阿蘇西麓域水系における水循環の変化について

下津昌司*・岩永 彰*

On the Change of Hydrological Cycle in River Basins at the Western Foot of Aso Volcano

Masashi SHIMOTSU and Akira IWANAGA

The notable features of the Kumamoto area located at the foot of the western slope of Mt. Aso (a volcano) is formed by groundwater flow based on the basin characteristics peculiar to Quarternary volcanic rocks. In utilizing and managing groundwater in such an area, the results of a hydrological analysis will be unreliable if groundwater balance with the exception of recharge from surface water and precipitation is not considered in relation to that of the hydrological cycle system as a whole. The authors have elucidated a change in the water cycle in light of the groundwater flow by means of a macroscopical water balance of each river basin in the above area. The approach adopted in this research is beneficial in the water management of the basin.

Key words: volcanic basin, hydrological cycle, water balance, groundwater recharge

阿蘇火山西麓域に位置する熊本地域は、第4紀火山岩類で構成された流域特性に基づく地下水流動系によって、特徴のある水循環体系が形成されている。このような地域での地下水の利用、並びにその管理を図る場合、表流水および地表からの涵養も考慮した、水循環系全体の枠組みの中の一部として、地下水収支を把握しなければ、その結果の信頼性を保証することはできない。著者らは上記地域の河川流域ごとのマクロな水収支を通じて、地下水流動系を含む水循環の変化を明らかにし、本研究の考え方が流域水管理に有効であることを示した。

キーワード：火山流域、水循環、水収支、地下水涵養

I. はじめに

人口70万人の熊本都市圏では、都市用水のほぼ全量を地下水に依存していて、その他の用水を含めた揚水量は、3億 m^3 にも達しているといわれる。そのため最近著名な湧水の水量減少など、地域の水環境の悪化に伴い、水資源利用と環境保全との接点をどうすべきかについて、社会問題となっている。そのためには、地下水収支の算定が必要となるが、この場合、単に地下水域のみを対象としたアプローチでは不十分であり、対象とする流域での降水から流出までの水循環系全体の中で、地下水帯への涵養・流

動・流出といった水収支を把握することが必要となる。このような観点から当地域においては、1970年代後半に科学技術庁を中心とした総合的調査研究¹⁾によって、阿蘇火山西麓域における地下水流動系の概略が、明らかにされ今日に至っている。本研究では、その後に蓄積された水文資料に基づき、西麓域全体の水収支から、この地域での、その後の水循環系の変化を明らかにし、その実態について検討しようとするものである。

II. 対象流域における水収支とその変化

1. 対象地域の水収支概要

対象流域は図-1に示すように、菊池川・白川・

*熊本大学工学部 Faculty of Engineering, Kumamoto University

図一 1 対象流域と水文量観測位置図

圖一-2 水理地質基盤構造²⁾

图一-3 水理地質構造概念图²⁾

と領域を形づくっている水理地質基盤構造の概略は図一2のように示されている。すなわち、変成岩類や白亜紀の御船層群、第3紀の先阿蘇火山岩類などが基盤となり、これらの地層を覆って、阿蘇火砕流堆積物および火砕流間堆積物が帯水層を形成している。その概略を図一3に示す。そこで、これまでに明らかとなった当流域での地下水流動系の概要は、前記文献1)、2)によればつぎのようである。白川中流域は阿蘇外輪山西麓の台地であって、1500年代以降、農業水利施設⁹⁾として取水堰および用水路の開削等が進められており、この結果地表水が地下水へ転化する水循環機構が、人為的につくられた形となっている。そしてさらに阿蘇外輪山西麓域は、白川中流域をはさみ、北に位置する菊池川流域の一部から南の緑川支川・加勢川、木山川流域にわたる一つの地下水域を形成している。つまり、加勢川流域に位置する水前寺・江津湖の湧水をもたらす深層地下水の流動経路は、直接背後台地だけでなく白川北岸の合志川流域の台地に浸透した降水と灌漑用水を集め、西流する白川の地下数十メートル下をあたかも立体交叉するように南にくぐりぬけ、高遊原台地の西縁を南下し、ここで東側からやってくる地下水をあわせて、木山と水前寺の間に湧出する経路をたどるとされている。このように阿蘇西麓域では、火山性地質流域特有の高い浸透能と貯留能に加えて、上述の人為的涵養によって多量の地下水が涵養されている。したがって、地表水・地下水の両領域にわたる総合的な水循環系を通じて、はじめて水収支の実態が把握されるわけで、循環速度が比較的緩慢な地下水収支だけの議論では水循環系の全体像が把握し難い。そこで循環速度の早い地表水について、まず水収支的チェックを先行させることによって、マクロに流域での水収支変化の傾向を捉えることが可能である。このような観点から、いま流域の水収支を前報の例にならって^{1), 4), 5), 6)}、つぎのように表す。

