日光,華厳滝の後退速度

早川裕一*松倉公憲**

Recession Rates of Kegon Falls in Nikko, Tochigi Prefecture, Japan

Yuichi HAYAKAWA * and Yukinori MATSUKURA * *

Abstract

The mean recession rate of Kegon Falls is examined, estimating original location and age. Two locations (L_I and L_I) at which the waterfall originated are estimated based on the distribution of Kegon lava, while the age of origination is considered to be the same as that of the Kegon lava eruption, *i.e.*, 20,000 years ago. Two values of the mean recession rate obtained are 0.018 m/y for the case of L_I and 0.10 m/y for the case of L_I . On the other hand, the recession rate can be evaluated, as an order estimation, using the empirical equation of the authors (Hayakawa and Matsukura, *Earth Surf. Process. Landforms*, **28**, 2003) which shows relationships between the recession rates of waterfalls and the ratio of the erosive forces of rivers to bedrock resistance. The values of parameters used in the index of force/resistance ratio are obtained from existing data and field measurements for Kegon Falls. Substituting them into the equation, the recession rate is calculated to be in the order of 0.009 0.019 m/y. This result suggests that the recession rate for the case of L_I is suitable for Kegon Falls.

Key words: waterfall , recession rate , rock control , bedrock erosion , fluvial landform , Kegon lava , Kegon Falls

キーワード:滝,後退速度,岩石制約,岩盤侵食,河川地形,華厳溶岩,華厳滝

I.はじめに

滝は河川地形のひとつとしてごく普遍的にみら れるものであり,その形の特異性などから観光の 対象となることも多い。しかし,滝を対象とした 地形学的な研究は,これまでにきわめて少ない。 そのため,河谷地形の発達における滝の役割や, 滝の侵食メカニズムの詳細などについては現時点 ではよく理解されていない。一方では,遷急点ま たは遷急区間¹⁾の後退が,河床縦断面形の発達 において,下刻の要因として重要な役割をもつ という指摘がある(たとえば,Seidl *et al.*, 1997; Righter, 1997; Heimsath *et al.*, 2001; Niemann *et al.*, 2001; Zaprowski *et al.*, 2001), したがって,滝が遷急点の一形態である(von Engeln, 1940)とすると,滝の後退という現象を 明らかにすることは,河川地形の発達,とくに下 刻作用の過程を考える上で意義があるといえる。 そこで本研究では,華厳滝を例に,滝の後退速度 について検討した。

^{*} 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

^{**} 筑波大学地球科学系

^{*} Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, the University of Tokyo

^{**} Institute of Geoscience, University of Tsukuba



図 1 調査地域. 地形陰影図は国土地理院発行数値地図 50 m メッ シュ(標高)を用いて作成した.

Fig. 1 Study area.

調査対象とした華厳滝(口絵3)は,栃木県日 光市中宮祠,鬼怒川水系大谷川の上流部に位置す る(図1)。この滝は,観光地として国際的に有名 な日光を代表する景勝地のひとつであり,日本で もっとも有名な滝であるといえる。しかし,この 滝を対象とした詳細な調査および地形学的な研究 は,三野(1958)があるだけである。

三野(1958)は,華厳滝およびその周辺の地形 計測を行い,滝と滝壷,および滝から下流の峡谷 について記載した。またその結果から,華厳滝の 生成地点,および後退様式について考察した。し かし当時は周辺の地質に関して詳細な調査がなさ れておらず,広域的な岩石の分布についての記載 はない。また滝の生成地点も,谷底から観察した 峡谷の地形だけをもとに推察している。さらに, 三野(1958)は華厳滝の生成年代についても言及 しているが,当時は地質学的な年代測定の手法が 確立されていなかったので,それも推測にとど まっている。

三野(1958)による報告以降,この地域におけ る地質図が作成され,また華厳滝を構成する溶岩 を噴出した男体山の活動史も徐々に明らかにされ てきた(阿久津, 1979; 佐々木, 1993, 1994; 鈴木 ほか, 1994)。本研究では, これらの地質学的研究 の成果, すなわち岩石の分布と男体山の活動史に 関する情報をもとに, 華厳滝が最初に形成された 位置(生成地点)と形成された年代(生成年代) を, 男体山の活動と関連付けて推定する。それら の結果から, 華厳滝が生成してから現在までの 平均の後退速度を算出する。さらにその後退速 度の妥当性を, 滝の後退速度に関する経験式 (Hayakawa and Matsukura, 2003)を用いて検 証する。

