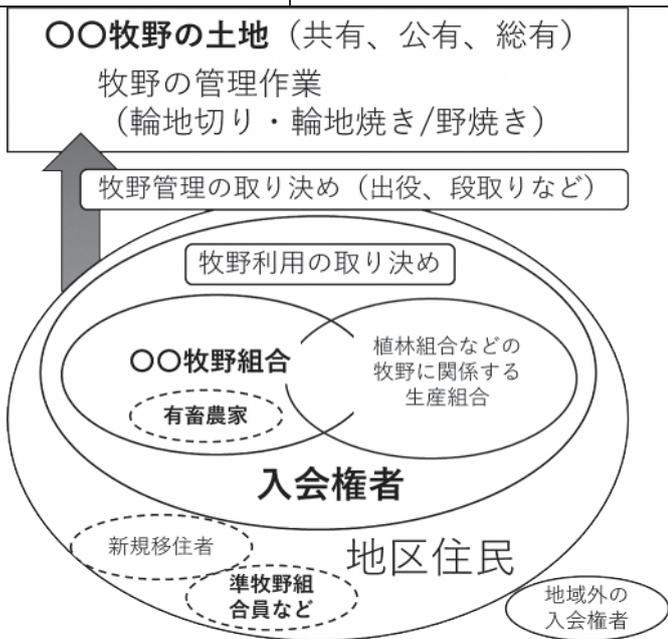


図1 阿蘇地域の牧野、牧野組合、入会権者、地区住民の関係の整理

まず、入会権に基づく管理のため、牧野組合の構成員は限定されており、管理対象となる

牧野の範囲も明確であることから、DP1（明確な境界設定）を満たしている。また、外輪山地域に特徴的な垂直的土地利用や<sup>(17)</sup>（帆足 2017）、野焼き・防火帯作成といった管理手法は、草原植生の生育サイクルを踏まえたものであり、DP2（地域条件との適合）にも合致している。牧野の管理および利用に関する意思決定は、入会権者および牧野組合員による総会を通じて行われており、慣行に基づきつつも、各構成員が草原利用の規模にかかわらず意思決定に参加できる仕組みが存在する。この点で DP3（意思決定への参加）を満たしている。DP4（監視）については、複数の入会権者が同時に牧野を利用することによる相互監視が機能しており、さらに大規模放牧を行う牧野では、牛の管理を目的とした外部監視員が結果として違反行為の監視も担っている。DP5（段階的制裁）について、重大な制裁事例は確認されなかったものの、多くの牧野組合では野焼きや輪地切りへの不参加に対して賦銭による代替措置が設けられている。また、違反行為が繰り返された場合には、総会で定められた罰則を課すことが可能である。DP6（紛争解決）についても、調査の範囲では牧野内での顕著な紛争は確認されなかったが、これは入会権に基づく利用の特徴として、世代を超えた信頼関係が形成されてきたことによるものと考えられる。

DP7（組織化の権利の承認）については、入会権が法律上認められた権利であることから、公序良俗に反しない限り、牧野組合による独自のルール策定が可能である。最後に DP8（多層的ガバナンス）については、個々の牧野組合によって形成される阿蘇の草原全体が、大規模な資源システムを構成している点が挙げられる。野焼きについては自治体間での調整が行われ、例えば阿蘇市では野焼き対策会議を通じて牧野間の調整が実施されている。また、草地利用についても、阿蘇くじゅう国立公園指定地域として自然公園法等に基づく環境省の関与が行われている。

以上は一般的な牧野組合に関する整理であるが、本研究で聞き取り調査を行った A 牧野、B 牧野、C 牧野についても、各原則を概ね適用することが可能である。このように、牧野組合による阿蘇の草原管理は、コモンズ論の観点から見て、共有資源管理の成功事例として位置づけることができる。さらに、オストロムの 8 原理が、中国雲南省ハニ棚田など他の文化的景観においても確認されていること<sup>(18)</sup>（Luo and He 2023）を踏まえると、阿蘇の草原管理が有する価値は、OUV に含まれる「普遍性（universal）」を明確に裏付けるものといえる。

表 2. オストロムの設計原理と牧野組合による牧野管理制度の対応

原理 (DP)	概要	阿蘇の牧野組合のケース
DP1. 明確な境界	資源の範囲と、それを利用可能なメンバーシップ（権利者）が明確である。	牧野境界は明確であり、各牧野と対応する集落の入会権者、牧野組合が利用者である。
DP2. 地域的な条件と調和したルール	資源利用ルール（採取量、タイミング、方法など）が地域の環境・社会条件に合っている。	地形に応じた垂直的な資源利用および植物の生育サイクルに合わせた防火帯作成、野焼き等の管理作業と採草、放牧などの利用。
DP3. 集団的選択への参画	資源管理のルールの影響を受ける人が、ルールの修正に参加できること。	年に一度の通常総会および急な議事がある場合は臨時総会によって意思決定される。全ての入会権者、もしくは牧野組合員が参加、発言可能。些事については組合長や役員に一任される。
DP4. 監視	監視役は、資源の状況や利用者の行動を積極的に監視し、説明責任を負うか、自身もまた利用者であること。	集落と牧野が地理的に連続している場合は、相互監視が機能。また、放牧を実施する牧野においても相互監視や、牧番などの監視が機能。
DP5. 段階的な制裁	違反者に対して段階的な制裁（軽い警告から重い罰まで）が見込まれること。	管理作業への不参加は賦課が課される。また、違反行為が続く場合は、公序良俗に反しない範囲で、該当者を排除することが可能。
DP6. 紛争解決メカニズム	資源の利用者や役員は、地域の話し合いの場に容易にアクセスでき、利用者間、利用者と役員間のトラブルを解決できること。	新規住民の参入がなく、紛争が起きにくい構造だが、総会や役員による仲裁が機能。
DP7. 組織化における最低限の権利の承認	利用者が独自にルールを作り運営する権利が、政府や外部の権威によって承認・尊重されている。	入会権者の権利は民法で保障されており、公序良俗に反することのない範囲で入会集団の慣習が尊重されている。
DP8. 入れ子状の組織	大規模な資源システムでは、複数のレベルで組織が階層的に構築されている。	環境環境省や自治体が、法律および条例に基づき草原全体の管理および利用の調整が図られている。

Ostrom(1990) の訳書、原田ほか（2022）を参考に一部平易な表現を用いて作成

一方でオストロムの 8 原理はコミュニティにとって自然資源が希少かつ利用が競合する事例をもとに構成される。つまり、共有される自然資源が過剰な利用を防ぐことを目的としている。そのため、過少利用下の半自然草原の管理については、オストロムの 8 原則を満たすことが必ずしも持続の条件とはならないことが指摘されている<sup>(19)</sup> (Miyanaga and Shimada 2018)。Shimada(2014) は、日本の事例から資源の過少利用下にあるコモンズが「利用のための管理」から「管理のための管理」となり、最終的に「管理の放棄」に至るプロセスを指摘している<sup>(20)</sup>。実際、阿蘇地域においても「利用度の低下」と「管理出役の弱体化」という二つの要因により入会牧野の縮小が進展してきた<sup>(1),(2)</sup> (図司 2004、松木 2011)。熊本県の調査では牧野を必要とする有畜農家の減少により、阿蘇地域の牧野組合数は、1998 年の 175 から、2021 年には 156 に減少している (熊本県 2022) これは、長期にわたり機能してきた牧野組合による優れた資源管理制度が機能しにくい状況を示す。

### 第3章 現地調査に基づく牧野組合による草原管理の制度的課題

第3章では、第2章で整理した牧野の制度的構造を前提として、牧野組合による牧野管理が直面している制度的課題を整理する。採草や放牧といった牧野の経済利用、ならびに野焼きや防火帯整備などの管理作業が困難化している点については、これまでも課題として指摘されてきた<sup>(21),(5)</sup>（高橋 2017、竹内ほか 2025）。本研究では、これらの課題を単なる労働力不足や担い手問題として捉えるのではなく、牧野の所有構造に着目することで、今後の牧野組合による牧野管理の課題を分析する。

なぜなら、牧野の管理作業や利用は、土地の所有者が明確であり、かつ意思決定が可能であることを前提として成立するからである。第2章で述べたように、阿蘇地域における多くの牧野組合は、入会権を基盤として運営されており、この権利構造が牧野管理のあり方を規定してきた。

牧野組合員および入会権者の減少に対して、阿蘇地域では阿蘇グリーンストックによる「野焼き・輪地切り支援ボランティア活動（以下、野焼き支援ボランティア）」が牧野管理において重要な役割を果たしている<sup>(22)</sup>（竹内・井上 2024）。同活動は1999年に開始され、組織化された継続的な支援により、2024年度には66の牧野組合に対して延べ2,331名のボランティアが派遣されている。本研究で実施した輪地切りおよび輪地焼きの参与観察においても、同活動は事前研修を受けたボランティアによって実施されており、作業は比較的円滑かつ安全に行われていた。特に輪地切りについては、適切な指示体制があれば、一定程度牧野組合の役割を代替することが可能であることが確認された。一方で、野焼き支援ボランティアは、輪地焼きおよび野焼きの際に火引き作業を担わない。これは安全面への配慮に加え、延焼時の責任の所在といった問題に起因するものである。