$$\Sigma(P-Q-E) \cdot \Delta t = \Sigma(\Delta S) - \Sigma(G_I - G_O) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$= \Sigma(\Delta S + u) \quad (1)'$$

ここで右辺第一項の流域の貯留高は、10年以上と
いった長期間をとれば0に収斂する傾向をもつが、

白川・合志川・加勢川では第二項が無視できない。つまり農業利水施設によって河道から取水された後、流域境界を超えて灌漑配水され、さらに浸透して地下水帯を流動して他流域へ移動した後、河道へ流出する量が相当存在する。すなわち、この流域は水収支上は非閉塞流域となっていて、しかも複数の流域にわたって水循環系が形成されている。この点について、定量的な検討が進められるようになったのは、1970年代以降のことである。そこで本研究では先の調査研究の成果に基づく流域区分に従って、特に熊本都市圏の水源として直接関係のある白川中流域と、これに隣接する合志川・加勢川・木山川流域相互の水収支について検討をおこなう。

2. 水収支解析

(1)式を用いて、まず年単位の水収支を算出する。1978～90の13年間を対象とし、水文資料は図一1に示す37地点雨量および、8流量観測点の流量を用いる。いま水収支期間を1年にとり、(1)式の右辺を無

視してゼロとおくと

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

となる。ここで、 E が蒸発散量 E_o のみであれば $E = E_o$ となる。そこで各流域ごとに(2)式を適用すると代継橋地点(白川流域)は

$$P = Q - 856 \text{ (mm)} \quad (3)$$

という結果となる。各年ごとに $Q \sim P$ 関係をプロットし、上記の直線式を図一4 (I) に示す。この他、大六橋地点(加勢川流域)、分田地点(菊池川本川流域)、佐野橋地点(菊池川支川・合志川流域)についても同様に示すと図一4 (II)～(IV) のようになる。なお図中には前報文献⁴⁾で算定された直線式も併示してある。ここで E_o について、前報^{1),4)}では650, 700, 750mm/年の各ケースについて水収支の検討を行った結果、対象流域全域として水循環を矛盾なく説明出来る値として700mm/年が最適であるという結果を得ているので、この値を用いることにする。そこで(3)式の $E = 856 \text{ mm/年}$ に含まれる蒸発散量 $E_o = 700 \text{ mm/年}$ を考慮すると、156mm/年の損失高が余分に

図一4 年降水量～年流出高

表-1 白川・加勢川流域水収支

河川	地点	降水量 P(mm)	流出高 Q(mm)	P-Q (mm)	P-Q+G _i -E(mm)	流動量 10 ⁸ m ³	降水量 P(mm)	流出高 Q(mm)	P-Q (mm)	P-Q+G _i -E(mm)	流動量 10 ⁸ m ³
白川	陣内	2659	1461	1198	548	2.33	2691	1937	754	104	0.44
	代継橋	2636	1531	1105	452	2.16	2635	1825	856	156	0.74
加勢川	大六橋	2275	3008	-733	-1433	-3.16	2132	2629	-496	-1196	-2.63

