

阿蘇と熊本地域の地下水を中心とした 水循環システムと熊本地震

東海大学名誉教授 市川 勉

はじめに

阿蘇山は九州の中心部に位置し、福岡県、熊本県、大分県、宮崎県、佐賀県を流れる 6 本の一級河川の源流域をなしており、そのうち菊池川、白川、緑川の 3 河川が熊本県にある。白川は阿蘇カルデラ内にその源を発し、カルデラ西側の出口にあたる「立野火口瀬」を通過すると急流となり、加藤清正が開田した中流域を流れ下る。やがて、熊本市中心部を通り、江戸時代に干拓によって開田された低平地の穀倉地帯を経て、有明海に注いでいる。白川の流域の 8 割が、阿蘇カルデラ内にある。

熊本市を中心とする 11 市町村からなる熊本地域（面積約 1000km²、人口約 100 万人）は水道水源の 100% を地下水に依存し、規模はわが国最大、世界的にも例を見ないほどの「地下水利用地帯」である。熊本地域の地下水は阿蘇外輪山の西側に展開しているが、地表面を通じて大量の水が補給されている。この水の補給を「^{かんよう}涵養」という。その地下水を涵養している水は熊本地域内の白川中流域を中心とした台地部に存在する水田に^{たんすい}湛水する^{かんがい}灌漑用水、畑地や林地に降る雨、阿蘇外輪山の山間部に降る雨である。これらの涵養の総量は、熊本県の「熊本地域地下水総合保全管理計画・第 3 期行動計画」¹⁾によると、年間約 5579 億 m³ に達する。つい最近まで、熊本地域における地下水涵養は浸透能力が高い白川中流域を中心とする台地部の水田地帯がその多くを担ってきた。

しかし、農畜産業を取り巻く環境は厳しく、農家の高齢化や白川中流域を含む東側の地域への熊本都市圏拡大が涵養域を減らし、地下水量も減少した。

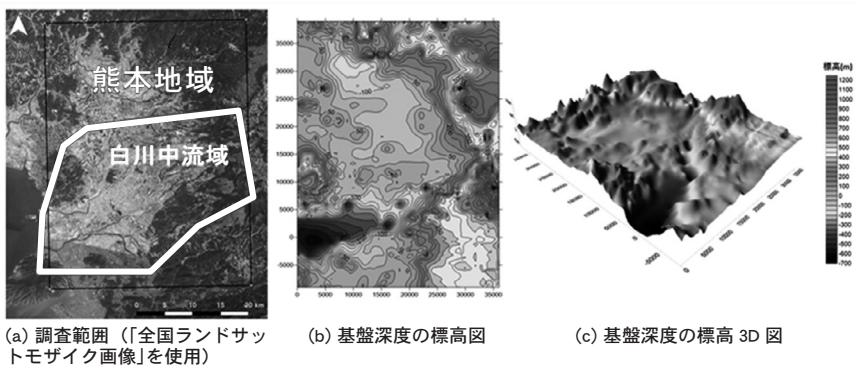
地下水保全の必要性が増すなか、その対策として、白川中流域水田地帯における湛水事業、熊本市民の節水活動、熊本県による地下水保全条例の改正などが進む。一方、熊本地震や2012年九州北部豪雨など、頻発する災害が地下水に影響を及ぼしている。