火引き作業を安全かつ円滑に実施するためには、牧野固有の地形条件の把握に加え、当日の天候や風向きの変化への即応的な判断が求められる。そのため、同一の牧野において継続的に経験を積むことが不可欠であり、外部人材による代替が難しい高度な作業である。こうした阿蘇地域における火引き人材の不足に対応する取り組みとして、環境省による「野焼き専門家集団育成モデル構築事業」の試行が挙げられる。同事業は、南阿蘇村で2024年から実施されている「南阿蘇村野焼きプロ人材」の取組を参考とし、地域住民に代わって火引き作業を担うことが可能な人材を育成するためのモデル事業である。2024年度には、複数の牧野において牧野組合員とともに実証的な検証が行われている。

このように現在の阿蘇の草原では、阿蘇草原再生協議会を中心に管理の継続や利用につい

での議論が行われ、制度化されている（竹内ほか 2025）。

以下では、聞き取り調査の結果をもとに、既存のボランティア活動や火引き人材育成といった支援によって牧野管理が一定程度維持されてきたこと。一方で、入会権および土地所有をめぐる問題に直面している牧野組合の実態について整理する。

#### (1) A 牧野の事例

北外輪に位置する A 牧野は、公有地において入会権者が地役入会権に基づき管理してきた牧野である。入会権者は集落の世帯と一致しており、集落と牧野組合が不可分の関係にあった。かつては採草や小規模な放牧が行われていたが、平成初期に有畜世帯が消滅し、近年は牧野の経済的利用はほとんど行われていない。管理費用は主として中山間地域等直接支払いや多面的機能交付金によって賄われてきた。

入会権者の減少と高齢化が進む中、管理作業は野焼き支援ボランティアに大きく依存するようになったが、近年では火引き役の確保が困難となっている。組合長を含む数名が辛うじて火引きを担ってきたものの、組合長の高齢化と後継不在により、管理作業の継続が現実的に困難となりつつある。集落内に管理作業へ継続的に参加可能な入会権者は既に存在せず、数年内に入会権を解消し牧野管理を停止することが検討されている。本事例は、入会権を基盤とした牧野管理が、担い手の消滅によって限界に達する過程を示している。

#### (2) B 牧野の事例

南外輪に位置する B 牧野は、対応する集落住民による記名共有地であるが、実態としては入会慣行に基づき利用・管理されてきた牧野である。入会権者のうち有畜農家によって構成される牧野組合が管理主体となり、野焼き支援ボランティアと集落住民の出役によって草原管理が維持されてきた。牧野が保全されることで、地域外の畜産農家による放牧利用も受け入れられていた。

しかし、数年前の野焼きにおいて延焼事故が発生した。入念な防火帯整備にもかかわらず飛び火が隣接林地に及び、集落および牧野組合は、被害者との交渉や警察・消防対応といった社会的責任を引き受けることとなった。金銭的負担は一定程度軽減されたものの、集落として野焼きに伴う責任を今後も担うことは困難であるとの判断に至り、翌年度以降の野焼き実施が不可能となった。

この事態を受け、入会権を解消した上で自治体に土地を寄付し、認可地縁団体として牧野管理を継続する方策が検討されたが、村外に転出した共有者との調整や自治体側の受入困難

を理由に実現しなかった。本事例は、事故リスクと責任の集中が、管理主体そのものを失わせる過程を示している。

### (3) C牧野の事例

北外輪に位置するC牧野は、牧野利用の近代化が進む中で、入会地が早期に分割され個人私有地となった地域に位置している。分割後もしばらくは集落の有畜農家による牧野組合が存在していたが、有畜農家の減少により組合は機能停止に至った。その後、牧野周辺に居住していた所有者の高齢化により利用が行われなくなった土地を、地域外に居住する一戸の畜産農家が農地バンクを通じて借り受け、放牧を開始した。

現在は、この畜産農家一名のみで構成される牧野組合が管理主体となり、野焼き支援ボランティアや外部の火引き人材の支援を受けながら牧野管理が継続されている。当該農家は他地域の牧野管理経験を有しているが、地形の違いから当初は経験者と共同で野焼きを実施し、管理手法を習得してきた。一方で、賃借地であることによる設備投資の制約や、牧野の細分化による規模拡張の困難さ、延焼対策のための土地取得が進まないといった課題を抱えている。本事例は、私有化のもとでも管理が維持される一方で、担い手の集中と土地所有の分散が新たな脆弱性を生み出していることを示している。

A、B、Cの各牧野は、入会権の存否および牧野の所有形態の違いに起因して、それぞれ異なる牧野管理上の課題を抱えている。重要な点として、草原維持に関わる入会権および土地所有に基づく課題は、野焼き支援ボランティアや火引き人材の育成といった、現行の労働力を代替する支援策のみでは対応できないという点が挙げられる。なぜなら、入会集団を基盤として構成される牧野組合は、そうした外部支援を受け入れるための調整・意思決定の主体であり、支援の前提条件となる「受け皿」として機能しているからである。この調整には、作業日程の決定や行政への連絡、作業内容の調整、保険への加入といった事務的対応に加え、事故発生時の対応など、管理作業に伴う社会的責任の引き受けが含まれる。こうした受け皿が失われた場合、外部からの管理支援を導入すること自体が困難となる。さらに、各牧野組合は、多面的機能交付金や中山間地域等直接支払といった、国費が一部投入される牧野管理の財源の受け皿としての役割も担っている。牧野組合の機能低下や解体は、これらの制度的資源へのアクセスを困難にする点でも重大な影響を及ぼす。加えて、一つの牧野における管理停止は、他の牧野における管理負担の増加を引き起こす。牧野は連続的に隣接して存在するため、ある牧野の管理が停止した場合、隣接牧野における延焼リスクの上昇や、輪地切り

作業の負担増加が生じる。このため、小規模な牧野であっても、北外輪などの連続した牧野群においては、その活動停止が草原全体に大きな影響を及ぼす。

図2は、阿蘇地域において、地区住民ではなく入会権者のみによって管理されている牧野を対象に、2003年から2021年までに観測された入会権者数の変化が今後も同様に推移した場合を仮定し、2040年代における80歳未満の入会権者数を単純推計したものである。この推計によれば、13牧野において入会権者が0名となり、30牧野では5名以下となる。

人口減少や地域外への転出の進行を考慮すると、実際にはより速いペースで入会権者の減少が進む可能性が高い。A,B,C牧野の事例は特殊な例ではなく、阿蘇地域の牧野管理が直面する課題を先取りした事例として位置づけられる。こうした牧野の所有構造に紐づく管理上の課題を踏まえ、第4章では今後の対応策について検討を行う。

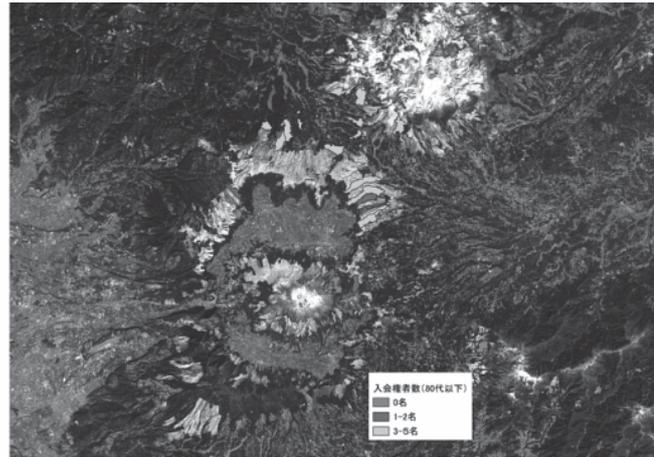


図2. 入会権者のみで野焼きがされている牧野における2040年の80歳未満の入会権者数の予測（H15牧野基礎調査、H23およびR3牧野基礎調査から作成。H15からR3の入会権者の減少率を想定。）

#### 第4章 世界文化遺産への登録後を見据えた新たな草原管理制度に向けた提言

入会権を基盤とした阿蘇の草原管理の課題を検討するにあたり、先行して入会慣習の衰退が進展した入会林野の動向は重要な参照対象となる。入会林野では、過少利用や管理出役の弱体化に直面する中で、入会林野近代化法や入会林野整備事業を通じた入会権の解消、組織形態の転換が進められてきた。高村ほか（2023）は、離村失権の存続と新規加入の可否という二軸から入会林野の変化を整理し、管理を継続する事例では認可地縁団体を中心とする「領域団体型」への移行が主流であることを示している。一方、特定目的に特化した社団型への転換は限定的である<sup>(11)</sup>。阿蘇地域においても一部の牧野では同様の転換がみられるが、多くの牧野は依然として旧戸のみの私的集団型にとどまっており、この点は阿蘇草原管理のユニークな点でもあるが、構造的な脆弱性でもある。以下では現在の牧野の所有、管理構造に着目し、管理継続のためのシナリオを提示する。

#### (1) 公有地かつ小規模な入会集団によって管理される牧野の場合

公有地であり、小規模な入会集団によって管理されてきた牧野では、牧野組合員が入会権者に内包され、両者が一致している例もみられる。こうした牧野において、入会集団の高齢化や人員減少により管理の継続が困難となった場合、入会権を主体的に解消するという選択肢が現実的に検討され得る。高村ほか（2023）は、地役入会権について、入会集団の合意に基づく消滅は、入会権者の減少や高齢化を理由とする限り、不当性を見出しにくいと整理している<sup>(11)</sup>。入会権が解消された場合、牧野の管理主体は土地所有者である自治体に移行する。しかし、自治体が直接管理主体となる場合、管理作業の継続は容易ではない。市町村職員のみで複数牧野の輪地切りや野焼きを同時期に実施することは現実的でなく、特に火引きのような高度な経験を要する作業を、職員のローテーションを前提とする行政組織が継続的に担うことは困難である。野焼き支援ボランティアの活用も一つの選択肢であるが、他事業者との競合や、無償労働への恒常的依存、OUVとの整合性といった制度的課題が残る。加えて、公共事業として適正な工賃を支払う場合、財政負担も無視できない。