II.調查地域

1) 概観

華厳滝の位置(図1)は,日光火山群と呼ばれ る火山地域に含まれる。日光火山群は第四紀更新 世から活動を続けており,この地域では多くの火 山と湖沼,および滝が形成されている。日光火山 群の南部には,第三系の堆積岩・火成岩からなる 足尾山地が接している。足尾山地は日光火山群の 基盤となっていて,華厳滝の付近における地質は 古第三系の溶結凝灰岩である。華厳滝のかかる大 谷川の流域は,華厳滝より上流ではほとんどが日 光火山群に含まれる。一方,滝より下流の大谷川 は,北の日光火山群と南の足尾山地のほぼ境界に 沿って流下する。

華厳滝の付近は 1,200 m 前後の高い標高をもち, 気候は平野部に比べて寒冷であり,また降水量も 多い。たとえば,下流の栃木県宇都宮市(標高 120 m)の年平均気温が 12.9 ,年平均降水量が 1,500 mm であるのに対し,華厳滝付近である日 光中宮祠の測候所(標高 1,292 m)における年平 均気温は 6.0 ,年平均降水量は 2,230 mm となっ ている(日光の動植物編集委員会, 1986, p. 30)。

2) 華厳滝およびその周辺の地形と地質

華厳滝のすぐ北部には男体山と呼ばれる火山が ある(図1)。男体山は日光火山群の中では末期の 活動によって形成され,その活動年代は22,000年 前から13,000年前までとされている(鈴木ほか, 1994)。この山体は安山岩および石英安山岩質の 溶岩と火砕流堆積物とからなり,原形が比較的よ く保存されている成層火山である。男体山の活動 史については,華厳滝の形成と関連させて後述す る。

男体山の南麓,中禅寺湖(面積11.5km²,湖面標 高1,272 m, 最深部水深166 m: 図1) 東岸から大 谷川が流出し,約500m下流で華厳滝として落下 している(中禅寺湖の東岸から華厳滝までの区間 は大尻川とも呼ばれる)。中禅寺湖北岸は男体山 の南麓と接してなめらかな湖岸線となっているが, 南岸は足尾山地に接して溺れ谷となっている。中 禅寺湖は,男体山から噴出した溶岩が大谷川を堰 止めたことで生じた湖であり, 華厳滝もこの堰止 めに伴って形成された(三野,1958)。ただし,中 禅寺湖底の最深部が華厳滝の滝壷よりも低い位置 にあることから,大谷川は単純に堰き止められた のではないと考えられている。すなわち,大谷川 はもともと北方に流出する水系であったが,男体 山が出現して北流を妨げ,堰止めと同時に流路が 大きく変化させられ,現在のような東に流出する 水系となったとされている(三野,1958)。なお現 在,中禅寺湖と華厳滝の間には中禅寺ダムと呼ば れる小さな堰が設置されている。この堰は, 華厳 滝より下流にいくつか設置されている水力発電所 に,安定した流量で水を供給すること,また豪雨 時の下流における洪水を防止することを目的とし て設けられたものである。このため華厳滝を通過 する水量は,中禅寺ダムの設置以前と以後で総量 に大きな変化はない(栃木県, 1957;栃木県土木部 日光土木事務所,私信)。

華厳滝の滝肩²の標高は1,250 m,滝壷の水面標 高は1,153 m であり,通常,水はその落差 97 m を自由落下する(図2)。滝肩の幅は10 m であり, また滝の位置から上流の流域面積³⁾は127 km², その流域の平均降水量は約2,000 mm/y(日光の 動植物編集委員会,1986, p.30)である。滝面は, 男体山からの噴出物である華厳溶岩からなり,そ の基部および下流側の河床には男体山の基盤であ る第三系溶結凝灰岩がみられる。華厳溶岩は滝の 部分で主に4層からなり,下部から下部集塊岩, 下部安山岩,上部集塊岩,上部安山岩と呼ばれて いる(三野,1958:図2)。下部集塊岩と下部安山



Fig. 2 Profile of Kegon Falls. Revised after Mino (1958).