本稿では、阿蘇から熊本までの地下水を中心とした水循環の状況、そして、熊本地震の影響や地下水の保全について記述する。

熊本地域地下水の成り立ちとその涵養

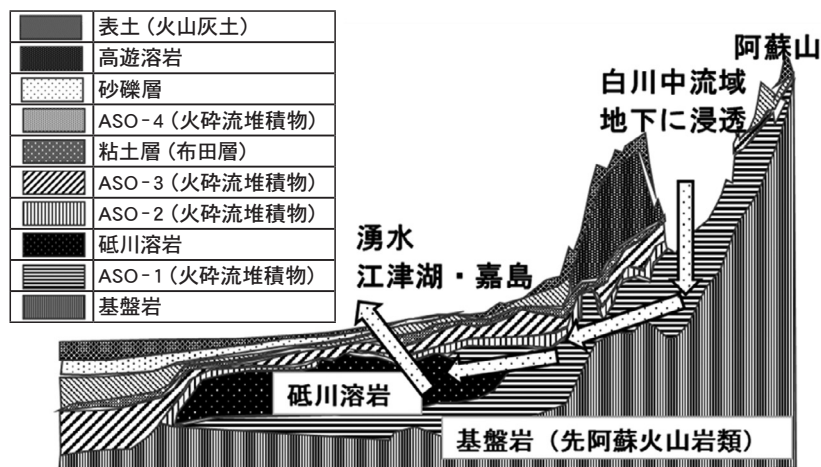
熊本平野は、基盤をなす先阿蘇火山岩類²⁾の上に約27万年前から9万年前までに4回の大規模な火砕流噴火が発生し、ASO-1～4の火砕流堆積物が分布した。その間に益城町の赤井火山から噴出した砥川溶岩が熊本市内中心部まで分布し、(図1)(図2)に示したような深い位置まで達する面積約1000km²にもわたる広い範囲の帯水層を形成している。この地下水域を「熊本地域」と呼んでいる。

阿蘇カルデラ内に降る年間約3000mmにものぼる降水はカルデラ内の水田、草原及び森林を通して大量に地下に涵養されることでカルデラ内に貯留され、これにより、阿蘇谷の黒川、南郷谷の白川の降雨後の増水が軽減されている。立野火口瀬で白川と黒川が合流した後、熊本平野に流れ下り、途中



出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SⅡ-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、P.56（加筆修正）

図1 熊本平野部の基盤岩分布



出典) Ichikawa et al. (2020) Earthquake effects on artificial groundwater recharge efforts in south Japan. Environmental Earth Sciences, 79, 142 (加筆修正)。

図2 熊本地域地質断面図

の白川中流域の水田地帯を潤し、水田涵養によって熊本地域地下水を涵養している。阿蘇外輪山西側の山間部の森林と草原で地下浸透した降水は、一部は河川となって台地部の水田を通じて地下水を涵養し、一部は熊本地域の地下水に直接流入している。

平野部の表土は、高い透水性を持った阿蘇火山から噴出した火山灰である有機質火山灰土の「黒ボク」であり、多量の降雨を地下へ浸透させる。黒ボクの下には、白川をはじめとした河川の氾濫時に堆積した砂礫層（託麻砂礫層）が分布する。その下のASO-4とともに粘土層（布田層、花房層）の上にあり、地表面から最も浅い第一帯水層（地下水を包含している地層）を構成している。この地下水を分割している粘土層の「布田層」は薄い。地下水が減少して発生する地盤沈下の主な原因が粘土層であることから、熊本地域は沿岸部を除いて地下水位低下による地盤沈下が発生しにくい。

白川は立野火口瀬で黒川と合流した後、熊本平野を流れ下って有明海に注ぐが、度重なる氾濫によって河床が削られ、白川の河床周辺は図2のようにASO-2まで達している。そのため、白川中流域で浸透した水は、ASO-3からASO-2の第二帯水層へ直接流れ込み、砥川溶岩に入り流速を増して江

津湖・嘉島の湧水^{ゆうすい}地帯に注ぐ³⁾。このようにして大量の水が熊本地域で涵養され、約 100 万人の水源となっている。

阿蘇カルデラ内の水循環

阿蘇カルデラ内の住民は、1000 年にわたる草原の維持活動や、カルデラ内の水田を中心とした営農活動を継続してきた。それらの活動が「阿蘇カルデラ内の降雨⇒地下浸透⇒地下水⇒揚水・灌漑利用⇒地下への浸透」といった水循環を形作り、浸透した多量の降雨を直接白川（黒川を含む）に流さずに、阿蘇カルデラ内に効率よく保水した。しかし、農畜産業従事者の高齢化、人口減少などの社会的要因、度重なる水害、熊本地震などの自然的要因によって草原や農地の面積は減少の一途をたどり、水循環量は減少している。