これらを踏まえると、入会権解消後の管理の受け皿として、元牧野組合員・元入会権者を中心とする権利能力なき社団を設立し、自治体が文化財保全事業として管理を委託する方式が考えられる。旧牧野組合員が可能な範囲で作業を担い、不足分をボランティアで補完する体制とすることで、経験の継承と実務の継続が両立しうる。火引き等については、指導的役割への謝金支給など、適切なインセンティブ設計が不可欠である。また、入会権の解消に消極的な入会権者が存在する点を踏まえれば、入会権存続下でも新組織を設立し、段階的に管理主体を移行することも可能である。ただし、権利能力なき社団の継続性や運営能力には課題があるため、既存団体の支援や、複数牧野を含む広域的な組織化が求められる。公有地の場合には、指定地域共同活動団体制度の活用により、行政財産の貸付や管理委託を受けることも有効な選択肢となる。

#### (2) 記名共有地・総有（入会地）で牧野組合が管理する場合

記名共有地または総有（入会地）として管理され、牧野組合が管理主体となっている牧野では、まず権利関係の整理が必要となる。登記上は共有地であっても、各共有者が持分を自由に処分できない場合など、実態としては入会地と評価される可能性があり、入会林野をめぐる判例・実務でも同様の事例が確認されている<sup>(9),(11)</sup>（中尾 2009；高村ほか 2023）。阿蘇地域の牧野についても、明示的な入会権解消の記録がない場合、入会慣習に基づき管理され

てきた共有地が相当数存在すると推測される。この類型における最大の課題は、登記上の共有者による権利主張によって管理・利用が停滞する、いわゆるアンチ・コモンス化を防ぐことである。相続や離村の進行に伴い問題が顕在化しやすいため、行政による権利関係整理や合意形成への手続的支援が重要となる。理論的には、土地を行政に寄付し入会慣行のみを継続する選択肢も考えられるが、現状では実現可能性は低い。

そこで、土地の登記主体となり得る認可地縁団体を設立し、当該団体名義で土地を管理、または、権利の分散・喪失を防ぐ方策が考えられる。認可地縁団体は制度的負担が大きく、野焼き等の実務主体としては調整コストが高い。このため、土地の所有・財務管理は認可地縁団体が担い、実際の管理作業は入会集団を基盤とした権利能力なき社団が担う二層構造が、慣行や経験の継承という点で合理的である。その場合、両組織の役割分担を明確にする規約整備が不可欠となる。また、固定資産税等が生じるため、経済的利用が乏しい場合には、茅場利用、放牧受入れ、観光利用、寄付金募集など、牧野の性格を大きく損なわない範囲での資金確保策を検討する必要がある。

### (3) 個人が所有する牧野の場合

個人所有の牧野は、旧波野村地域を中心に多くみられ、入会地の分配によって私有化された結果として位置づけられる。他牧野においても、今後、入会集団の衰退により個人への分配が進む可能性もある。こうした牧野では、所有者自身が放牧や採草を通じて管理を行うことは現実的に困難な場合が多く、単独管理を前提とすることには限界がある。その対応として、C牧野のように、畜産農家に土地を貸し出し、放牧と草地管理を一体的に担ってもらう方式は、畜産経営上の実利と草原維持を両立させる点で有効である。

しかし、畜産業者と個別所有者との直接交渉には、所有者特定の困難さや、利用・原状回復に関する不安といった障壁がある。この点で、農地バンクのような中間的マッチング機能は重要であるが、牧野には原野登記が多く、農地バンク制度を利用できない場合がある。また、同制度では野焼き等の管理作業が契約上明確に位置づけられていないという限界もある。

このため、阿蘇の牧野に特化した「牧野バンク」とも呼び得る制度の構築が考えられる。公益的法人や自治体が牧野を一括して借り受け、草原管理を伴う経済利用を希望する事業者に対して、審査の上で貸し付ける仕組みである。この際、野焼き等の管理作業を担うことを利用条件とすることが重要であり、運営を通じて地形条件や火引き方法といった管理知が蓄積・継承される点に、この制度の大きな意義がある。

以上で示した各類型および対応策は、あくまで選択肢の一案にすぎない。例えば、すべての事例において、阿蘇グリーンストックのような公益財団法人が牧野をトラスト地として取得し、保全・管理を担うという構想も理論的には考えられる。しかし、公有地であれば議会での審議が必要となり、共有地であれば多数の権利者との合意形成が求められるなど、制度的・手続的に複雑なプロセスを伴う。また、土地取得には多額の資金が必要となることから、寄付や募金による資金調達にも相応の時間を要する。このような点から、喫緊の課題である「牧野管理の受け皿の喪失」への即応的対応としては、現実的でない。

本分析の目的は、特定の制度や組織形態を唯一の解として提示することではなく、牧野組合の類型や土地所有形態に応じて、関係者が今後の管理継続のシナリオを主体的に検討することの重要性を示す点にある。より総合的に牧野の継続管理を考える際には、管理主体や管理方法と牧野の経済利用との接続も考慮する必要がある。

加えて、公有地である牧野については、その利用の可否をどのような仕組みで判断するのかという点も重要な課題である。特に留意すべきなのは、土地利用の大きな改変が可能となるリスクである。公有地、共有地、私有地のいずれであっても、牧野組合が入会権に基づいて利用していた段階では不可能であった大規模な土地改変が、入会慣行の解消や管理主体の変更によって可能となる場合がある。当然ながら、阿蘇くじゅう国立公園の区域内であれば自然公園法による規制を受け、農地に該当する場合には農地法の制限が及ぶ。しかし、これらの法的枠組みが適用されない牧野には、制度上の空白が生じ得るため、管理主体の変更と同時に、利用の在り方について十分な検討と合意形成が不可欠である。

阿蘇が世界文化遺産として登録された場合、阿蘇の草原管理は、従来の入会慣習に基づく私的な資源管理にとどまらず、OUVの維持という「公共的な責務」を伴う制度となる。その結果、これまで慣習・慣行とされてきた管理主体や「管理の責任」の曖昧さは、制度的課題として顕在化する可能性が高い。特に、入会権者の減少により管理が困難となった牧野については、「管理を継続しない」という選択そのものが、OUVに与える影響として説明責任を求められる。本研究で整理した各類型に応じた提案は、登録後の牧野管理を見据え、牧野単位の問題を草原全体の制度設計として再構成するための論点の整理である。

終わりに

本研究では、阿蘇の草原のOUV（顕著な普遍的価値）を支える基盤として、牧野組合を中心とした草原管理制度に着目し、牧野の所有と管理の関係について分析を行った。牧野組合

の仕組みに焦点を当てることで、阿蘇の草原の OUV の具体的内容の一つである「地域住民によって長年管理・形成されてきた伝統的な農業システム」の実態が、制度的側面から明確になった。阿蘇の草原管理が有する顕著な価値は、単に景観や生態系にとどまるものではなく、優れたコモンズ管理の制度設計という普遍性を備えた仕組みによって支えられてきた点にある。すなわち、入会権に基づく利用と管理、牧野組合による意思決定、共同作業を通じた資源維持といった制度的枠組みそのものが、有形・無形の文化的価値を併せ持つ対象であり、この管理制度自体もまた文化財として高い普遍的価値を有していると評価できる。ただし、こうした制度は固定的なものではなく、時代ごとの社会条件や地域の状況に応じて有機的に形成・変容してきたものであり、現代の人口動態や経済構造の変化に対応した再編が不可避となっている。

そのため、牧野管理の持続性を検討するにあたっては、牧野の所有形態や利用構造の違いに応じて生じる課題を正確に把握し、それぞれの場面において、どの主体がどのように関与し得るのかを丁寧に検討する必要がある。牧野組合には地域固有の課題が存在する一方で、入会権に起因する課題については、牧野の所有と管理の関係に着目することで、一定程度の構造化や類型化が可能であることを本研究は示した。

本報告で提示した複数の管理シナリオは、分野の異なる専門家や、現場で管理の課題に直面している関係者にとっては、多くの疑問や批判があると考えられる。また、非現実的であるとの評価を受けることも想定される。しかしながら、阿蘇の草原管理を将来にわたって継続するためには、そうした疑問や批判を含めた議論そのものを活性化させることが、現時点で最も重要であると考えられる。その前提として、牧野の歴史や管理慣行、入会慣習といった知識や経験が失われることなく次世代に継承されるよう、資料の収集や関係者への聞き取りを体系的に進める必要がある。これは、阿蘇における人と自然の共生の具体像を記録・可視化する作業であり、コモンズ研究や入会研究の研究者のみならず、行政が主体的に関与して進めるべき課題である。草原の物理的な維持管理と並行して、管理制度の整備を進めることが、阿蘇の草原の OUV を将来にわたって支える重要な条件である。

