湧泉の見掛け単位面積排水量に関する考察

(主としてカルスト泉の水理地質について)

清水 欣一*

Consideration on Apparent Unit Area Discharge of Spring — especially about Hydro-geology of Karst-spring

by Kin-ichi Simizu

Abstract

For the research of apparent unit area discharge of spring, trial calculations were carried out on the Karst-spring resources in Kusama and Nariwa plateaus. The results are as follows:

Karst region	$\frac{n}{A}$	$\bar{Q}$ 1/sec	Z m ³ /day/km ²
Kusama plateau, north part	1.33	4.2	480
" , south part	1.04	16.3	1,500
Nariwa plateau	4.7	0.256	108

Apparent unit area discharge of spring, Z can be expressed by the following formula:

$$Z = \frac{n}{Z} \bar{Q}$$

where $\bar{Q}$ is discharge average of springs, A is the area of same hydro-geologic condition and n is the number of springs in that area. Values of Z in Karst region and the north-west area of Mt. Daisen volcano are plotted against corresponding values of $\bar{Q}$ on the logarithmic paper. The result is as shown in Fig. 9. Plotted points are distributed on a linear zone. This fact suggests the availability of the conception of "apparent unit area discharge of spring" in the comparison of spring resources.

The author asserts to be of importance to calculate the unit area discharge Z for the evaluation of spring resources by hydro-geological survey for the exploitation and further development of fissure water resources.

1. ま え が き

筆者はさきに大山火山北西部の安山岩類、火山砕屑類をおもな対象として、湧泉の見掛け単位面積排水量という概念を導入した(文献7参照)。その後、中国山地の石灰岩台地のうち、岡山県新見市の草間台地、成羽町の成羽台地で水理地質調査を行ない、カルスト泉の実例を把握した。さらに、上記各地区の試算値より湧泉の見掛け単位面積排水量と湧泉湧出量平均値との関係を考察したので、ここに報告する。この結果より各地下水区の湧泉資源を量的に取扱うことがある程度可能になり、また、この概念はとくに裂か水開発に際しても応用できると考えられるに至った。

本研究を行なうにあたり、野外調査に関係、協力された岡山県耕地課、中国四国農政局計画部の関係各位とくに榎倉克幹技官(草間台地)・和田温之技官(成羽台地)に謝意を表するとともに、恩師吉沢甫・初田甚一郎両教授の御指導・御鞭撻に深く感謝する次第である。

2. 草間台地地区のカルスト泉

2・1 水理地質

草間台地は阿哲台の一部で、標高350~500mのゆるやかな起伏をもつた山頂平坦面であり、その周囲は高梁川・佐伏川・小阪部川の三河川が刻み、比高差200~300mの急崖を形成している。山頂平坦面と急崖とをあわせ草間台地地区と呼ぶ。

地区にはカルスト地形が発達し、カレンフエルトが所々に見られ、山頂平坦面の凹地にはドリーネや吸込み穴が分布している。吸込み穴のうち、谷のいや(3)には常に小河川が流入している。

地質は古生層石灰岩が主であるが、一部に古生層粘板岩・輝緑凝灰岩をはさみ、三群変成岩、石英斑岩も分布している。古生層の地質構造は北側に傾斜する単斜構造である。地区のほぼ中央部に東西に古生層の非石灰岩相が分布し、これを境として便宜上北部石灰岩地区と南部石灰岩地区に区分できる。

湧泉としては、古生層粘板岩と石英斑岩脈との境に1つ(1)分布するほかは、石灰岩の領域に分布するカルスト泉が現在27か所に発見されている。これらのうち、弁天穴(1)は小洞穴、庄吾鳴(6)・草間中学水源(10)は吸込み穴の深部で湧出している地下泉である。一般に台上に分布するカルスト泉は石灰岩のきれつ・割れ目より湧出する小型のもので、地元民は汲川(くみかわ)と呼んでいる。急崖のカルスト泉は大型で石灰洞より湧出している傾向がある。いやあな(2)・養鱒場の湧水(5)・ひのくち(7)・いやだに(8)・井倉洞(9)は石灰洞より湧出し、しおたき(4)は間歇冷泉である。吸込み穴の深部を探検すれば地下泉を発見できる場合がある。