これまで、降水量や河川水位・流量、地下水位、湧水量などの水文資料の定量的な調査は断片的であり、必ずしも系統的な調査は実施されていなかった。そこで、阿蘇カルデラ内の水循環の保全は熊本地域地下水の保全にもつながることから、水田や草原・森林などの地表面の浸透能力の把握、河川流量、地下水位、湧水量などの水文データを詳細な観測によって収集し、長期にわたる土地利用の変化や熊本地震などの災害による水循環の変化を評価した。

水田地帯では、降雨・河川水や地下水を水源として稲を耕作する。しかし、広大な水田地帯には大量の水を必要とするため、水田圃場を整備する時に「どの程度の量の水源が確保できるか」が重要となる。阿蘇地方の蒸発散量は、暑い夏でも 1 日当たり 3mm 程度であり、水田で消費される水のほとんどは地下へ浸透する。一つの水田の面積当たりの浸透量を「減水深」と呼び、浸透する水の量を表す。減水深が 1 日当たり 1mm あれば、1 反（約 1000m²）当たり 1 日 1m³ の水量が浸透する。

稲の作付けは、5 月ごろに田植えをし、7 月下旬ごろに中干しをする。中干しの目的は、田んぼを乾かして土の中に酸素を入れるだけでなく、土に発生するひび割れ（クラック）によって根を切るためである。田んぼは長い間水を張っていると、土の中の酸素がなくなって稲の成長に影響が出たり、根が張りすぎて米まで栄養がいきわたらなくなったりしてしまう。中干しは通常、1 週間ぐらいだが、発生するひび割れの大きさと減水深も大きくなる。

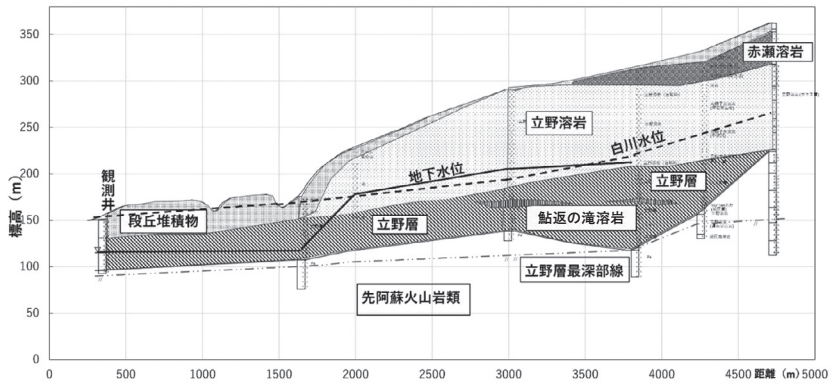
調査の結果、阿蘇カルデラ内の水田の減水深は、中干し前、阿蘇谷では平均 33.6mm/日、南郷谷では平均 47.5mm/日であった。中干し後はクラックの発生により減水深は増加しており、阿蘇谷では平均 74.1mm/日、南郷谷では平均 87.6mm/日であった。一般的に水田の減水深は 10 ～ 15mm/日程度とされ、阿蘇カルデラ内の水田は非常に高い減水深を持っていることがわかる。15 年における主食用水稻と WCS（飼料用稲）の水田からの推定地下水涵養量は、阿蘇谷（阿蘇市）では水田面積約 3000ha で約 1.6 億 m^3 、南郷谷（南阿蘇村、高森町）では水田面積約 1340ha で約 0.8 億 m^3 となり、阿蘇の水田が水循環の中で果たす役割は大きいと考えられる。