岩との間には,一部に湖成堆積物が挟まれている。 また,最上部は主に男体山からの降下堆積物であ る火山灰に覆われている。このうち下部集塊岩と 下部安山岩はまとめて下部華厳溶岩と呼ばれ,ま た上部集塊岩と上部安山岩は上部華厳溶岩と呼ば れている。このように華厳滝の滝面はいくつかの 異なる岩石で構成されているが,これらの地質の 違いは滝面の凹凸として表れている。すなわち, 強度の大きい上部・下部安山岩はオーバーハング する形になっているが,それぞれの下部に存在す る強度の小さい集塊岩は,下部に向かって斜面を 形成している。

上部安山岩と上部集塊岩との間からは,常に湧 水がみられる。この湧水は中禅寺湖から漏出して いるものである。湧水はまず上部集塊岩からなる 斜面を流下するが,その下にある下部安山岩は オーバーハングしているので,上部集塊岩と下部 安山岩との境界から何本かの筋となって落下する。 これらの滝は十二滝(幅は約100m,高さは上下 あわせて約50m)と呼ばれる。また三野(1958) によると,滝直下の下部集塊岩には幅51m,奥行 き26m,入口の高さ約5mの空洞が形成されてい て、その奥からも湧水があり、落差1.5mの滝(奥 滝)となっている。この奥滝を通過する水も、上 流の中禅寺湖から供給されるものである。

華厳滝から下流の大谷川河床には足尾山地の溶 結凝灰岩が露出している。滝から約150m下流の 河床には,落差が約6mの涅槃滝と呼ばれる滝が ある。また,華厳滝から下流約400mの左岸にお いては,崖の中腹,上部安山岩と上部集塊岩との 間から地下水が湧出し,落差42mの白雲滝と呼 ばれる滝が形成されている。この地下水は十二滝, 奥滝と同様に中禅寺湖から漏出した水である。

III. 華厳滝の後退速度の推定

1) 生成年代の推定

前述したように,華厳滝の成因は華厳溶岩の噴 出による大谷川の堰止めであると考えられる。そ のため, 華厳滝の形成は, 華厳溶岩の噴出と同時 であったと考えられる。テフラ年代から得られた 男体山の活動開始年代は22,000年前であり(鈴 木ほか, 1994), これ以上の詳しい年代は現時点で は得られない。華厳溶岩は男体山の初期噴出物で ある(佐々木, 1993, 1994)ため,その噴出年代 は男体山の活動開始年代値から大きくはずれるこ とはないと考え、約20,000年前と推定する。すな わち,華厳滝の生成年代は約20,000年前であった と考えられる。したがって,生成してから現在ま で華厳滝は後退を続けてきたとすると,その後退 継続時間 Tは, T = 20,000 yとみなせる。ただし, 下部華厳溶岩と上部華厳溶岩との間には凝灰質シ ルトからなる湖成層が局所的に挟まれており,実 際には華厳溶岩は下部集塊岩,下部安山岩,上部 集塊岩,上部安山岩の順に,ある程度の期間を もって断続的に噴出したと考えられる。そのため 華厳滝もいくつかの段階を経て形成されたと考え られるが,その詳細を知るためには,より詳しい 華厳溶岩の噴出史が明らかにされるのを待たなけ ればならない。

2) 生成地点および後退距離の推定

安山岩質溶岩の末端形状は一般に急崖となるこ とを仮定し,また三野(1958)が述べているよう に,現在の大谷川の流路が華厳滝の後退経路その ものであるとすると,華厳滝は華厳溶岩の末端と 大谷川とが交差する地点に形成されたと考えられ る。したがって,華厳滝の生成地点は,華厳溶岩 の噴出当時の分布を復元することで推定できる。

佐々木(1994) および栃木県日光土木事務所・ 日本工営株式会社(2001)による地質図を用いて, 現在の華厳溶岩の詳細な分布図を平面図および縦 断面投影図として作成した(口絵3図1)。その 際,現地視察と空中写真判読を補助的に行った。 大谷川右岸における華厳溶岩の分布は,華厳滝の 下流約250m地点(口絵3図1のA地点)まで に限られている。一方,大谷川左岸においては, 滝から下流約650mの地点(口絵3図1のB地 点)まで華厳溶岩は連続してみられ,ここで一旦 分布は途切れるが,滝から下流に約1.21.9km (口絵3図1のCおよびD地点)の位置に再び分 布がみられる。