G_i: 外輪からの黒川流域への流入高注) 大六橋にはG_iは含まない

表-2 菊池川流域水収支

河川	地点	降水量 P(mm)	流出高 Q(mm)	P-Q (mm)	P-Q-E _o (mm)	流動量 10 ⁸ m ³	降水量 P(mm)	流出高 Q(mm)	P-Q (mm)	P-Q-E _o (mm)	流動量 10 ⁸ m ³
菊池川	分田	2289	1473	816	116	0.68	2610	1645	965	265	1.47
	佐野橋	2233	757	1476	776	1.22	2295	704	1591	891	1.40
	中 富	2487	1899	588	-112	-0.37	2788	2063	725	25	0.08
	広 瀬	3028	2303	725	25	0.04	2988	1926	1061	361	0.55

存在することになる。13年間の平均で考えると流域貯留高 ΔS は無視出来る値になるので、この156mm/年は結局河道で観測されない流域への流出入高の差($G_i - G_o$)、つまり地下水として他流域へ流出した量が把握されたことになる。また加勢川(大六橋地点)の場合は、 $Q = P + 496 = P - (700 - 1196)$ となって1196mm/年の他流域からの地下水流入量が存在することになる。このようにして算定した値を表-1の右側の欄に13年間間の平均値を、1年あたりの地下水流動量として示している。ここで負の記号は他流域からの流入を表す。なお表-1の左側(1958~1977)年は前報¹⁾で算定された値である。同様にして菊池川について算定したものを表-2に示す。表-1の白川流域には、支川黒川で外輪山の北側からの流域外流入が、湧出しているのを、これを考慮している。

3. 白川流域および加勢川における水収支の変化

前節2で各河川流域ごとに算定した損失高を前報と比較しながら、流域間の水循環形態の変化を明らかにしてみる。

まず白川陣内地点については、降水量は約30mm/年の増加に対し、流出高が約500mm/年増加している。したがって損出高は減少していることになる。同様にして下流代継橋地点では、降水量はほとんど変化していないのに対し、流出高が約300mm/年増加していて、ここでも損出高が減少していることになる。この損失高の中には、渡鹿取水堰からの取水量0.4億m³/年を含んでいるので、それを差し引いた結果、損失高は1.76億m³/年が0.34億m³/年へと、約1.4億m³/年減少していることになる。また今回は、代継橋地点の方が陣内地点よりも損失高が大きくなっており、

図-5 年損失高の3年移動平均値

とくに陣内地点までの白川中流域から他流域への流動量の減少が著しいことがわかる。

つぎに緑川の支川・加勢川の大六橋地点においては、資料の関係で1971~1977年の7年間と1978~

1990年の13年間について、水収支計算を行い比較してみる。この流域は降水量よりも流出高の方が大きく、仮にこの流域への降水量が皆無であっても、500~700mm/年程度の流出高があるという不自然な流域であり、他流域からの流入量があることが想定^{1),4),5),6)}される。降水量は約150mm/年の減少に対して、流出高は約400mm/年の減少である。この差約250mm/年は他流域からの流入量の減少に相当するものであり、流動量では約0.53億 m^3 /年の減少となる。

ここで損失高の連続した経年的変化をみるために、代継橋(白川流域)と大六橋(加勢川流域)について、1958年以降約30年間について、損失高の3年移動平均値をとり図示すると図-5のようになる。白川ではほぼ一方的に損失高が減少傾向、また加勢川では、マイナスの損失高つまり流入高が、一方的に減少している傾向がやはり認められる。

4. 菊池川流域における水収支の変化

菊池川流域では1978年度から、河川改修に伴い流量観測点が山鹿より約5km上流の分田へ変更になった。これによって流域面積が586 km^2 から554 km^2 と約5%減少したことになるが、そのまま山鹿を分田に変更して比較を行うことにする。