地下水位の観測は、熊本県が阿蘇谷の一宮、南郷谷の高森と白水の 3 カ所で観測している。これらのデータをもとに、水循環シミュレーションに使用した。

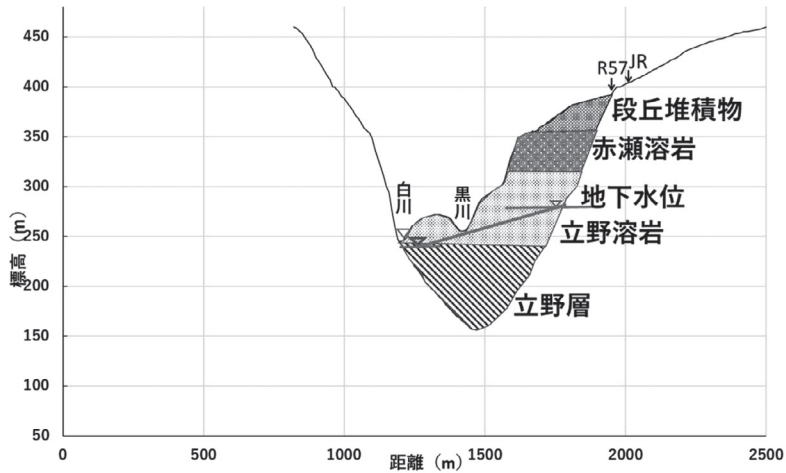
阿蘇谷では、将来にわたって水田が畑地に変化した場合と、草原が林に変わった場合をシミュレーションして比較したが、両方ともに阿蘇谷内の水循環が大幅に減少することがわかった。南郷谷では、草原は急斜面以外ほとんど消失しているため、比較的平らな針葉樹林を草原に戻した場合のシミュレーションを実施したところ、草原を 10%（約 4.1 km^2 ）増やすと約 100 万 m^3 の地下水涵養量が増え、循環量が増した。これらのことから、阿蘇カルデラ内の水田と草原の維持・復活がカルデラ内の水循環維持に重要な役割を持っていることがわかる。

阿蘇山と熊本地域地下水のつながり

これまで、立野火口瀬の下には地下水流が存在する可能性があると考えられたものの、具体的に地下水面の存在や地下水流の特定はできていなかった。熊本地震後、国土地盤情報センターが「地盤情報緊急公開サイト」⁴⁾を公開したことで、立野火口瀬直下の地質構造が明らかになってきた。(図 3) は、同サイトのボーリングデータから作製した立野火口瀬について、阿蘇谷から流出する黒川と南郷谷から流出する白川の合流点付近から下流側に向かった断面の推定地質縦横断面図と、立野火口瀬最上流部（黒川と白川の合流付近）での断面図を示す。帯水層と考えられる立野層（砂礫層）は約 25 ～ 90m



(縦断面)



(最上流部断面図)

出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SII-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、P.56 (加筆修正)

図3 推定地質縦横断面図

の厚さを持ち、白川と黒川の合流点付近から下流に向かって熊本平野まで続く帯水層を形成していると考えられる。立野層中にある鮎返の滝溶岩や立野層上位の赤瀬溶岩は、それぞれ南郷谷と阿蘇谷から続いている地層であるため、地質的に阿蘇カルデラと立野火口瀬は連続している。そして、これらの