以上のような華厳溶岩の現在の分布から,噴出 当時における華厳溶岩の分布の末端を二通り推定 し, 口絵3図1aに溶岩前線I, IIで表した。前線 I は現在の大谷川右岸における華厳溶岩の分布か ら検討したものである。すなわち, 華厳溶岩は噴 出当時においても地点 A より下流では大谷川右岸 まで達しなかったと考えた。そこで,現在残って いる溶岩台地の平面分布を考慮し,大谷川左岸, 右岸それぞれにおける溶岩台地の末端である A 地 点と B 地点とをなめらかにつなげることにより, 噴出当時の末端を推定した。この前線Iを推定し た理由は,主に大谷川右岸において,華厳溶岩の 現在の分布より下流側に華厳溶岩の痕跡がみられ ないことや,大谷川右岸においては,華厳溶岩と ともに溶岩台地も第二いろは坂のトンネル西口付 近(口絵3図1aのE地点)で途切れていること などである。一方,前線 II は現在の大谷川左岸に おける華厳溶岩の分布から検討したものである。 これは噴出時の華厳溶岩が,滝から約1.9km下流 の左岸に分布する華厳溶岩の位置(口絵3図1の D地点)まで,現在の大谷川の谷を埋め尽くしたと 仮定して推定した。この推定の妥当性は溶岩の噴 出量を見積もることができれば議論できるかもし れない。また,それだけの量を2万年間で削剥で

きたのかも議論すべきである。しかし,このよう な議論のための材料が十分に揃っているとは言い 難いので,この論文では議論しない。

華厳溶岩の噴出時の末端に関するこれら二通り の推定から,華厳滝の生成地点は前線 I, II それ ぞれの場合で L₁, L₁₁の地点であったとみなせる (口絵3 図1a)。したがって,形成されてから現在 までの華厳滝の後退距離は,それぞれの場合で $D_{\rm I} = 350 \,{\rm m}$, $D_{\rm II} = 2,000 \,{\rm m}$ と推定できる。なお, 前線 II の推定から考えた華厳滝の生成地点 L₁₁は, 三野(1958)が推定した生成地点とほぼ同じ位置 である。一方,前線 I を推定した場合には,白雲滝 の生成地点は L₁ とほぼ同じ位置となり,その後退 距離はおよそ $D_{\rm Is} = 200 \,{\rm m}$ と見積もることができ る。

3)後退速度の算出

滝の後退速度について,たとえばナイアガラ滝 では,過去数百年間における滝の位置の実測や, 生成してから現在までの約11万年間における旧 河床の貝化石の年代分析から,その後退速度は短 期的には0.91.3m/yと変化し,また長期的にも, 流量の減少のために0.050.7m/yまで減少した時 期があることが知られている(Philbrick, 1970, 1974; Tinkler *et al.*, 1994)。しかし華厳滝につ いては,後退の途中における位置と年代を示す資 料が残されていないので,後退速度の変動の履歴 を知ることは困難である。したがって,ここでは 単純に生成してから現在までの平均後退速度を求 める。

前述のようにして推定した生成年代(後退継続時間)と後退距離から,華厳滝の平均後退速度について二通りの値が求められる。すなわち,噴出時における華厳溶岩の末端面を前線 I とした場合は,後退速度は $D_{\rm I}/T$ = 350/20,000 = 0.018 m/y,前線 II の場合は,後退速度は $D_{\rm II}/T$ = 2,000/20,000 = 0.10 m/y となる。また白雲滝については,前線 I を推定した場合,後退速度 $D_{\rm Is}/T$ = 200/20,000 = 0.010 m/y が得られる。

IV.後退速度の検証

1) 滝の後退速度に関する経験式

Hayakawa and Matsukura (2003)は, 房総 半島に分布する9個の滝について後退速度を推定 し, さらに後退速度に影響する要因を検討した。 9個の滝はその成因から5つのタイプに分類さ れ 4), その類型ごとに滝の生成地点および生成年 代を推定し,生成してから現在までの平均の後退 速度を見積もった。また,滝の後退速度に影響す る主要な要因として,河川の侵食力と基盤岩石の 抵抗力とがあると考えた。そこで,侵食力には河 川の流量と滝の形状が,一方,抵抗力には基盤岩 石の強度が強く影響すると考え,主要かつ計測可 能なパラメーターを用いて次元解析を行った。そ の結果,第一次近似的には,滝の後退速度は滝の タイプに関係なく次の経験式で統一的に表される ことを提示した (Hayakawa and Matsukura, 2003

$$\frac{D}{T} = 99.7 \left[\frac{AP}{WH} \sqrt{\frac{\rho}{S_e}} \right]^{0.73}$$
(1)