図一 草間台地地区の水理地質図

2・2 湧泉の湧出量・地質別の分類

地区の湧泉の湧出量を昭39・6・10～15間に測定し、階級別に分類した。湧出量の階級は文献3によった。表一1に湧出量・地質別の分類をしめす。

表一1 草間台地地区の湧泉の湧出量・地質別の分類表

湧泉の 地質区分	湧出量による階級別の湧泉数と湧出量 (ℓ/sec)				湧泉数	総湧出量 ℓ/sec	湧出量 平均値 ℓ/sec
	階級 4	階級 5	階級 6	階級 7			
石灰岩	4 (1129)	5* (22.0)	9* (2.8)	5 (0.3)	23	138	6.0
石英斑岩	—	—	1 (0.2)	—	1	0.2	0.2
計	4 (1129)	5 (22.0)	10 (3.0)	5 (0.3)	24	138.2	5.8

*は地下泉3をふくむ。湧出量の実測が不能のカルスト泉4ヶ所は表一1より除いた。

表一 1 より草間台地地区ではカルスト泉がほとんどをしめ、その湧出量平均値は階級 5 に属することがわかる。カルスト泉の湧出量頻度分布は図一 2 のごとくである。

図一 2 草間台地地区のカルスト泉の湧出量頻度分布図

2・3 湧泉の標高別の分類

湧泉数・湧泉湧出量を標高別にまとめ、図一 3 にしめす。

図一 3 草間台地地区の標高別の湧泉湧出量・湧泉数

湧泉数は標高 360~460 m のものが 66.7% (16 か所) をしめ、標高 140~340 m のものが 33.3% (8 か所) をしめる。湧泉湧出量は標高 360~460 m のものが 26% (36 l/sec) を占め、

標高 140~340m のものが 74% (102.2ℓ/sec) を占める。すなわち湧泉数では台上(標高 360~460m)のものが優勢であるが、湧泉湧出量では山腹(標高 140~340m)のものが優勢である。

2・4 湧泉の水質・水温

一般に湧泉の水質は外観ではすべて無味・無臭・無色である。昭 39.6.10~15 間の測定値を図-4 にしめす。

図-4 早間台地地区の湧泉の標高別の電気伝導度・水温

3. 成羽台地地区のカルスト泉

3・1 水理地質

成羽台地は標高 300~500m のゆるやかな起伏をもつた山頂平坦面であり、台地の周囲のうち、西部・南部は成羽川が、東部は成羽川の支流が刻み、比高差 300~350m の急崖を形成し、北部のみ山地に隣接している。山頂平坦面と急崖をあわせ成羽台地地区と呼ぶ。

成羽台地の中央部から西部にかけカルスト地形が発達し、カレンフエルトが所々に見られ、山頂平坦面の凹地にはドリーネが分布しているが、カルスト地形の発達の程度は草間台地より貧弱である。

地質は古生層石灰岩のほか古生層粘板岩・砂岩、中生層の硯石層群・成羽層群、花崗岩、安山岩、第三紀層(山砂利層様のものもふくむ)が分布している。古生層の地質構造は東西性の向斜軸をもつ向斜構造ないし盆状構造様である。成羽台地の骨核は非石灰岩相を下位層とする厚い石灰岩によつて構成され、その上を中生層、安山岩類がおおい、一部に花崗岩の進入が見られる。さらに、これらをおおつて

第三紀層が部分的に分布している。したがって、成羽台地の石灰岩は台上の低地や谷壁に分布し、台地の山頂には異種の地層・岩石が分布する傾向がある。このことが成羽台地のカルスト地形の発達を大きく支配している。

湧泉は54か所発見され、そのうち、カルスト泉は47か所である。一般にカルスト泉は石灰岩のきれつ・割れ目より湧出する小型のもので、汲川と呼ばれている。森だいの泉(1)・仏の甲(9)・(11)は石灰岩の小洞穴より、ごーさまの泉(2)は石灰洞より湧出している。しらたき(7)・岩屋(8)は石灰洞の位置よりも低いところから湧出している。しかし、草間台地と異なり、石灰洞と関係のあるカルスト泉が大型であるという傾向は認められない。長地簡易水道(11)は浅井戸様であり、(6)は石灰岩鉱区調査の水平ボーリング孔より湧出している。カルスト泉以外の湧泉のうち、小泉鉱山廃水(4)は安山岩、三豊鉱山廃水(5)は花崗岩と石灰岩の接触部に掘削された坑道の坑口より湧出する鉱山廃水である。まえばらの井戸(3)は浅井戸様で安山岩のがいすい帯に分布している。