溶岩の割れ目を通して、阿蘇カルデラ内から地下水が流出し、熊本平野に向かって流れていると考えられる。

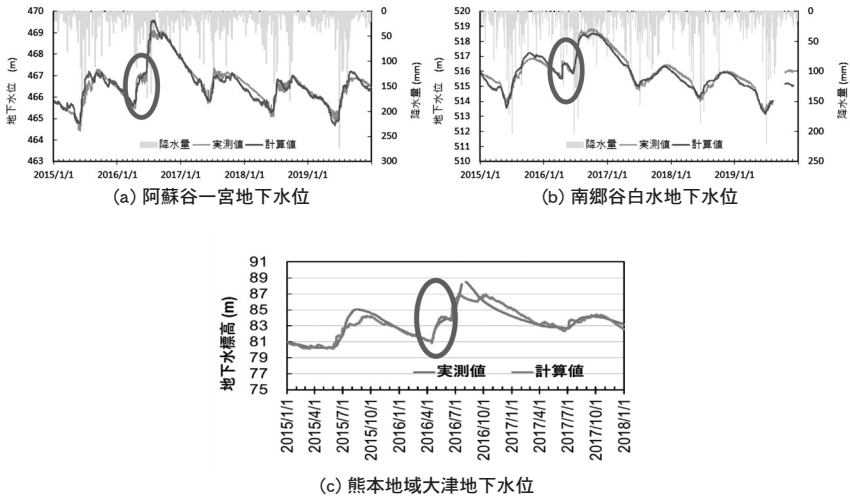
立野火口瀬下流部の大津町外牧に2本の観測井戸を設置した。両地点とも深度約55mに基盤岩である先阿蘇火山岩類が確認された。第1観測井の位置では基盤岩の上位に玉石混じりの砂利の立野層が確認された。立野層は、大礫が多く点在しており、地下水が流れている区間では礫間充填物が、第1観測井から52m下流に位置する第2観測井では、基盤岩と立野層間に立野層には見られない直径5mを超える巨礫を含む先阿蘇土石流堆積物が、それぞれ確認された。

立野層を対象としたボーリング孔を使った地層の透水性を測定する透水試験（深度36～37m）では、平均透水係数は $8.96 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ と高い値が得られ、設置した2本の観測井の地下水位差から立野火口瀬を熊本平野に向かって流れる地下水量は年間約1500万 m^3 と推定された。このことから、阿蘇カルデラから熊本平野にある熊本地域地下水とは直接つながっており、その流れの量も推定された。

熊本地震の影響

16年4月に発生した熊本地震によって、阿蘇カルデラ内の地下水は、山体が保持していた地下水が強制的に排水されて下流側に流れ込み、低い位置の地下水位が上昇した。本震後に山体の透水係数や有効間隙率（地層の中で水が流れることのできる割合）などの水理パラメーター（水の流れを支配するパラメーター）を上昇させることで、山体中に含まれた水が下流に排水されやすくなり、（図4）に示したように1カ月で2m以上も上昇するような地震直後の急激な地下水位の上昇や、地震直後に水源の地下水位が3m近くも低下することによって発生した塩井社水源（塩井神社境内にあり、環境省の「平成の名水百選」に選定されている南阿蘇村湧水群の一つ）の枯渇を再現することができた。

そして地震後は、上昇させた水理パラメーターを徐々に低下させる（数年かけて元の状態へ戻していく）ことで、地震後の地下水位の変化や湧水の回復過程を再現することができた。熊本地域の地下水位の地震による影響も同



出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SII-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、P.56 (加筆修正)