ここで, D: 滝の後退距離(m), T: 滝の後退の 継続時間(y), A: 滝より上流の流域面積(km²), P: 流域の年平均降水量 (mm/y), (ただし, 流域) 面積と降水量の積 APは,流量に相当する単位 (m³/s)に換算する), W: 滝の幅(m), H: 滝の 高さ (m), :流水の密度(=1,000 kg/m³と仮 定),S:基盤岩石の一軸圧縮強度(シュミットロッ クハンマーによる反発値から換算, N/m²) である。 このうち,流域面積Aと降水量Pは河川の流量を, 滝の幅 Wと落差 H は滝の形状を,一軸圧縮強度 S.は基盤岩石の抵抗力をそれぞれ表すパラメー ターである。式(1)は房総半島の滝のデータをも とに導かれたものであるが, 用いているパラメー ターは地域的なものではなく一般的なものであり, これは他の地域でも適用できるはずである。なお 栃木県烏山町の龍門滝に関して,式(1)が適用可 能であることが確認されている (Hayakawa and Matsukura, 2003).



図 3 三野(1958)による華厳滝の後退モデル.

1: 滝面が垂直である状態.2,3: 滝面の下部にある軟岩がとくに湧水により侵食され, 固い滝面の上部がオーバーハングする.4: いくらか下部が侵食されたところで,オー バーハングした上部の岩石が大規模に崩落し,1の状態に戻る.

Fig. 3 Model of recession of Kegon Falls after Mino (1958). The lower part composed of soft rock is suffered from seepage (2 and 3), then the upper part with hard rock is subject to collapses.

ここでは、この式(1)を用いて華厳滝の後退速 度を検証する。ただし華厳滝は、構成岩石が安山 岩と集塊岩の2種で、それらが4層となっている ことと、華厳滝に水を供給する中禅寺湖からの漏 水が十二滝、白雲滝および奥滝を形成しているこ とから、やや複雑な侵食メカニズムで後退してき たと考えられる。そのため以下では、まずそのメ カニズムについて検討し、それを踏まえた上で式 (1)による後退速度の検証を行う。

2) 華厳滝の後退メカニズム

厳滝の後退様式については三野(1958)が詳し い考察を行っている。三野(1958)によると、図 3 に示したように通常は強度の弱い集塊岩層が湧 水により徐々に侵食され,また洪水時には落水に よる渦流5)が滝面の下部の侵食を補助し, 華厳滝 の下部が先に上流方向に侵食される。そして,あ るとき滝面の上部が崩落し, 華厳滝は一度に十数 ~数十mほど一気に後退する。本研究では, 華厳 滝の後退様式について,基本的にはこのような三 野(1958)の解釈に従う。ただし,若干の検討を 加えると,三野(1958)は華厳滝が一度に十数m ~ 数十 m ほど一気に後退すると推測したが,上部 安山岩の岩盤内部には多くの開口した亀裂と開口 していない亀裂が数 cm ~ 数十 cm の間隔で存在す ること⁶⁾と,1958年以来,上部安山岩の小規模な 崩落が何度も確認されていること,また1986年, 滝肩における上部安山岩の崩落で華厳滝の落ち口 が最大で6m後退した,などのことから,オー

バーハングする上部安山岩は,その内部の亀裂に 沿って数十 cm ~ 数 m ごとに剥離し,小規模な崩 落を繰り返してきたと考えられる。ここでは,華 厳滝の後退は三野(1958)が指摘したほど崩壊の スパンは長くなく,流水の継続的な作用により 徐々に後退しているものと考える。