図-5 成羽台地地区の水利地質図

3・2 湧泉の湧出量・地質別の分類

地区の湧泉の湧出量を昭40・3・4～8間に測定した。表-2に湧出量・地質別の分類をしめす。

表-2 成羽台地地区の湧泉の湧出量・地質別の分類表

湧泉の 地質区分	湧出量による階級別の湧泉数と湧出量(ℓ/sec)				湧 泉 数	総湧出量 ℓ/sec	湧 出 量 平 均 値 ℓ/sec
	階級 5	階級 6	階級 7	階級 8			
沖積層 河 岸 段 丘	—	—	1 (0.016)	1 (0.002)	2	0.018	0.009
安 山 岩	—	1 (0.35)	—	1 (0.007)	2	0.357	0.179
花 崗 岩	—	1 (0.237)	—	—	1	0.237	0.237
古生層 非石灰岩相	—	—	2 (0.066)	—	2	0.066	0.022
古生層 石 灰 岩	1 (2.5)	23 (8108)	18 (0.869)	3 (0.021)	45	11.498	0.256
計	1 (2.5)	25 (8.695)	21 (0.951)	5 (0.030)	52	12.176	0.234

湧出量の実測が不能のカルスト泉2ヶ所は表より除いた。

表-2より成羽台地地区ではカルスト泉がほとんどを占め、その湧出量平均値は階級6に属すること
がわかる。カルスト泉の湧出量頻度分布は図-6のごとくである。

図-6 成羽台地地区のカルスト泉の湧出量頻度分布図

3・3 湧泉の標高別の分類

湧泉数・湧泉湧出量を標高別にまとめ図-7にしめす。

湧泉数は標高320～500mのものが73.1%(38か所)をしめ、標高240m以下のものが26.9%(14か所)をしめる。なおカルスト泉のみでは前者が80%(36か所)、後者が20%(9か所)をしめる。湧泉湧出量は標高320～500mのものが61.5%(7493 ℓ/sec)をしめ、標高240m以下のものが38.5%(4682 ℓ/sec)を占める。なお、カルスト泉のみでは前者が62%(7137 ℓ/sec)、後者が38%(4362 ℓ/sec)を占める。すなわち、湧泉数・湧泉湧出量とも台上(標高320～500m)のものが山腹・台麓のものより優勢である。

カルスト泉の標高と湧泉数・湧泉湧出量の関係が草間台地地区と成羽台地地区とで大きく異なるのは地形・地質構造の差によるもので、とくにカルスト地形の発達程度がカルスト泉の分布とその規模を支配するものと考えられる。

図一 7 成羽台地地区の標高別の湧泉湧出量・湧泉数

3・4 湧泉の水質・水温

一般に、湧泉の水質は外観ではすべて無味・無臭・無色で、鉾山廃水も比較的良好であつた。昭 4 0 .

3・4～8 間の測定値を図一 8 にしめす。

図一 8 成羽台地地区の湧泉の標高別の電気伝導度・水温

4. 湧水の見掛け単位面積排水量

4・1 カルスト泉の見掛け単位面積排水量

大山火山北西部の安山岩類の湧泉について“同一の地質の範囲は一応水理地質条件が連続である”と仮定して、裂か水の湧泉の見掛け単位面積排水量を定義した（文献 7 p.141～142）。

石灰岩の地下水は裂か水で、きれつ・節理などの割れ目に存在流動する脈状のものであり、石灰洞に存在する場合はむしろ地下川の形態をとる。すなわち、石灰岩の地下水は安山岩の地下水よりも裂か水としての性格が強い。さらに、台上の一部のカルスト泉より湧出した地下水は、しばらく表流してのち吸込み穴に入つて地下水となり、さらに再び山腹のカルスト泉に湧出する現象もありうる。以上のごとく、カルスト泉に裂か水の湧泉の見掛け単位面積排水量の概念を適用するには若干の問題点があるが、大局的な見地より石灰岩の分布範囲は一応水理地質条件が連続であるとみなしてカルスト泉の見掛け単位面積排水量を試算した。

図一 1・4 にしめす試算範囲の面積で草間台地地区・成羽台地地区のカルスト泉の総湧出量を割つて、表一 3 の結果を得た。

表一 3 カルスト泉の見掛け単位面積排水量

地 区 名		試算範囲 の面積 $A (\text{Km}^2)$	湧泉数 n	湧泉総湧出量 Q		湧出量平 均值 $\bar{Q} (\text{l/sec})$	湧泉分布 係数 $\frac{n}{A}$	見掛け単位面 積排水量 $Z = \frac{Q}{A} (\text{m}^3/\text{day}/\text{Km}^2)$
				(l/sec)	(m^3/day)			
草間台地 地区	北部石灰岩地区	1 4.3	1 9	798	6891	42	1.33	480
	南部石灰岩地区	2.8	3	48.8	4219	163	1.04	1500
成 羽 台 地 地 区		9.2	45	11498	993	025 6	4.7	108