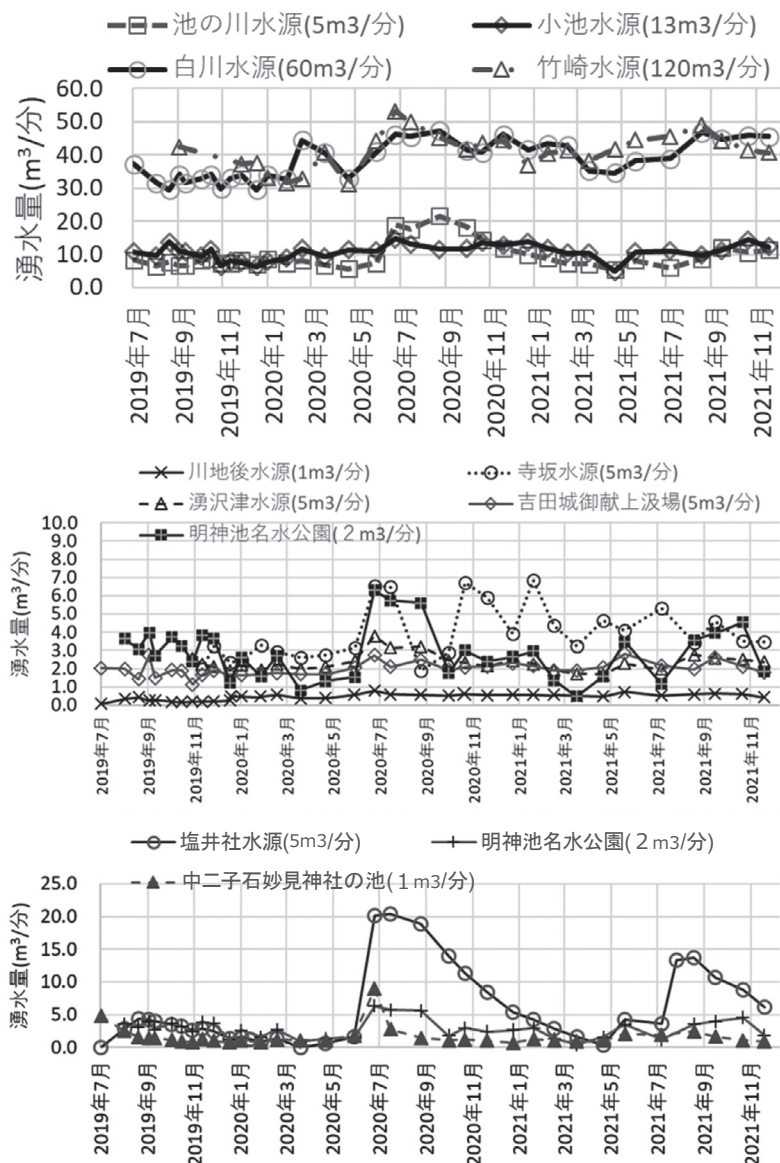
図4 阿蘇カルデラ内、熊本地域の水循環シミュレーション結果

様で、阿蘇外輪山の斜面に含まれる地下水が地震動によって強制排水されたことによる地下水位上昇が発生した。これらの地下水位変動の状況を(図4)に示している。熊本地域の地下水の上昇は、外輪山周辺で最も大きく、下流(有明海側)ほど影響は小さくなっている。

地震後3年を経過した19年7月から21年11月にかけての南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量観測結果を(図5)および(表1)に示す。表の最下段は、各湧水で公示されている湧出量。平均湧出量が公示湧出量を上回っていたのは、塩井社水源、池の川水源、明神池名水公園、妙見神社の池の4カ所だけであった。熊本地震直後に枯渇した塩井社水源は、梅雨の降雨により大幅に湧出量が増加するものの、翌年の梅雨まで湧出が維持できない状況にある(図5)。

熊本地域地下水保全のための「白川中流域湛水事業」と阿蘇山

立野火口瀬を流れ下った白川の河川水は、大津町・菊陽町・熊本市東部を流下する途中で、瀬田上井手堰、瀬田下井手堰をはじめとした七つの堰で取



出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SⅡ-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、P.56 (加筆修正)

図5 南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量変化

表 1 南阿蘇村湧水群と白川水源の湧出量 (m³/分)

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

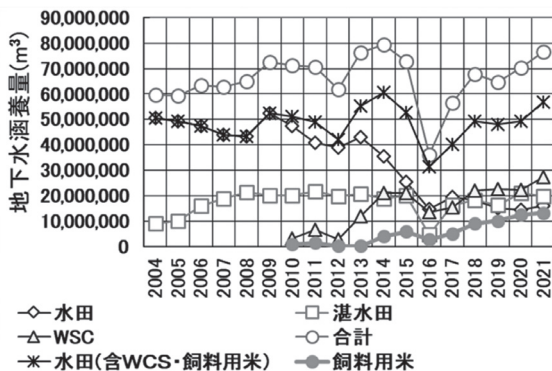
出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SII-5-2 熊本地震による阿蘇カルデラから熊本地域の地下水を中心とした水循環への影響の評価に関する研究、P.56