また,三野(1958)は華厳滝における侵食作用 について, 湧水, すなわち奥滝および十二滝によ る侵食を重視しているが,実際に中禅寺湖からは 平均14.5 × 10⁷ m³/y もの水量が,年間を通してほ ぼ一定に地下水として漏出している。これは中禅 寺湖からの全流出量(18.0 × 107 m3/y)の約80% である。そのうち 6.6 × 107 m3/y は白雲滝として 華厳滝より下流側で, 6.5 × 107 m³/y は十二滝お よび奥滝として華厳滝の直下で流出し,残りの 1.4 × 10⁷ m³/y は主に足尾方面へ浸透している (栃木県日光土木事務所,私信)。一方,中禅寺湖 から大谷川への放流量,すなわち華厳滝の年間流 量は,最近42年間の平均で3.5×10⁷m³/yであ る(栃木県日光土木事務所,私信)。すなわち,地 表の華厳滝の流量は中禅寺湖からの漏水量よりも はるかに少なく、また十二滝や白雲滝それぞれの 流量にも満たない。このことから, 華厳滝におけ る侵食作用を考えるときに,地下水として湧出す る十二滝および奥滝,白雲滝を無視することはで きないといえる。したがって次項以下では両者に ついて検討する。なお中禅寺湖から流出する水は, 以上の流量の値から計算すると,華厳滝に19%,

十二滝に 36%, 白雲滝に 37%の割合で供給されていることになる。

3)式(1)による後退速度の検証に用いる各要 因の値

第 章で述べたように,華厳滝より上流の流域
面積,流域の年平均降水量,華厳滝の幅,落差は
それぞれ, A = 127 km², P = 2,000 mm/y, W
= 10 m, H = 97 m である。十二滝の場合は,幅
W = 100 m,高さ H = 50 m となる。また水の密
度は, = 1,000 kg/m³と一般的に仮定できる。

基盤岩石の物性は, 華厳滝付近は絶壁などで調 査が困難であったので,安山岩,集塊岩にそれぞ れ相当する別の地点または下記のような文献の データを用いる。まず安山岩については,日光火 山群における火山のひとつである女峰・赤薙火山 を起源とする安山岩の露頭が, 寂光滝(図1)の 下部にみられ,その地点でシュミットロックハン マーによる反発値を測定できたので、この値を用 いる。女峰・赤薙火山は男体山の北東約8kmに 位置し,35万年前から8万6,000年前までに活動 したとされ(鈴木ほか, 1994), また噴出した岩石 の組成は男体山のものと似ている(佐々木, 1994) ので,この火山を起源とする安山岩は,華厳溶岩 における安山岩と物性において大きく異ならない ものと考える。測定した地点は河岸における新鮮 な部分であり,柱状節理を呈していた。シュミッ トロックハンマーによる反発値は,水平方向に20 回たたいた平均で 62.4% であった。この値は,安 山岩の密度を山口・西松(1977, p.120)およ び Bell (1992, p.257) のデータによる値 2.6 2.8 g/cm³であると仮定すると, Hoek and Bray (1981, p.98)によるグラフを用いて, 一軸圧縮強 度 220 280 MN/m² に変換できる。一方,集塊岩 の物性については,一般的に知られている火砕岩 の物性値と類似すると考え,地学団体研究会地学 事典編集委員会(1981, p.1279)で挙げられてい る火砕岩(凝灰岩・凝灰角礫岩)の例を用いるこ とにした。その一軸圧縮強度は 420 900 kgf/cm²

40 90 MN/m² である。華厳溶岩を構成する安山岩,集塊岩の物性値も以上の値の範囲内に含まれると考える。また,式(1)が第一次近似的な性

質をもつことを考慮すると,ある程度幅をもった これらの代替値でも,式(1)を用いた検証には十 分に利用できるものと考えられる。

華厳滝は,集塊岩層が湧水により侵食され,地 表を流れる落下水がそれを補助するというメカニ ズムで後退すると前項で述べた(三野,1958)。そ こで華厳滝においては,地表流(華厳滝)と地下 水流(十二滝,白雲滝)の侵食作用を別のものとし て考え,以下に式(1)による後退速度の検証を行 う。ただし,地下水流として最下部に存在する奥 滝の作用も本来ならば検討するべきであるが,滝 の下に入る調査が困難で正確な情報が得られず, またその流量は0.2 m³/s ほど(三野,1958)と少 ないので,ここでは奥滝の作用は無視する。

4) 生成地点を L₁とした場合の後退速度の検証

推定した華厳滝の生成地点 L₁から上流において は,白雲滝と華厳滝の後退経路が異なっている。 したがって生成地点をL₁であると推定した場合は, はじめから中禅寺湖からの流出は現在の割合で華 厳滝,十二滝,白雲滝のそれぞれに分岐していた と考えることができる。