表-2によると、まず最下流点分田では、降水量が約320mm/年の増加に対して、流出高は約170mm/年の増加、したがって約150mm/年の損失高の増加が認められる。一方、本川中流域にある中富、広瀬では損失高がそれぞれ約140mm/年と約340mm/年増加しており、前研究では水収支が均衡していた広瀬で今回は他流域への流出、逆に他流域からの流入があった中富で水収支が均衡してきている結果となった。これに対して支川合志川流域の佐野橋地点では、降水量は約60mm/年の増加、流出高は約50mm/年の減少となり、結局損失高は約110mm/年の増加となる。したがって菊池川流域としては、損失高が増加の傾向にあるといえる。つまりそれは合志川流域から他流域への流出量0.5億 m^3 /年の増加がこれに相当する。図-5に示した分田地点の損失高の移動平均値にも、わずかながら増加の長期傾向が認められる。

5. 流域間の水収支関係

これまで求めてきた結果を、流域間総合水収支として表したものが図-6である。

①まず白川および加勢川流域について、(1958~1977)年平均値と(1978~1990)年平均値で比較して

みると、白川流域代継橋地点での流出高が7.3億 m^3 /年から8.7億 m^3 /年と増加傾向を示しており、一方加勢川大六橋地点では流出高が逆に6.6億 m^3 /年から5.8億 m^3 /年と減少傾向を示している。これは加勢川流域での降水量が約140mm/年(0.3億 m^3 /年)減少していることに加え、白川流域より加勢川流域への地下水流動量が減少したことが考えられる。その値は1.8億 m^3 /年から0.6億 m^3 /年に減少している。この他に、加勢川流域へは合志川流域から白川流域を通過しての流入量が考えられていたが、今回その量は0.6億 m^3 /年から1.1億 m^3 /年に増加している。これに白川流域からの流入量を合わせると、加勢川流域への流入

図-6 流域間総合年間水収支図

図一 月間水収支

量は2.4億 m^3 /年から1.7億 m^3 /年に減少しているという結果になる。

ここで経年的変化をみるために月単位の水収支計算を行い、その変化を流域貯留量の経年変化として図一7に示す。ただし、蒸発散量は年間700mmに固定し、気象台の過去のパン蒸発量の月蒸発量の平均値で配分した。また、大六橋の資料の期間の都合で最近の13年間について、前半と後半の2期に分けて比較している。まず代継橋地点についてみると、ここで流域貯留量となっている水量は、観測点上流で灌漑用水として取水された河川水が、表層貯留から地下へ浸透し地下水へ転化している量に相当する。以前は、夏期灌漑期間中は、熊本市内を貫流する白川の流量は、枯渇してしまっていたといわれている。つまり、灌漑期になると計算上、流域貯留高となっている量の大部分は、地下水へ転化し加勢川流域へ流出している水量なのである。見掛上、流域貯留高が一方的に増加し、水収支が均衡しないように見えるが、それは上述のような機構として説明できる。

いま代継橋地点の1984～1990年の7年間と1978～

表一 3 白川の堰取水水量

年	1964～1966	1974～1975	1989～1990
畑井手	0.57	0.56	0.34
上井手	2.94	2.48	0.97
下井手	1.25	0.88	0.41
小計	4.76	3.92	1.72
迫井手		0.38	0.18
玉岡		0.13	0.09
合計		4.43	1.99

(1974～1975年は建設省資料⁷⁾による)

1984年の7年間を比べてみると最近この貯留高が次第に減少してきていることがわかる。それに対し加勢川流域では、降水量や灌漑用水の多い6～7月に、貯留高がわずかに増加する程度で、一方的に減少の傾向を示している。また河道流出高も梅雨期以外はほぼ安定した定常的な流出を示している。これは、かなり時間経過の長い貯留効果と、大量の安定した地下水流入を受けている結果と推定されるが、最近の7年間ではその量が減少していることになる。

つぎに上述の事実を検証するために、白川中流域での灌漑用水の取水状況を調べてみる。この中流域にある主要な5取水堰は表一3に示すようになっている。

陣内地点までの主要3堰(畑井手、上井手、下井手)の取水量は、1.72億 m^3 /年と1960～1970年代に比べて2分の1、あるいはそれ以下に減少している。また5堰の取水量は1.99億 m^3 /年と約2分の1程度になっている。このように灌漑取水水量自体が減少しているが、これは減反や都市化に伴う土地利用の変化によるものであろう。このような取水の変化が、結果として、地下への浸透量の減少につながっているといえる。