## 参考文献

1. 阿蘇世界文化遺産登録推進協議会「『阿蘇』の価値（OUV）について」（2024）。
2. 関司直也「入会牧野の縮小・潰廃過程と再編の可能性—阿蘇地域における牧野組合を事例として—」『歴史と経済』182号（2004）21-33頁。

3. 松木洋一「最近の牧野組合の入会的利用の動向と経営再建（1）—『市民パートナーシップ入会権』論の検討—」『畜産の研究』65巻10号（2011）975-978頁.
4. 白石智宙・竹内亮・嶋田大作「有畜農家消失後の牧野組合における草地管理活動の継続要因—阿蘇市下荻の草牧野組合の活動実態と会計の分析に基づいて—」『林業経済研究』70巻1号（2024）15-26頁.
5. 竹内亮・白石智宙・嶋田大作「多数かつ多様なコモンズを含む環境ガバナンスの形成過程—熊本県阿蘇地域の入会牧野を事例に—」『環境経済・政策研究』18巻1号（2025）1-13頁.
6. 高橋佳孝「都市住民との協働による阿蘇草原再生の取り組み」新保輝幸・松本充朗編『変容するコモンズ—フィールドと理論のはざまから—』ナカニシヤ出版（2012）252-261頁.
7. 松木洋一「牧野組合（林業経済基礎知識⑫）」『林業経済基礎知識』36巻9号（1983）32頁.
8. 川島武宣「入会権の基礎理論」『川島武宣著作集 第8巻』岩波書店（1983）.
9. 中尾英俊『入会権—その本質と現代的課題—』勁草書房（2009）.
10. 熊本県「阿蘇草原維持再生基礎調査」（2022）.
11. 高村学人・古積健三郎・山下詩子編『入会林野と所有者不明土地問題—両者の峻別と現代の入会権論—』岩波書店（2023）.
12. 大滝典雄『草原と人々の営み—自然とのバランスを求めて—』一の宮町（1998）.
13. 青嶋敏「阿蘇地方における牧野入会の実態—熊本県阿蘇郡阿蘇町小里部落の事例—」黒木三郎教授還暦記念論文随筆集刊行会編『法とその周辺—黒木三郎教授還暦記念論文随筆集』（1983）114-130頁.
14. 高橋佳孝「多様な主体が協働・連携する阿蘇草原再生の取り組み」『大原社会問題研究所雑誌』655号（2013）3-18頁.
15. Ostrom, E. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press (1990)（原田禎夫・齋藤暖生・嶋田大作訳『コモンズのガバナンス—人びとの協働と制度の進化—』晃洋書房）（2022）.
16. McKean, M. A. *Management of Traditional Common Lands (Iriaichi) in Japan*. In Bromley, D. W. (ed.), *Making the Commons Work: Theory, Practice, and Policy*, ICS Press, San Francisco (1992) pp. 63-98.
17. 帆足俊文（2017）「文化的景観としての阿蘇地域—重要文化的景観選定に向けて—」横川洋・高橋佳孝編『阿蘇地域における農耕景観と生態系サービス—文化的景観論で地域価値を再発見し世界文化遺産登録を支援する—』農林統計出版, 3-16頁.

18. Luo, D. and He, J. Just Commons: Governance of Irrigation Water in World Heritage Rice Terraces, Southwest China. *International Journal of the Commons*, 17(1) (2023) pp. 141–154.
19. Miyanaga, K. and Shimada, D. The Tragedy of the Commons' by Underuse: Toward a Conceptual Framework Based on Ecosystem Services and Satoyama Perspective. *International Journal of the Commons*, 12(1) (2018) pp. 332–351.
20. Shimada, D. The External Impacts of Traditional Commons and Present-Day Changes: A Case Study of Iriai Forest in Yamaguni District, Kyoto, Japan. *International Journal of the Commons*, 8(1) (2014) pp. 207–235.
21. 高橋佳孝「阿蘇草原における生態系サービスの現状と今後の課題」横川洋・高橋佳孝編『阿蘇地域における農耕景観と生態系サービス—文化的景観論で地域価値を再発見し世界文化遺産登録を支援する—』農林統計出版（2017）183–262 頁.
22. 竹内亮・井上智尋「熊本県阿蘇地域の『野焼き・輪地切り支援ボランティア活動』の継続要因の分析—ボランティアと活動資金のマネジメントに注目して—」『環境経済・政策研究』17 卷 1 号（2024）92–97 頁.

## はじめに

阿蘇には全国的にも知られた阿蘇神社が鎮座し、その周辺では古代から現在に至るまで豊かな文化がはぐくまれた。また、史料上、平安時代にはじめて阿蘇大宮司としてその名が登場し、以後、現在に至るまで続く阿蘇家には、豊富な量の家伝の古文書が伝えられた。阿蘇家は豊臣秀吉による九州平定後、16世紀末にいったん正系が途絶え、江戸時代に復興されるといった混乱はあったものの、古文書が失われなかったことから、全国的にも中世史研究が格段に進んでいる地域といつてよい。

このように、阿蘇地方における人文研究資料は、宗教史的にも歴史学的にも豊富であるといえるが、本研究でテーマとする仏神像については、中心的存在である阿蘇神社と西巖殿寺の周辺であっても、調査事例は多くない上に簡易的な報告にとどまり、図像学、様式分析、図像解釈学といった美術史的な視点を取り入れられた研究はほとんどないのが現状である。また、近年高森町をはじめ、新たに自治体史が編纂された地域があり、いずれも必ずといってよいほど、社寺の所在状況が調査され、地域の信仰と絡めて紹介されるが、仏神像について言及したものは少ない。こうした現状は、地域の歴史文化への認識はもちろん、各文化資産の保存策を講じるうえでも、すくなくならず障害となってしまう。

そこで本研究では、限られた中ではあるが、先学の成果をもとにしつつ、地域の仏神像の調査を行い、諸資料との比較検討により美術史的、歴史学的な位置づけを試みて、阿蘇山信仰を起点とした中世歴史文化の様相の一端を明らかにすることを試みる。

## 第1章 阿蘇地方をテーマとした仏神像研究史

阿蘇地方における仏神像について調査を踏まえて報告されたのは、1957年、松本雅明氏による南小国町・満願寺の仏像紹介が早いものであろう（注1）。松本氏は、北条時宗・時定像をはじめとした中世絵画に加えて、本尊毘沙門天像、地藏菩薩像、仁王像について紹介している。同様の内容は後に刊行された『熊本県文化財調査報告書』にもみられる（注2）。同じころ、神道文化会により高千穂・阿蘇地方の歴史、美術、民俗分野の調査が行われ、報告書として刊行されている（注3）。ただし、内容が高千穂地方の神像彫刻や罅口に偏り、阿蘇地方では西巖殿寺や阿蘇神社、満願寺、小国町・浄泉寺の作例がわずかながら触れられる

にとどまる。報告の中核を担った安藤更生氏は、阿蘇家の消長に代表されるように、阿蘇地方は政治経済文化のすべての面で影響を受けやすく、地方としての特徴をもたず、古いものが少ないとまで述べている。

しかし、安藤氏の認識が誤りであることは、阿蘇地方、とりわけ西巖殿寺を取り巻く信仰世界に関する理解を大きく深めるきっかけとなった『古坊中』報告書により明らかである(注4)。本報告書では戦国時代末期の豊臣秀吉による九州平定にともなう落去によって失われた「古坊中」と称される阿蘇山上の坊舎、庵室や、加藤清正入国後に復興された現阿蘇駅周辺のいわゆる「麓坊中」の実体が様々な資料から復元されており、当該事項について知るうえでの基礎資料となっている。報告書の中で、「麓坊中」にあたる地区を中心に、各坊舎、庵室旧蔵の仏神像について、ごく簡易的な内容ながら図版とともに報告されている。

また、熊本県立美術館は、寺院伝来の各種資料について、文化財の散逸や亡失を防ぐことを目的とした調査を行う中で、阿蘇地方においては西巖殿寺、満願寺、南小国町・千光寺を対象とした調査を1981～1982年に実施し、『県内主要寺院歴史資料調査報告書(一)(城北地区)』を刊行(注5)。仏神像のみならず歴史資料の翻刻まで行っており、現在も各寺院の基礎資料となっている。

熊本県立美術館では、2004～2007年度に阿蘇高千穂地域歴史資料調査を行っており、報告書も刊行されている(注6)。阿蘇郡市では12ヶ所の神社で調査を実施し、中世にさかのぼる約40件の作例を含む多くの神像について報告した。その中に平安時代の神像が含まれることから、報告書の中で有木芳隆氏は、11世紀後半の史料で、阿蘇神社に関連した記述のなかに「御正躰」や「御躰」など神像の存在をうかがわせる記述があるが、調査成果から実作例においても神像登場の時期として矛盾が無いと指摘した。

阿蘇地方に関する先行研究では、仏神像の調査事例がいくつか見いだせるものの、その内容はごく簡易的な各作例の概要紹介にとどまり、作例相互の比較検討や、美術史的、歴史的な位置づけは今後の課題となっていた。そこで本研究では、美術史上、あるいは歴史上、重要な位置づけを含むとみられる作例について調査を行い、各作例の詳細情報を確認したうえで、検討していくことを試みた。ここでは、特に大きな成果が得られた西巖殿寺関係の仏像と、満願寺の仏像について以下に取り上げる。