4・2 湧泉の見掛け単位面積排水量と湧泉湧出量平均値との関係

一般に湧泉の見掛け単位面積排水量 Z と湧泉湧出量平均値 $\bar{Q}$ の間には定義により次式が成立する。

$$Z = \frac{n}{A} \bar{Q} \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに n : 範囲内の湧泉数

A : 範囲の面積

$\text{m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$ の単位では

$$Z = 86.4 \frac{n}{A} \bar{Q} \quad \text{-----} \quad (2)$$

となる。すなわち、 Z は $\bar{Q}$ と $\frac{n}{A}$ の函数である。 $\frac{n}{A}$ は単位面積あたりの湧泉数で湧泉分布係数と呼ぶ。今、両対数グラフの Y 軸に Z を、 X 軸に $\bar{Q}$ をとると $\frac{n}{A}$ 線群は平行線として表現でき、(2)式の共点図表が得られる（図一 9 参照）。

草間・成羽台地地区のカルスト泉（表一 3 参照）、大山火山北西部の安山岩類・火山砕屑岩類の湧泉

(文献7の表-3・4参照)の $Z \cdot \bar{Q}$ を(2)式の共点図表に投影し図-9にしめす。

図-9 湧泉の見掛け単位面積排水量と湧泉湧出量平均との関係図

図一 9 より中国山地の 8 例では湧泉分布係数が 0.8 ~ 4.7 の範囲に分布し、大局的にはほぼ直線的の帯状分布をしめしていることがわかる。実測例の Z と Q の間には指数函数に似た実験式を想定できる。

4・1 に指摘したごとく、カルスト泉の見掛け単位面積排水量については仮定条件が多いが、実測例にみられる湧泉湧出量との関係は大局的な見地よりカルスト泉の見掛け単位面積排水量の概念を許容しているものと考えられる。また、図一 9 中であまりに他とかけはなれた火山の湧泉やカルスト泉の値については、とくに地質区分の検討・配慮を要するものと予想している。

4・3 湧泉の見掛け単位面積排水量の対比について

O. E. Meinzer (文献 1 p. 53 ~ 54) は湧泉の湧出量変動率 V% を次式でしめた。

$$V = 100 \left(\frac{a-b}{c} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに a : 最大湧出量

b : 最小湧出量

c : 平均湧出量

で、変動率 25% 以下のものを定泉 (constant spring), 25~100% のものを準変泉 (subvariable spring), 100% 以上のものを変泉 (variable spring) と呼んだ。瀬野 (文献 2) は湧泉湧出量は降水量と受水区域に支配されると考えていた。また、筆者らの野外調査より、於福台のカルスト泉の一部では雨量と密接な地下水位変化をしめすものとさほどでないものがあることがわかり (文献 4 p. 141 ~ 146), 大山火山北西部の湧泉についても、雨量と湧泉湧出量の増減関係が明らかなものとそうでないものがあることを知る事ができた (文献 7 p. 139)。

以上の見地より、各地下水区の湧泉の見掛け単位面積排水量を対比するためには、地区のすべての湧泉の湧出量を数年間連続かん測し、(3) 式の Q 値より地質別の湧出量平均値・湧泉の見掛け単位面積排水量を求めたり、あるいは比較地区をすべて同時かん測して対比するのが合理的である。しかし、現実にはそのような大かん測調査を行なうには制約が多く、かつ資源開発に際しては最渇水状態の値が問題となる。対比に際して雨量との関係を定量的に取扱うにはどうすればよいか、今後の問題点である。

現在時点の大山北西部地区の値 (図一 9 の 1 ~ 5) は昭 37.7 ~ 9 の 3 回かん測の平均値より試算したもので (3) 式の a ~ c 間の湧出量をもととし、草間台地地区の値 (図一 9 の 6・7) は昭 39.6.10 ~ 15, 成羽台地地区の値 (図一 9 の 8) は昭 40.3.4 ~ 8 のかん測値より試算したもので (3) 式の b ~ c 間の湧出量をもとしたものと直観的には考えられる。したがって、図一 9 で上記 3 地区を対比するとき、大山北西部地区の値がやゝ大きく表現されていることを銘記すべきである。