+二滝は上流の中禅寺湖からの漏水であり,現 在の流量は中禅寺湖からの全流出の36%である。 したがって,流量に相当する流域面積×降水量 (*AP*)の値については全体の36%であるとして計 算する。すなわち,*AP* =(127.3 × 10⁶)×(2,000/ (365 × 24 × 60 × 60)) × 0.36 = 2.9 m³/s とな る。また,十二滝が直接に侵食作用を及ぼす岩石 が集塊岩であるとして,一軸圧縮強度の値には*S*。 = 40 90 MN/m²を採用する。これらの値を用い て式(1)の右辺を計算すると,後退速度は0.0067 0.0091 m/y となり,推定した後退速度*D*/*T* = 0.018 m/y よりもやや低い値を示す。

一方,華厳滝,すなわち地表流については,流
量が全体の19%であり,十二滝と同様にして AP
= 1.5 m³/s と計算できる。華厳滝が後退するとき,地表流に対してもっとも抵抗すると思われる岩石は安山岩であるので,その一軸圧縮強度の値(220 280 MN/m²)を用いると,後退速度は0.0092 0.010 m/yと計算できる。ここで,一軸圧縮強度に集塊岩の値(40 90 MN/m²)を用いても,

後退速度は 0.014 0.019 m/y と計算される。いず れにしても,式(1)から計算された後退速度は D/T = 0.018 m/y に近い値を示す。華厳滝の後退 が地下水流と地表流の複合作用で行われてきたこ とを考えても,この検証の結果は生成地点 L₁を推 定した場合の後退速度が,かなり妥当な値である ことを示している。

また,白雲滝については滝の幅に関する正確な 情報が得られておらず,また流下する途中でその 幅が変化しているので,その検証を行うことは難 しい。しかし,写真(口絵3 写真1など)から判 断して,平均的な幅を約50mと仮定して計算す ると,高さは42m,流量は全体の37%であるので, 基盤岩石の強度に集塊岩の値を用いた場合の後退 速度は0.013 0.017 m/y,安山岩の値を用いた場 合は0.0086 0.0093 m/yとなる。これらはいずれ も,推定した後退速度 $D_{\rm s}/T$ = 0.010 m/yに近い値 を示す。すなわち,生成地点をL₁とした場合は, 華厳滝,十二滝および白雲滝のいずれについても 式(1)から計算される結果に調和的であるといえ る。

5) 生成地点を L_n とした場合の後退速度の検証

華厳滝の生成地点をLuと推定した場合,現在の 白雲滝のような地下水流の分岐が生成当時に存在 していたかどうかを推定するのは困難である。そ のため,この場合は現在の十二滝や白雲滝のよう な地下水による滝の作用を検討することは難しい。 そこでまず,単純に中禅寺湖からの全流出が表面 流として華厳滝を通過してきたと仮定して後退 速度を検討する。すなわち,高さを97m,幅を 10 m,流量を AP × 100% = 8.1 m³/s として式 (1)から計算すると,一軸圧縮強度に安山岩の値 を用いた場合の後退速度は 0.031 0.034 m/y とな リ,一方,集塊岩の値を用いた場合の後退速度は 0.047 0.063 m/y となる。これらの値はいずれ も,生成地点をLuとした場合の推定後退速度 $D_{\rm n}/T = 0.10 \, {\rm m/y}$ よりもかなり小さい値を示して いる。次に,中禅寺湖からの流出がすべて地下水 流として華厳滝の後退に影響してきたと仮定する。 湧水による侵食が現在の十二滝と同じ形で作用し てきたと考え,高さ50m,幅100mを用いて後

退速度を計算すると,安山岩の場合は0.0094 0.010 m/y,集塊岩の場合は0.014 0.019 m/yとな る。この値も,生成地点Luから推定した後退速度 の値0.10 m/yよりかなり小さい。これらの計算 結果から,仮に中禅寺湖からの全流出が強度の弱 い集塊岩に対して作用したとしても,生成地点Lu から推定した後退速度 Du/T = 0.10 m/y のような 速い後退をすることは考えにくい。

V.まとめ

華厳滝を対象とした地形学的な研究は,三野 (1958)以降まったくなかった。本研究では,既存 の資料によって華厳溶岩の噴出当時の分布を推定 することで,華厳滝の生成地点を二通り推定した。 また既存の研究から得られた華厳溶岩の噴出年代 とあわせて,平均的な後退速度を算出した結果, 華厳滝は約0.018 m/y または約0.10 m/y という速 度で後退してきたということが推定された。