## 第2章 西巖殿寺関係の仏像

ここでは、西巖殿寺や坊中地区の各個人宅に伝来した作例が対象となる。西巖殿寺は奈良

時代、あるいは平安時代に来山した最栄の旧跡に建てられた庵室を嚆矢とするが、阿蘇山信仰と密接にかかわって神仏習合、修験道の聖地として最盛期には山上には60以上の寺坊があったと推定され、近世以降は麓に坊舎、庵室が広がり、阿蘇一山で合計700名を超える僧侶、山伏が行き交った時期があった（注7）。

それだけに安置された仏神像の数も相当な量であったと推定されるが、多くは天正年間の豊臣秀吉による九州平定、あるいは火山活動の活発化に伴う山上からの落去、そして明治の神仏分離に伴う廃寺、還俗により滅失、散逸してしまっている。現在は坊中地区のかつての修験者の子孫宅や、西巖殿寺に残るのが主となっているが、とりわけ重要なのが、西巖殿寺山上本堂に伝来した十一面観音像である（現在は熊本県立美術館寄託）。

像高171.3cm、髪際高150.8cmを測り、頭部に頂上仏面、頭上面10面、化仏立像をあらわし、左手は水瓶を執り、右手は垂下して掌を正面に向けて蓮華座上に立つ。頭体幹部をクスノキの一材から彫り出し、内割を施したうえで背板を当てる構造で、両肩先、両足先、天衣遊離部などは別材となっている。長年、中岳火口近くに安置されていたことから、火山性ガスや火山灰による損傷、その他経年による表面の朽損が著しく、頭上面のすべて、両手先などはほとんど後補のものに変わっている。

それでも、抑揚をおさえた肉身表現や、彫りの浅い衣文表現などには、典型的な平安時代後期様式を認めることができる。一方で、はっきり見開いた目からうかがえる魁夷な容貌は、同時期の仏像彫刻としては珍しい。阿蘇神社の主祭神である健甞龍命は十一面観音が神として顕現したすがた（本地仏）であることが各種の史料に触れられているが、本像はまさしく健甞龍命の本地仏として制作された現存最古の仏像である（注8）。

阿蘇家の伝承が記された「阿蘇宮由来略」によると、天養元年（1144）8月3日、比叡山慈恵大師の弟子最栄が阿蘇にやってきて、阿蘇大宮司の許可を得て、自ら十一面観音を彫刻して安置し、法華経を読誦した。山上本堂はその旧跡であるとされる。最栄の来山は史料によっては奈良時代とすることもあり、いずれも伝承の域を出ない（注9）。しかし、平安時代後期に十一面観音像を安置する動きは阿蘇地方全体で活発になったとみられ、後述のように千光寺の十一面観音像もそのひとつのようである。

なお、本像には前立と位置付けられる像が付属している。かつて熊本県立美術館によって調査された折には、作風や表面の状態から室町時代、あるいは近代になってからの模古作の可能性も指摘されたが（注10）、本研究において坊中地区の個人宅で調査を行ったところ、『古坊中』報告書にも取り上げられた十一面観音像が同様の作風を示し、かつ江戸時代作と目さ

れることが判明したため、以下に概要を紹介したい（注 11）。

本像は像高 54.4cm、髪際高 46.2cmの十一面観音像で、現状他像から転用されたとみられる岩座（注 12）に取り付けられた蓮華二重座の上に立つ。頭上面、天衣遊離部等を含んで全体を豎一材から彫出する点や、面貌等の作風は西巖殿寺の前立像と類似し、同一作者と推定される。

注目されるのは個人宅像蓮華座に記された墨書銘（注 13）で、那羅延房豪弁が願主となって制作されたことが知られる。豪弁の名は、「阿蘇大峰名付記録」のうち、寛文 11 年（1671）時の権律師及び寄宿、延宝 8 年（1680）時の護摩先達、元禄 5 年（1692）時の大越家としてみえる（注 14）。同一人物とすれば、本像の制作は 17 世紀後半と推定される。したがって、同様の特徴をもつ西巖殿寺の前立像もまた、17 世紀後半の作と判断できよう。

個人宅像は『古坊中』報告書においても取り上げられている作例であるが、銘文情報が記録されなかったためか、今日までその重要性が気づかれることはなかった。今後、その他の作例についても再検討が必要な段階にきたといえるだろう。

### 第 3 章 満願寺の創建について

第 2 章で述べたように、阿蘇地方の信仰は阿蘇神社、西巖殿寺を起点として広がっていたことが想像されるが、一方で鎌倉時代には北条氏によりその影響力に楔が打たれたかのようにとらえられることもあった。そこで、以下ではその事例としてしばしば取り上げられる満願寺の創建事情と現存の仏像に注目してみたい（注 15）。

文亀 3 年（1503）に編纂がはじめられた『別當坊歴代並諸記』（満願寺蔵）（注 16）や、寛文 9 年（1669）に北島雪山があらわした『国郡一統志』（注 17）によれば、建長 7 年（1255）、鎌倉幕府 3 代執権北条時氏の子で、4 代執権経時、5 代執権時頼の同母弟にあたる北条時定が阿蘇に下向。その後、文永元年（1264）に前年に没した兄時頼の百ヶ日仏事として、小国郷大山寺別院多聞院において光明真言会を営み、多聞院を前身として文永 11 年（1274）、醍醐寺三宝院経杲を招いて満願寺を創建したとされる。

阿蘇地方に北条氏の影響が及ぶようになったのは源平合戦後のことである。平安時代後期、現在の阿蘇郡市に相当する阿蘇郡は、国司庁宣により全体が阿蘇社領となっていた（注 18）。そして、保延 3 年（1137）以前に村上源氏中院流の雅定を領家とする阿蘇荘となる。平治元年（1159）、阿蘇社が鳥羽院の妻得子（美福門院）により鳥羽院を葬る京都・安楽寿院に建てられた新御塔の末社とされると、ほどなく安楽寿院新塔院の料所として、美福門院

から娘の八条院に伝えられ、王家領八条院領荘園群に属することになった。

この阿蘇荘の現地責任者となったのが、阿蘇大宮司である。やや後の史料になるが、治承4年（1180）正月日付け「源大納言家政所下文案」（注19）で、宇治惟泰は領家の源定房から大宮司職に任命され、「社務」を全うすることと「御季貢沙汰」を命じられており、祭祀の責任者であったとともに、現地支配者の地位をも認められている。つまり、阿蘇荘は王家領でありつつ、阿蘇社そして阿蘇大宮司によって管理されていたのである。

しかし、阿蘇大宮司が源平合戦終結時に平家方であったことから、阿蘇社領として位置づけられていた阿蘇荘一帯も、鎌倉幕府による関与を受けることになる。

『吾妻鏡』養和元年（1181）2月29日条によれば、前年の11月、阿蘇大宮司惟泰は菊池隆直や木原盛実とともに反平家の兵を挙げる。しかし、平家の追討をうけ、乱後彼らは平家に従うことになった。これにより阿蘇大宮司も源平合戦終結時は平家方として処分を受けることになり、阿蘇大宮司の所領、つまり阿蘇荘にとってそれは事実上の関東御領化であった。結果として、北条時政が阿蘇社領全体の預所職と地頭職を得て領家と阿蘇大宮司の間に入り、阿蘇大宮司はその現地責任者として北条氏による補任と管理を受ける存在となった。以後、阿蘇社領は得宗領として義時→泰時→経時と受け継がれるが、経時の弟時頼が執権となると、阿蘇社領は時定の管下となり、最も早い事績として、寛元4年（1246）12月19日付け「北条時定（為時）下文」（注20）で、津屋惟盛が阿蘇社領の一部を領知することを安堵している。満願寺に関する史料が伝える時定の下向時期は、まさに時定のもとに阿蘇社領の預所が移って間もなくのことであるが、下向の理由は明らかではない。

杉本尚雄氏は、その理由を承久3年（1221）の承久の乱において、後鳥羽院側に加担した菊池氏及び小国に存した平家旧臣とされる葉室氏の監視を挙げている（注21）が、承久の乱から30年以上たっていることからすると、直接の要因とはいいがたい。

建長7年（1255）11月7日付け「関東御教書」（注22）によると、このころ、肥後国内の御家人らに一国平均の役とされていた阿蘇社への初穂米上納が、御家人らにより意図的に滞納されていた。阿蘇大宮司惟景からの訴えを受け、幕府が徴収の最高責任者である守護に対し、早く先例に応じて沙汰するようにとの命を下していることからすると、時定の下向は肥後国内の御家人統制が目的とされていた可能性もあるだろう。

時定が拠点として小国を選ぶに至った理由について、松本雅明氏は、阿蘇氏（西巖殿寺）の勢力を食い止めるために、阿蘇山信仰にゆかりある天台宗に対し、本来禅宗信仰に厚いながらも、真言宗寺院を建立することにより楔を打ったとする（注23）。また、阿蘇品保夫氏は、

阿蘇谷においては阿蘇社が鎮座し、南郷谷は阿蘇大宮司による開発と武士団形成の実績がある一方で、小国郷は両者の伝統や地域から離れた空白地帯であったとみなし、同時に九州北部の結節点として要衝の地であったことを重視する（注 24）。

しかし、次の点を考慮すると、両氏の指摘に従うには注意を要すると思われる。

まず、先に述べたように小国もまた阿蘇社領として阿蘇大宮司の現地支配のもとにあったため、阿蘇谷、南郷谷と比べて程度の差はあったにせよ、空白地帯であったとまで断定するのは難しい。