水され、白川中流域の水田に灌漑用水を給水している。その取水量は1日当たり約200万m³にも達する⁵⁾。

白川中流域の水田は、減水深が100～200mm/日にもなる“ザル田”として有名であり、その面積は約400年前、加藤清正が開田を始め、江戸時代末期までに1500haにも達した。高度経済成長期の1970年代まではほとんどの水田で稲が作付けされていたが、都市化による水田面積の減少、米価の低迷とともに作付けが減少。さらに減反政策によって、2000年代には減反率が40%を超えるまでになってしまった。その結果、涵養量が大幅に減少して地下水位は低下し、下流の江津湖の湧水量減少といった事態を招いて04年、「白川中流域湛水事業」がスタートした⁵⁾。

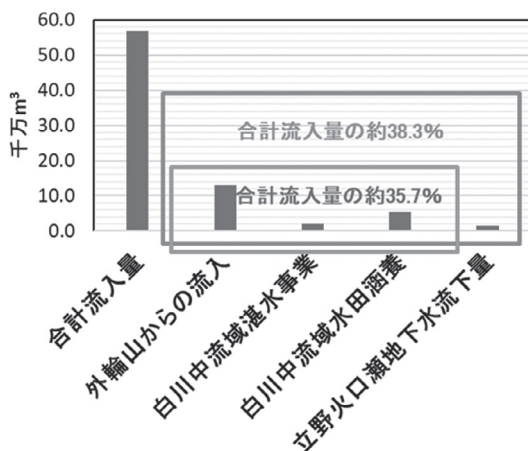
この湛水事業は、稲を作付けしないで畑地に転作する場合、作付けするまでの期間に水張りをしてもらい、その面積と期間で補助金を支出する事業である。熊本市と5企業が参加している。湛水事業による涵養量の推移を(図6)に示した⁶⁾。これによれば▽主食用米を作付けする水田の涵養量は年々減少し、2004年の5000万m³から大幅に減少していること▽10年からWCS(飼料用稲)と飼料用米が増えてきていること▽転作水田の湛水による涵養量はおおむね2000万m³で頭打ちになっているが、総計は7000万m³を確保できていることがわかる。湛水事業で05年以降、地下水位、江津湖の湧水量ともに減少傾向が止まり若干の増加が認められた。

20年に白川中流域では、水田と湛水事業の合計約7000万m³が阿蘇カルデラから流れる白川の水を使うことで地下に涵養されている(図6)。すなわち、阿蘇カルデラから立野火口瀬の下を経て直接、熊本地域へ流れる地下



出典) Ichikawa et al. (2020) Earthquake effects on artificial groundwater recharge efforts in south Japan. Environmental Earth Sciences, 79, 142 (加筆修正)

図6 白川中流域湛水事業による涵養量の推移



出典) 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 SII-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、P.56 (加筆修正)

図7 熊本地域地下水帯水層への流入量の構成

水量と水田や湛水事業によって涵養される地下水量の合計約 8500 万 m^3 が阿蘇カルデラから熊本地域地下水帯へ 1 年間に供給されている水量、といえる。

熊本県の熊本地域地下水総合保全管理計画に基づく第 3 期行動計画¹⁾に

よると、熊本地域の 09 ～ 17 年の平均地下水涵養量は約 5 億 5790 万 m^3 であるから、阿蘇カルデラから流出した白川と地下水流出の熊本地域地下水への涵養は全涵養量の約 15% に相当する。また、収集した水文データをもとに水循環シミュレーションによる水収支の結果を見ると、阿蘇山から熊本地域の地下水帯に供給される水量は、熊本地域の地下水帯に供給される全水量の約 38.3% に相当し、大きな割合を占める（図 7）。