②つぎに菊池川流域の水収支では、支川の合志川流域から、本川の中富流域に0.4億 m^3 /年流出していたのが、(1978～1990)年平均値では0となっている。このように水循環の傾向が変化しているのは、減反政策等に伴い水田耕作面積が減少し、水掛がりや用排水の経路が変わったことなどによるものであろう。一方、本川上流域の広瀬地点から中富へ、また中富流域で地下水に転化し、下流で河道へ還元する循環系が出来ている。

ここで、この合志川流域から加勢川流域への流動量が0.5億 m^3 /年増加し、1.1億 m^3 /年になっているのは、合志川・白川・加勢川流域が同一の地下水域に属することから考えて、この地下水域の中流域に当たる白川中流域での涵養量の減少に伴い、加勢川流

域への流動量が減少した分、地下水域の上流部に当たる合志川流域から加勢川流域への地下水流動が増加した結果と考えられる。ただし合志川・佐野橋地点の流量には1981, 1982, 1984, 1985年と4年間欠測があり、そのため水収支は9年間平均値で算定している。

III. 地下水位の動向

前節では、降水量と流量の2水用量を用いて河川流域について水収支を算定し、地表と地下とを関連づけたマクロな水循環の変化を捉えることが出来た。この中で特に地表からの涵養量の減少が問題となった、白川中流域を含む地下水域について、地下水位の動向からこれを検証してみる。

II節の図-1に示した通り、白川中流域を含む地下水域は、通称健軍地下水区といわれていて、熊本地域3つの広域地下水流動系の中で最も広く、そして重要である。図-1に健軍地下水区の涵養域と考えられている地域にある大津、久保田、深迫の3つの観測井の位置を示してある。この3つの井戸の地下水位の変化を、1977~79と1986~88を対比させて図-8に示す。井戸付近の観測点における年雨量は、1976年と1985年は2,200~2,300mm/年でほぼ等しく、その翌年の1977年と1986年もほぼ等しく、2,300mm/年前後の値となっている。1976年の地下水位記録が無いので図示していないが、その翌年の1977年と1986年では、最高水位が5mも差があり、涵養量の減少をうかがわせる。1978年は福岡渇水の年で、1,400mm/年に対し、1987年は豊水年で2,900mm/年となっており、1977年より600mm/年程度多くはなっているが、1977年と同程度の水位までしか上昇していない。このような現象からも、涵養域での涵養量が、減少傾向にあることをうかがわせる。このような地下水位から簡略ではあるが、鉛直涵養量を見積もってみる。いまここでは、水平方向の涵養に対し、鉛直方向の涵養速度が1オーダー以上大きく、第一近似として鉛直涵養のみを対象として考えてみる。地下水帯への流入と流出の関係を連続式で表すと、

$$Q_R - Q_D = AS \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

ここで Q_R : 流入量 Q_D : 流出量

$AS(dh/dt)$: 貯留量の変化で S は貯留係数、 A は地下水域の面積、

dh/dt は地下水位の変化量

また地下水の涵養量がゼロのときには、地下水位

図-8 地下水位変動図

はつぎの低減曲線³⁾で表される。

$$H = H_a + (H_0 - H_a) e^{-Ct} \quad (5)$$

ここで H : t 時間後の地下水位

H_0 : 初期の地下水位

H_a : 基底水位

C : 地下水低減率

あらためて、 $H - H_a$ を h' 、 $H_0 - H_a$ を h_0 とすれば、

(5)式は

表-4 地下水低減率と涵養高の変化

			1977	1986	1978	1987
	地 点	低減率 c $\times 10^{-3}$	涵養高 (mm)	涵養高 (mm)	涵養高 (mm)	涵養高 (mm)
健 軍 地下水区	大 津	10.960	1611	1008	920	1724
	久保田	9.080	1444	942	822	1475
	深 迫	8.210	888	598	462	1014

$$h' = h_0 e^{-ct}$$

となる。涵養がないときは

$$Q_D = -AS \frac{dh'}{dt} = AS \cdot ch'$$

よって

$$\frac{Q_R}{A} = \frac{Q_D}{A} + S \frac{dh}{dt} = CS(H - H_a) + \frac{dh}{dt}$$