これに関連して注意されるのが、満願寺近隣の千光寺に伝来した十一面観音像である。本像は平安時代後期の作とされ、健磐龍命の本地仏とされる西巖殿寺の十一面観音像と同じく、左手は水瓶を執り、右手は垂下して与願印とする。また、白毫や髪筋をあらわさず、腕釧や臂釧を身に着けた痕跡が見いだせないことから、井形進氏は千光寺像に表現を簡明にすることへの意識を読み取り、本地仏として制作された可能性を指摘している（注 25）。このことから、千光寺像が西巖殿寺像と同様に健磐龍命の本地仏として制作されたとすれば、平安時代後期の時点で小国地方に阿蘇山信仰が及んでいることになり、信仰の面からも小国地方が空白地帯であったととらえることは難しいのではないかと。

一方、注目したいのは、満願寺の前身である小国郷大山寺別院多聞院において、文永元年（1264）に北条時頼の百ヶ日仏事として光明真言会を営んだとされていることである。光明真言会は、奈良・西大寺の叡尊が文永元年（1264）9月4日に創始した法会で、西大寺建立の本願称徳天皇の忌日を期して、七昼夜にわたって亡者の追善、生者の現世利益のために光明真言を読誦する法会である（注 26）。

つまり、時定は西大寺で創始されたのと同じ年に光明真言会を実施したことになるが、北条時頼は死の直前、叡尊を鎌倉に招いて親しく交流したことが知られている（注 27）。満願寺の創建伝承は史料上、室町時代をさかのぼれないが、この符合は何らかの根拠にもとづく可能性もある。そして、『国郡一統志』において、光明真言会の本尊とする現存の大日如来画像は、腹前で禅定印を結ぶ胎藏界の大日如来をあらわす。九州においては、仏画、彫刻を問わず同形式の大日如来像は多くなく、代表作として、文保2年（1318）の大分・金剛宝戒寺像がある。金剛宝戒寺は西大寺の末寺を列記した明德2年（1391）の「西大寺末寺帳」において、豊後の西大寺末寺の筆頭として登場する寺院で、大日如来像も叡尊教団の意向を受けて制作されたと考えられている（注 28）。そして、満願寺からほど近い日田の永興寺もまた西大寺末寺となっていることが「西大寺末寺帳」から知られ、周辺地域への叡尊教団の

進出がうかがえる。

これらのことから、満願寺は兄時頼の仏教信仰を反映させた寺院として、弟時定により建立されたといえるのではないか。建立に際し叡尊教団の関与がうかがえることから、建立地の選定には九州の結節点を抑えんとする叡尊教団の意図も想定されるのである。

満願寺の創建についてしばしば指摘されるのは、創建年である文永11年(1274)に発生した文永の役、つまり蒙古襲来に対する備えである。文永5年(1268)に国書を受け取って以来、国内各地の寺社で異国降伏祈願がなされたが、蒙古襲来は西大寺門流が九州に教線を広げるきっかけともされる(注29)。今後は満願寺創建に際しても叡尊教団が関与した可能性を無視できないといえよう。

しかし、満願寺の創建背景が上記のように想像されるとはいえ、阿蘇社や阿蘇大宮司に対抗する意識があったかどうかについては、本尊毘沙門天像の形式から疑わしいと思われる。次章では、仏像彫刻から満願寺の位置づけについて検討してみたい。

#### 第4章 満願寺の仏像

満願寺では18件の仏像が伝来することが過去に報告されているが(注30)、ここでは本研究において行った調査で大きな成果が得られた本尊毘沙門天像並びに地藏堂安置の地藏菩薩像、金剛力士像を取り上げる。

##### (1) 毘沙門天像(図1)

満願寺本堂内の厨子に安置される像で、本尊とされている。像高83.4cm、髪際高72.5cm(注31)。左手を振り上げて手甲を外に向けて戟を執り邪鬼につく。右手は肘を外に張り五指を伸ばして右腰に当てており、足下に邪鬼を踏んで立つ。本体は、ヒノキとみられる針葉樹材で、頭部を別材挿首。体幹部は前後に別材を矧ぐ寄木造である。

頭部は耳後ろを通る線で前後二材を矧ぎ、内刳の上、面相部を割り矧ぎ、玉眼を嵌入する。体幹部は、側面中央で前後に矧ぎ、前半材は裳裾上まで一材で、後半材は腰帯より上部一材、腰帯以下裳裾まで左右二材製とし、脚部も複数の材からなっている。後頭部材や体部背面の下半身を構成する材、表面仕上げ、邪鬼等は後補とみられる。

左手を上げて戟を執り、右手を腰に当てる姿は、一般に認知された宝塔を捧げ持つ毘沙門天像とは異なるが、『阿婆縛抄』毘沙門堂蔵本(注32)に、兜をかぶり左手に三叉戟を持ち、右手を腰に当てて岩上に立つ図像が描かれる。また『北方毘沙門天王随軍護法真言』(注33)に「左手に戟の梢を執り、右手は腰上に託す」とあるなど、儀軌に記述がある。このう

ち『阿婆縛抄』では、鞍馬寺にこの姿の毘沙門天があるとし、平安～鎌倉時代は鞍馬寺本尊として信仰を集めていたと推測されている。現在鞍馬寺に残る当該形式の毘沙門天像は鎌倉時代の作だが、比較的早い時期の作例としては、兵庫・見性寺像（11世紀）があり、以後中世を通じて作例が残る（注34）。

しかし、儀軌に記述があるとはいえ、満願寺像が通例とは異なる形式で造立されたのはいかなる事情によるのだろうか。北条氏による毘沙門天像制作とえば、北条時政が施主となって文治2年（1186）に制作された静岡・願成就院像が想起される。願成就院像は宝塔、戟を持物とするため、満願寺像では北条氏にゆかりの深い形式が選択されなかったことになる。左手を上げて戟を執り、右手を腰に当てる形式が広まった契機として、暦仁元年（1238）の鞍馬寺焼失に伴う勧進によって毘沙門天の現世利益的側面が強調され、それが在家者に支持され大衆化したことがあげられている（注35）。鞍馬寺の供養は焼失後10年を経た宝治2年（1248）をまたねばならないが、暦仁2年10月の上棟時には鎌倉將軍家による奉加もあった。つまり、これらの動きを通して、鎌倉武士の間に鞍馬寺式の毘沙門天の図像が普及し、満願寺像において左手を上げて戟を執り、右手を腰に当てる形式が採用されたのではあるまいか。加えて、満願寺の立地も、鞍馬寺式の採用に大いに関係した可能性がある。

鞍馬寺は観音、そして毘沙門天の霊地として京都の北方に建立されたが、こうした位置関係は満願寺と阿蘇谷、南郷谷の間にも当てはまる。九州においては、福岡・観世音寺や熊本・勝福寺跡荒茂毘沙門堂の毘沙門天をはじめ、各地の山間に領域守護の意味が込められた天部像が存在することが指摘されているが（注36）、時定が満願寺の本尊として鞍馬寺と同形式の毘沙門天像を選んだのも、阿蘇地方、ひいては九州、そして日本の鎮護を意識してのことだったのではないか。

なお、『高千穂・阿蘇 総合学術調査報告』（注37）によると、小国町・浄泉寺に安置される毘沙門天像がやはり左手を上げて戟を執り、右手を腰に当てる。満願寺像を起点として同形式の毘沙門天像が普及していた可能性を示す事例として注目され、さらなる研究の進展が望まれる。

## （2）地藏菩薩像（図2）

現在満願寺地藏堂の中央の宮殿に安置される。像高262.8cm（注38）を測る巨像で、地藏菩薩としては九州最大級である。左手に宝珠を載せ、右手は屈臂して錫杖を執って蓮華座に立つ通例の形式。彫眼、頭体幹部はヒノキと思われる針葉樹材で、頭頂から地付きまで耳の後ろを通る線で前後二材を寄せる。地付きを含む両肩外側部は各別材を矧ぎ、頭体通して

内割を施す。別材となる両手首先、持物、台座は後補とみられる。

本像の特徴は、丈の高い頭頂による面長の顔立ち、頭身の高いプロポーションである。また、衣文の彫り口は深く立体感に富み、巨像でありながら破綻しない頭体表現は専門の修業を積んだ仏師が手がけたことがうかがえる。同種の作風を示す作例で最もさかのぼるものとしては、延応2年(1240)に善円によって制作された奈良・薬師寺像が挙げられる。もっとも薬師寺像は満願寺像に比べて起伏に富み、面貌表現も、満願寺像の平坦さは否めず、時代の下降を示す。より近い作風を示す例としては、京都・放生院の地藏菩薩立像であろう。放生院は通称橋寺とも呼ばれ、鎌倉時代に叡尊によって再興され、弘安4年(1281)に堂供養が行われている(注39)。放生院像について黒木隆英氏は、面長な顔立ち、長く起伏の激しい切れ目、ふっくらと張った頬、小ぶりの口に薬師寺像に代表される善派仏師の特徴を読み取る(注40)。そして、背景として叡尊による宇治橋架橋と、往来の安全祈願のために建てられた橋寺、すなわち放生院の再興事業を挙げ、放生院像は叡尊が主導して制作された可能性を指摘している。

『別當坊歴代並諸記』によれば、地藏堂は貞治6年(1267)建立というが、作風の面からもこれをあまり隔たらずに位置付けられることが推定された。また、先述のように、満願寺の創建に際しては、少なからず叡尊教団の関与が背景にあったとみられるが、同様の特徴をもつ放生院像にやはり叡尊の関与が想定されるのは興味深い。