雨量との関係を考慮し、図一 9 で右辺上位に位置するものほど湧泉資源が有力であるといえる。

5. 結 論

湧泉の見掛け単位面積排水量の概念を検討するため、中国山地のカルスト泉の実例（草間台地・成羽台地）を把握し、さらに大山火山北西部の安山岩類・火山碎屑岩類の湧泉と比較した。結果は以下のとおりである。

1) 草間台地地区にはカルスト泉が27分布し、地区全体の湧出量平均値は6.0 ℓ/sec （階級5）である。地質より地区を2分でき、そのうち、北部石灰岩地区は湧出量平均値4.2 ℓ/sec 、カルスト泉の見掛け単位面積排水量48.0 $\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ で、南部石灰岩地区はそれぞれ16.3 ℓ/sec 、15.0 $\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ である。

2) 成羽台地地区にはカルスト泉が54分布し、湧出量平均値0.256 ℓ/sec （階級6）、カルスト泉の見掛け単位面積排水量1.08 $\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ である。

3) 草間台地地区のカルスト泉の湧泉数は台上のものが有力であるが、湧泉湧出量は山腹のものが有力である。成羽台地地区では湧泉数・湧泉湧出量とも台上のものが山腹・台麓のものより有力である。このことは両地区の地形・地質構造の相異によるもので、とくにカルスト地形の発達程度がカルスト泉の分布とその規模を支配するものと考えられる。

4) 一般に湧泉の見掛け単位面積排水量 Z と湧泉湧出量平均値 $\bar{Q}$ の間には次式が成立する。

$$Z = \frac{n}{A} \bar{Q}$$

ここに n は範囲内の湧泉数、 A は範囲の面積で、 $\frac{n}{A}$ を湧泉分布係数と呼ぶ。両対数グラフの Y 軸に Z を、 X 軸に $\bar{Q}$ をとると $\frac{n}{A}$ 線群は平行線として表現でき、上式の共点図表が得られる。

5) 草間・成羽・大山火山北西部の湧泉の $Z \cdot \bar{Q}$ を上式の共点図表にプロットすると、ほぼ直線的の帯状分布がみられる。この事実より、大局的な見地からは裂か水の湧泉の見掛け単位面積排水量、さらにはカルスト泉の見掛け単位面積排水量の概念が一応妥当なものと考えられる。

6) 各地下水区の湧泉の見掛け単位面積排水量を比較するには雨量との関係を考慮する必要がある、このことを考慮した上で共点図表の右辺上位に位置するものほど湧泉資源が有力である。

裂か水の賦存地帯についてその湧泉資源を量的に対比しておくことは、将来の裂か水開発の指標になるものと考えられる。

あ と が き

既述の湧泉の見掛け単位面積排水量の値は、ポンプ揚水を加味した地下水開発工を行なえば、さらに増加するものと考えられる。直観的にいえば、裂か水開発工を展開するとき、湧泉湧出量平均値は1か所あたりの採水量、湧泉の見掛け単位面積排水量は地質条件が同一の1Km²の範囲内での総取水量についての目安になると考えられ、開発によつてこれらの値を何倍位まで増加させることができるかが興味ある今後の問題点である。また、雨量を考慮し(2)式の共点図表の右上上位に位置する地区ほど、裂か水開発に期待がもてると予想できる。

なお、裂か水開発の具体的な方法論としては、横坑または斜坑→ポンプ揚水をとらねばならぬ場合が多いが、将来は大口徑の斜掘りボーリング→揚水が望ましく、斜掘り孔に使用できる安価・確実な揚水工法の開発が望まれる。

文 献

- 1) O. E. Meinzer : Outline of ground — water hydrology , U. S. Geol. Survey water — Supply paper 494, p. 50~56, 1960 Reprinted.
- 2) 瀬 野 錦 蔵 : 地下水学ノート, 京都大学講義
- 3) 山 本 莊 毅 : 日本における火山山麓の湧泉, 科学, (158), 1960
- 4) 清水欣一・有吉一馬 : 畑地帯浅層地下水調査秋吉台地区水源調査報告, 地質地下水調査報告集(昭和35年度), p. 130~147, 岡山農地事務局
- 5) 岡 山 県 : 15万分の1岡山県地質図および説明書, 昭38.
- 6) 清 水 欣 一 : 大山の地下水~湧泉の水理地質を主として~, 日本地下水学会会誌, No. 5, p. 12~15, 昭38.
- 7) 清 水 欣 一 : 大山北西部の湧泉の水理地質学的研究, 応用地質, Vol. 5, No. 3, p. 136~144, 1964.