地下水位の低減曲線から C を求め、そして涵養高 Q_R/A を求める。この低減率 C は地下水位減少期の中で擾乱の無いこと、それに鉛直涵養つまり降雨がない事例の C が自然低減係数として有効であると考えられる。ただし、いずれの場合も灌漑期間中の水田からの浸透水による涵養効果は避けられない。

以上のような前提のもとに、地下水位の実測値より算定した地下水低減率 C と(6)より算出した涵養高を表-4に示す。先に示した降水量のほぼ等しい1977年と1986年を比較してみる。1986年の方がいずれの地点も減少していて、その減少幅は約300~600mmとなっている。一方1977年の降雨量2,300mm/年に対し、1987年の2,900mm/年は600mm/年の降雨量増であるが、涵養高としては100mm程度の増に止まっている。この涵養高には前述のように水田灌漑水からの浸透涵養も含まれている訳であるから、この結果は灌漑水からの浸透量減少を示しているといえよう。

IV. おわりに

阿蘇西麓域を対象として、1977年以前の20年間とその後の13年間について、地表水の水収支算定を通して、地下水も含めた水循環系の変化をマクロな観点から把握することを試みた。その結果、白川中流域における水田灌漑用水の取水減少によって、この地域における地下水涵養量の減少傾向が認められ、これに伴って菊池川流域から加勢川流域への地下水流動量が増加していることが明らかになった。

ただ本研究水収支算定の過程にもいくつかの課題を残している。その一つは雨量観測点の配置である。本研究では1観測点あたりの平均支配面積は約40~30km²、地点間距離にして約7~5kmであるが、

流域周辺の山間部に配置密度が粗い領域がある。従って、白川支川黒川上流、菊池川本川上流域について少なくとも5ヶ所程新観測点の増設が望まれる。それから蒸発散については前述の通り、ソーンスウェイト法等の1, 2の方法で求めた20年間の推定値と、1960年まで観測されていたパン蒸発量の値を参考にして、年間蒸発散量650, 700, 750mmの3ケースで20, 33年間の水収支計算を行った。その結果の中で全流域を対象として、水収支を矛盾無く説明できる値として一定値700mmを選定している点については、なお検討が必要かも知れない。もう一点は、全体水収支の変化という観点からは影響が小さいと考え、今回の対象から省いている坪井川流域(約60km²)がある。この流域の流量観測は、近年出水時の警戒水位のみ実施されていて資料不備ということから、前回の水収支と同じとして取り扱っている。この点に関しても今後の検証が必要である。

本研究を進めるに当たり水文資料の提供を戴いた関係各位、特に建設省の方々に對し深く感謝を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁研究調整局(1982): 地下水の水収支の解析手法に関する総合研究報告書, pp. 49-64
- 2) 熊本県・熊本市 (1986): 熊本地域地下水調査報告書, pp. 4-29
- 3) 本田彰男(1970): 肥後藩農業水利史—肥後藩農業水利史の歴史的研究, 熊本県土地改良事業団体連合会
- 4) 下津昌司, 石崎勝義, 北川明(1979): 広域水収支における地下水流動量の算定—阿蘇火山西麓部を例として, 日本地下水学会誌, 第21巻, 第3号, pp. 10-20
- 5) 下津昌司, 菊池良介(1987): 熊本市圏の地下水涵養域における水循環とその変化—主に白川中流域を中心として, 第3回水資源に関するシンポジウム, pp. 619-624

- 6) 虫明功臣, 石崎勝義, 吉野文雄, 山口高志(1987):
水環境の保全と再生, 山海堂, pp. 238-246
- 7) 九州地方建設局熊本工事事務所(1977): 白川低
水流量調査中間報告書
- 8) 水収支研究グループ(柴崎達雄)(1976): 地下
水盆の管理, 東海大学出版会, p. 90
(受付1992年12月17日 受理1993年2月18日)