### (3) 仁王像(図3・4)

地藏菩薩像と同じく、現所在地蔵堂に安置される阿吽一對の仁王像である。かつては仁王堂に安置されていた。仁王堂は現存しないが、『別當坊歴代並諸記』によれば、元龜2年(1571)建立といい、これまで本像もそのころの制作と考えられてきた。しかし、本研究の中で実施した像内調査により墨書銘が発見され、制作年代のみならず、発願者、作者が判明した。

阿形像は像高261.2cm、吽形像は像高263.8cm(注41)。いずれも彫眼で眉根を寄せて瞋目し、着衣は短裙のみを身に着ける。両腕が脱落して別置されているが、阿形像は、左手は屈臂して振り上げてこぶしを握り、右手は垂下して拳を握り、吽形像は、左手は屈臂して振り上げてこぶしを握り、右手は肘を外に張って屈臂して拳を握っていたらしい。ヒノキと思われる針葉樹材で、頭体は別材。吽形像が頭体それぞれ大略前後三材からなるのに対し、阿形像は体側部を中心に複数の材が細かく矧ぎ合わされており、ところどころにマチ材を多用している。とりわけ、左右胸部の一材が別材であるのは、制作途中で胸部の表現を修正したことに伴うともみられ、制作に際しての苦心がうかがえる。

両像を比較してみると、全身の過剰なまでの筋肉表現や、大づかみで硬い衣文表現、筋張った脛など、作風はきわめて酷似する。一方で構造は大きく異なり、阿形像の胸部が制作途中の修正によるものとみられ、マチ材の多用も同様とみれば、阿形像の担当仏師は吽形像に幾分技術的におくれをとっていたことも想像される。墨書銘によれば、阿形像の方が先行して完成し、仏師も異なるが、あるいは阿形像の担当仏師は当初から吽形像を担当する予定であった仏師の指導を受けて制作に臨んでいたことも想像されるが、推測にとどまる。

銘文は阿形像、吽形像ともに像内胸腹部に記されている（注 42）。これにより、阿形像は永禄 9 年（1566）、圓花坊快舜を願主、阿蘇惟将、下城経之、北里永義を大檀那とし、仏師藤原貞清によって制作。吽形像は永禄 10 年（1567）の制作で、大檀那は阿形像と同様だが、発願者に関する言及がなく（阿形像と同様のため省略されたか）、仏師は永利水右衛門と判読された。九州の中世仁王像は、管見の限りでは数件、紀年銘作例が見出されているが、戦国時代の年号が発見されたのは本像が最初と思われる。

阿形像の作者・仏師藤原貞清については他に作品を見いだせないが、「當寺」すなわち満願寺所属の大工で豊後国玖珠郡の生まれであることが知られ、仏師と名乗るものの本業は建造物全般だったようである。吽形像の作者永利水右衛門については、ほかに事績を見いだせない。

阿形像にみられる別當坊乗経は、『別當坊歴代並諸記』において年号月日不明とする 15 世乗経であろう。ほかに、北坊勢遍、西坊勢隼の名がみえ、当時の満願寺の中心にあった僧侶の名がわかる。本願となった圓花坊快舜の詳細は明らかではないが、豊後の生まれであることが知られる。阿形像の作者仏師藤原貞清とあわせて、九州の結節点らしく、豊後出身の人物が多く出入りしていたことが想像される。

銘文において最も注目されるのは、大檀那の構成である。阿蘇惟将は、戦国時代の阿蘇大宮司惟将に該当する。柳田快明氏によれば、惟将の事績は永禄 3 年（1560）以降数年にわたり不明な時期があるというが（注 43）、本像の墨書銘はそれを補う重要資料である。なお、惟将は永禄 3 年 10 月、対立する阿蘇惟前一族と中原口（現南小国町）で合戦しているが、同年 10 月 11 日付け「阿蘇氏家臣連署証文」（注 44）から、満願寺西坊職の北掃部頭が出陣するも戦死し、後にその子息宛てに阿蘇家臣団が西坊職を保証したことが知られる。阿形像の銘文にみられる西坊勢隼がその子息に該当する可能性があるだろう。

同じく大檀那としてみえる下城経之は小国郷北部、豊後との国境の下城を拠点とする在地領主で、天正期は阿蘇氏の家臣を称した。小国町下城には大永 3 年（1523）から天文 8 年

(1539) にかけて下城経賢が関与して制作された仏神像や梵鐘が残るが(注45)、「経」字の共通から血縁関係が想定される。北里永義は平安時代以来の小国の在地領主北里氏で、このころは大友氏直臣だったもといわれる。元亀3年(1572)3月20日に在地領主の矢津田右衛門尉に「氏大神家之字」である北里姓と、北里氏の通字である「義」を与えたとする「北里永義名字書出状」(矢津田文書)がある(注46)。

銘文からは、阿蘇大宮司と在地領主の下城氏、北里氏の交流がうかがえるが、従来はそれとはやや異なる認識がされていた。

青木勝士氏によると、北条氏滅亡後、小国は再び阿蘇本社領として阿蘇氏との関係が深化していった。しかし、戦国時代には豊後大友氏が肥後領国化を狙い、大友義鎮(宗麟)の代に小国の阿蘇氏領域支配体制は破綻。北里氏、下城氏をはじめ、在地領主層が大友氏直臣化した。一方で、阿蘇本社領としての伝統は続き、在地レベルでは阿蘇氏の勢力が温存されていた(注47)。

しかし、本像の銘文発見により、戦国時代末期になってもなお、阿蘇大宮司と小国郷の在地領主は、従来の想定以上に密接に交流していたことが判明した。仁王像造立の数年前、永禄3年に先述の中原口の合戦が起きていたことからすると、仁王像の制作は関係者の結束と領域守護を意図していたとみてよい。今後は、より多くの資料から彼らの関係性を明らかにしていくことが求められる。

## おわりに

以上、本研究では少ない事例ながら、阿蘇地方の仏神像について概観してきた。その結果からわかったのは阿蘇山信仰を起点として、西巖殿寺をはじめとして多様な信仰文化が広がっていたこと。そして、中世には王家領荘園が形成されていたことから、阿蘇地方が単に一地方にとどまらず、中世の国府、太宰府、そして朝廷からも注目される存在であり、それは阿蘇大宮司をはじめとする在地の領主層によって形作られていたことが想定された。

阿蘇地方の信仰と荘園は、中世に入るところに一度大きな変革を遂げ、荘園の形成と阿蘇大宮司の登場、さらには現在みられるような阿蘇神社における12神構成が成立するなどの転換があったことが、近年歴史学方面から明らかにされつつある(注48)。そして本研究で取り上げた仏神像制作の移り変わりは、おおむねそれと歩調を同じくしつつ、それぞれの発願者が独自に構想した世界観で構成されていたことが推定された。研究期間がごく短期であったため、当初見込んでいた地域での調査実施に及ばなかったところもあるが、さらなる

成果が期待される。

一方で、調査を実施する中で実感されたのは、いずれの所有者においても今後の保存継承について、少なからず課題を抱えていることであった。地域にゆかりある文化資産の調査研究は、そのまま地域の歴史を明らかにすることにもつながり、反対に文化資産の滅失は受け継がれてきた歴史文化の忘却・喪失へと発展していく。阿蘇地方においては、阿蘇山信仰という大きなキーワードがあり、それは熊本のみならず全国の歴史文化認識にもかかわるテーマである。今後は、広い地域が一体となって歴史文化の保存に取り組み、それにより文化資産の評価認識と保存継承の意識向上へとつなげていくことが求められ、本研究がその活動に資するものとなれば幸いである。

#### 【注】

注1 松本雅明「小国満願寺の画像と彫刻」(『熊本史学』12、1957年)。

注2 『熊本県文化財調査報告書 第1集』(熊本県教育委員会、1961年)。

注3 『高千穂・阿蘇 総合学術調査報告』(神道文化会、1960年)。

注4 熊本県文化財調査報告第49集『古坊中』(熊本県教育委員会、1980年)。

注5 『県内主要寺院歴史資料調査報告書(一)(城北地区)』(熊本県立美術館、1982年)。

注6 『阿蘇高千穂地域歴史資料調査報告書』(熊本県立美術館、2008年)。

注7 『阿蘇町史』第1巻(阿蘇町、2004年)。

注8 「平安時代の美術」展図録(熊本県立美術館、1999年)。

注9 注7前掲書。

注10 注5前掲書。

注11 調査は2025年12月23日に実施し、次の関係者にご協力いただいた。なお、所蔵者名は個人情報保護、盗難防止の観点から公表を控える。中西真美子(熊本県文化財保護審議会委員)、石原浩(八代市立博物館未来の森ミュージアム)、竹原明理(熊本県教育庁文化課)、入江捺月(阿蘇市教育委員会)。

注12 岩座は現状同一個人宅所在の仏像に使用されているものとあわせて、もとは一つの大きな岩座として制作されたとみられる。底部には人吉市・願成寺やあさぎり町・勝福寺跡荒茂毘沙門堂の仏像の制作、あるいは修理銘にもその名が見いだせる「京都大仏師 山田平治」の名が記されている。