したがって、阿蘇地域は大量に降る降雨を貯留し、少しずつ白川を通じて下流側に供給するとともに阿蘇外輪山西側斜面の森林・草原を通じて涵養される降雨が熊本地域の地下水を涵養することによって下流側の都市部住民の水資源である地下水が維持されている。これに対して、下流側の熊本都市圏の住民や地下水を利用する企業が、阿蘇の農地や草原及び山林の保全、農畜産業への援助で協力している。このように熊本地域と阿蘇地域は地下水を通じて地域水循環共生圏を構成していると考えられる。

阿蘇・熊本地域地下水保全のための活動

熊本県は地下水保全条例で、地下水が水循環を構成する一部であり、県民の生活の基盤をなす県民共有の財産だとし、公共性のある水（公共水）として位置付け⁷⁾て地下水の利用に応じて保全に取り組むことを規定した。そのため、一定以上の地下水を取水する場合、相当する量の涵養対策（地下水保全策）を計画し、報告する義務がある。

熊本地域地下水の長期低落傾向が 00 年初頭に指摘され、地下水を涵養しようとする試みが地下水を大量に使用している熊本市上下水道局や企業によって実行に移された⁵⁾。それが白川中流域転作田の湛水事業である。しかし、熊本地域全体の涵養量を補填するには湛水事業だけでは不十分であった。

そこで、12 年に設立された「くまもと地下水財団」が白川中流域以外の地域における湛水事業、冬期湛水、地下水涵養量を増やす取り組みを進めている。熊本地域に設置された地下水位観測井の観測結果を収集してデータベースを構築したり、地下水の硝酸性窒素汚染対策事業に取り組んだりと多角的な活動に努めている。

また、阿蘇では、南阿蘇村が地下水涵養のために冬期湛水をしている。こ

これらの地下水保全活動のほかに、熊本市が実施する節水活動などへの市民参加による地下水利用量の削減など、多くの保全活動が行われている。

まとめ

熊本平野は、阿蘇山の火山活動によって形成された特異な地質構造を持った平野であり、膨大な量の地下水を蓄えることのできるわが国でも特異な場所である。地下水利用地帯の欠点である地盤沈下を発生させづらい地質構造を持っているがゆえに、わが国最大の地下水利用地帯に発達した。

その水循環機構は阿蘇カルデラ内や外輪山の草原・森林・農地によって涵養される水循環システムに大きな特色を持っている。しかし、長い年月維持されてきた水循環機構も土地利用の変化、農業の衰退によって大きく減退しつつある。上流側の阿蘇山の変化は下流の熊本地域地下水帯に大きな影響を与えるため、熊本地域の地下水帯と阿蘇山は地域水循環共生圏を構成していると考えられる。そのため、下流側の熊本都市圏の住民や地下水を利用する企業にとって、阿蘇の農地や草原及び山林の保全、農畜産業への援助や共同は重要な施策となる。

〔参考文献・注〕

- 1) 熊本県 熊本地域地下水総合保全管理計画・第3期行動計画、P.8、2019年
<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/49/5554.html>
- 2) 熊本地盤研究会 熊日出版、熊本地域の地質断面図ー地下地質と熊本地震一、P.114、2019年
- 3) 公益財団法人肥後の水とみどりの愛護基金 「水はみんなの命」ガイドブック、P.44-45、2015年
- 4) 国土地盤情報センター 九州豪雨災害「復旧支援」地盤情報緊急公開サイト
<https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-2/>
- 5) 熊本市 平成14年度農林業の多面的機能に着目した流域連携調査業務報告書、P.53、P.75、2003年
- 6) 市川勉 2021年度（令和3年度）白川中流域における湛水事業による地下水涵養効果評価報告書、P.96、2022年
- 7) 熊本県地下水保全条例、2020年
<https://www1.g-reiki.net/kumamoto/act/frame/frame110000721.htm>