近世仏師事績データベース <http://www.busshi.net/search.cgi>

注 13 銘文は縦書で記されているが、本誌の構成上、横書で表記する。以下同じ。

〔反花上面墨書銘〕

願主

那羅延房

十一面尊像

豪辨

注 14 注 4 前掲書。

注 15 満願寺における調査は 2025 年 10 月 1～2 日に実施し、次の関係者にご協力いただいた。谷本宗應（満願寺住職）、有木芳隆（公益財団法人永青文庫）、浦叡學（浦仏刻所）、小林貴代（浦仏刻所）、中西真美子（熊本県文化財保護審議会委員）、石原浩（八代市立博物館未来の森ミュージアム）、竹原明理（熊本県教育庁文化課）、村上幸奈（熊本市熊本博物館）、丸山大輝（熊本県教育庁文化課）、坂本直也（熊本市熊本博物館）、河津直樹（南小国町教育委員会）。

注 16 注 5 前掲書。

注 17 『国郡一統志』（新潮社、1971 年）。

注 18 以下、阿蘇神社、阿蘇荘、大宮司家に関する概要については、杉本尚雄『中世の神社と社領—阿蘇社の研究—』（吉川弘文館、1959 年）、阿蘇品保夫『阿蘇社と大宮司』（一の宮町、1999 年）、「阿蘇の文化遺産」展図録（熊本県立美術館、2006 年）、飯沼賢司「中世以前の阿蘇の祭祀構造さぐる—永青文庫下野狩関係史料を中心に—」（吉村豊雄・春田直紀編『阿蘇カルデラの地域社会と宗教』清文堂、2013 年）、柳田快明『中世の阿蘇社と阿蘇氏—謎多き大宮司一族—』（戎光祥出版、2019 年）を参照。

注 19 『大日本古文書 家わけ第十三 阿蘇文書之二』35 号。

注 20 『大日本古文書 家わけ第十三 阿蘇文書之一』36 号。

注 21 注 18 前掲書。

注 22 『大日本古文書 家わけ第十三 阿蘇文書之一』43 号。

注 23 松本雅明「加藤清正と下城氏」（『下城遺跡 I』熊本県教育委員会、1979 年）。

注 24 注 18 前掲書。

注 25 井形進「九州の霊峰の古神像」（「山の神々」展図録、九州国立博物館、2013 年）。

注 26 『西大寺光明真言会の調査報告書』（元興寺文化財研究所、1982 年）。

注 27 山本隆志『北条時頼』（ミネルヴァ書房、2024 年）。

注 28 田邊三郎助「大分・金剛宝戒寺大日如来像と仏師康俊」(『仏教芸術』199、1991年)。  
奥健夫「大分・金剛宝戒寺大日如来像の造像銘記」・奥健夫「金剛宝戒寺大日如来像と仏師  
康俊」・吉良国光「金剛宝戒寺の再興と大日如来像について」(『戒律文化』3、2005年)。

注 29 川添昭二「九州の新・旧仏教」(『地方文化の日本史 3』文一総合出版、1978年)。

注 30 注 5 前掲書。

注 31 その他の法量は以下の通り。単位 cm。

総高 94.9 総張 52.8 髻頂一顎 18.7 頭頂一顎 12.7 髪際一顎 8.6 面張 8.2 面奥 10.8  
耳張 11.1 耳朶張 10.5 肩張(領巾幅) 19.9 胸奥(右) 15.4 胸奥(左) 15.1 腹奥  
15.4 腰張 15.3 膝張 27.2 袖張 47.3 戟長 100.2 戟幅 5.9

〔邪鬼〕

総高 15.4 総張 50.8 総奥 21.6

注 32 『大正新脩大藏經図像部』第 9 卷。

注 33 『大正新脩大藏經』21-225 下。

注 34 神戸佳文「尼崎市白衣観音寺と御津町見性寺の毘沙門天立像—腰に手を当てる毘沙  
門天について—」(『塵界』9、兵庫県立歴史博物館、1997年)。

注 35 阿部美香「中世メディアとしての融通念仏縁起絵巻」(説話文学会編『説話から世界  
をどう解き明かすのか—説話文学会設立 50 周年シンポジウム「日本・韓国」の記録』(笠間  
書院、2013年)。佐藤有希子『毘沙門天像の成立と展開』(中央公論美術出版、2022年)。

注 36 有木芳隆「熊本県球磨郡の平安後期・仏師動向と在地領主の造像活動—在銘の天王  
像を中心に—」(津田徹英編『仏教美術論集 6 組織論—制作した人々』竹林舎、2016年)。

注 37 注 3 前掲書。

注 38 その他の法量は以下の通り。単位 cm

総高 285.8 像高 262.8 頭頂一顎 46.0 面張 28.9 面奥 41.3 耳張 37.5 耳朶張 32.2  
肩張 70.3 胸奥(右) 45.7 胸奥(左) 39.9 臂張 81.1 腹奥 45.5 袖張 79.4 裾張  
69.5 耳長(左) 24.6 耳長(右) 24.3 足先開き(内) 12.0 足先開き(外) 43.0 錫杖  
長 72.3 宝珠高(柄除く) 8.9 宝珠最大径 7.0

〔台座〕

蓮肉高 23.1 蓮肉幅 74.1 蓮肉奥 72.3

注 39 『宇治の美術工芸』(宇治市教育委員会、1985年)。

注 40 黒木隆英「《修士論文要旨》中世における真言律宗の造像活動について」(『奈良大学

大学院研究年報』12、2007年)。

注41 その他法量は以下の通り。単位 cm。

〔阿形〕

髻頂一顎 63.4 頭頂一顎 44.8 面張 27.5 面奥 37.6 耳張 31.9 肩張 62.2 腹奥 38.9  
腰張 65.9 裾張 104.7

〔吽形〕

髻頂一顎 70.6 頭頂一顎 46.1 面張 31.7 面奥 37.2 耳張 36.0 肩張 47.6  
腹奥 36.3 腰張 69.3 裾張 78.1

注42 墨書銘は以下の通り。

〔阿形像内墨書銘〕

于時永祿九年丙寅八月日當山別當坊乘經北坊勢遍西坊勢隼

大檀那惟將下城經之北里永義

本願兩坊ノ同宿圓花坊快舜生國豊後

現世安穩後生善所佛師藤原貞清當寺ノ大工所生玖珠郡

〔吽形像内墨書銘〕

満願寺二王建立之事

阿蘇惟將下城經之北里永義

永祿十年□二月十日 佛師永利水右衛門

注43 注18前掲書。

注44 『熊本県史料中世篇 第1』(熊本県、1961年) 満願寺文書10。

注45 緒方勉「下城周辺の関連資料(資料)」(『下城遺跡I』熊本県教育委員会、1979年)。

注46 以上、下城氏、北里氏については、注23前掲松本雅明論稿及び青木勝士「中世後期の小国郷の様相」(熊本県教育委員会編発行『山川板碑郡』、1995年)を参照。

注47 注46前掲論稿。

注48 小川弘和「中世肥後の形成と武家拠点」(『熊本史学』103、2023年)。

〔付記〕

未筆ながら本研究についてご協力賜った関係者各位にこの場を借りて深く御礼申し上げます。



图1 毘沙門天像 満願寺蔵  
筆者撮影



图2 地藏菩薩像 満願寺蔵  
筆者撮影



图3·4 仁王像 (左: 吽形 右: 阿形) 満願寺蔵  
筆者撮影

## 阿蘇世界文化遺産登録推進「若手研究」採用者一覧

### 令和4年度（2022年度）採用者

- ・阿部 大地氏 佐賀県立図書館 主事（学芸員）
- ・竹永 昂平氏 南阿蘇村教育委員会 主事（学芸員）

### 令和5年度（2023年度）採用者

- ・阿部 大地氏 佐賀県立図書館 主事（学芸員）
- ・袁 星雅氏 筑波大学大学院 世界遺産学学位プログラム 博士後期課程
- ・櫻田 創氏 北海道大学 大学院農学院 土壌学研究室 修士課程
- ・増井 太樹氏 公益財団法人 阿蘇グリーンストック 専務理事

### 令和6年度（2024年度）採用者

- ・阿部 しえり氏 北海道大学大学院農学院 博士前期課程
- ・齋藤 温子氏 東京農業大学大学院 博士前期課程
- ・高岸 慧氏 東京農業大学農学部大学院 研究生
- ・山下 泰斗氏 東海大学大学院 修士前期課程

### 令和7年度（2025年度）採用者

- ・荻野 亮介氏 北海道大学大学院農学院 博士前期過程
- ・賀來 真悠子氏 東海大学大学院農学研究科 農学専攻修士課程
- ・竹内 亮氏 福岡女子大学国際文理学部 講師
- ・萬納 恵介氏 熊本県立美術館 主任学芸員

※五十音順

※肩書は採用時のものである。

本論文集は、以下の熊本県企画振興部 地域振興・世界遺産推進局  
阿蘇草原再生・世界遺産推進課のホームページ上でデータを公開しています。  
(URL)<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/22/195848.html>



## 阿蘇世界文化遺産登録推進 「若手研究」成果論文集 第3号

令和8年(2026年)3月発行

編集・発行 阿蘇世界文化遺産登録推進協議会

〒862-8570 熊本市中央区水前寺6丁目18番1号

(事務局:熊本県企画振興部 地域振興・世界遺産推進局 阿蘇草原再生・世界遺産推進課)

TEL 096-333-2153 FAX 096-381-9829

印刷・製本 株式会社アド・コム

〒862-0908 熊本市東区新生2丁目23-18

TEL 096-285-8550 FAX 096-285-1511