滝の後退速度に関する経験式を用いてこれらの 後退速度を検証した結果,二通り推定した後退速 度のうち,0.018 m/y という値がより適当である ということがいえた。ただし,華厳滝は地下水の 関与する,やや複雑なメカニズムで侵食を続けて いると考えられるので,今後は侵食のメカニズム についてより詳しく検討する必要がある。

また,滝の生成地点の推定については,その決 定要因についてまだ不確定な点が多い。ただし, 華厳滝の生成地点は華厳溶岩の噴出時の分布から 知ることができるので,安山岩質溶岩の末端が噴 出時にどのような形状をとるのか,などの火山学 的な検討を加えれば,より確かな推定ができるで あろう。

謝辞

栃木県日光土木事務所河川砂防部ダム課の大森寿章氏 には、中禅寺湖から大谷川への流量のデータを提供して いただいた。また、同事務所中禅寺ダム管理所の職員の 方々には、中禅寺ダムからの放流の様子について、有益 なお話を聞かせていただいた。以上の方々に深甚なる謝 意を表する。なお、本稿は早川裕一の2001年度筑波大 学卒業論文の一部をもとに、その後の調査結果を加えて まとめたものである。

- 1) 遷急区間とは,河川の縦断面形における遷急点の集 中している区間のことであり,英語で"knickzone"と して用いられている用語である(たとえば,Wohl, 1993; Downs and Simon, 2001).国内では吉村 (2001, p.6)によりこの用語が提唱されている.なお 「滝」とは,遷急点と同じか,またはそれより小さいス ケールの地形であり,その定義については議論の余地 があるが,一般にはある程度の高さを水流が自由落下 もしくは急速に落下する河床の一部分をいう.
- 2)「滝肩」(crest)は滝の上端,すなわち遷急点を指し,
 「滝面」(face)は水が落下している岩壁面を指す.
- 3)国土地理院発行、1:25,000地形図をコンピュータに 画像として取り込み、地図用ソフトウェアを用いて計 測した。
- 4)その5つの成因別に分類された滝の種類は以下のと おりである.(1)人工的に整備されていた滝が近年の 荒廃後に後退を開始した滝.(2)本流の速い下刻によ り取り残された支流の出口に生成した滝.(3)川廻し (江戸時代~昭和初期にかけての人工的な曲流切断)に より生成した滝.(4)埋没した海食崖の肩が河川の下 刻により洗い出されたことによる滝.(5)隆起した旧 海食崖にかかる滝.Hayakawa and Matsukura (2003)は,これらの成因タイプ別に滝の生成地点およ び生成年代をそれぞれ推定し,生成してから現在まで の平均の後退速度を求めた.
- 5) 三野(1958)の言う「渦流」とは,華厳滝の縦断面 図に描かれた様子から考えると,落水が滝壷の水と衝 突後,霧散して舞い上がる「飛沫」のことを言うらしい. Gilbert(1907)によるナイアガラ滝の縦断面にもこれ と同様な「飛沫」の渦が描かれており,当時としては 滝における一般的な侵食作用のひとつと認識されてい たのかもしれない.しかし,凍結融解が繰り返される 環境でない限り,飛沫が直接岩石を物理的に破壊する ということは考えにくい.台風通過直後の華厳滝の観 察(口絵3 写真3)からも,実際には飛沫の渦流では なく,滝壷に溜まった水の内部での渦流や,滝壷の表面 に生じる波が,滝面の下部の侵食に強く影響している ものと思われる.
- 6)栃木県日光土木事務所・日本工営株式会社(2001) によれば、上部安山岩の内部には多くの亀裂が潜在し、 その特徴は以下のとおりである.亀裂には大きく分け て二種類あり、ひとつは開口していない亀裂であり、規

則的な方向性をもつものである.もうひとつは方向が 一定でない,酸化して褐色を帯びている開口した亀裂 である.前者は華厳溶岩が噴出・固結した際の初生的な 地質構造を反映しているものと考えられる.一方後者 は,空気や水が浸透することにより酸化しているもの と考えられ,その亀裂は華厳滝下流側の崖面に対して 流れ盤となる方向に卓越して発達している.過去の何 度かの崩壊は,すべて上部安山岩の上部における流れ 盤の部分で発生している.

文 献

- 阿久津 純(1979)日光の自然.日光市史編纂委員会 編:日光市史(上巻).日光市,229.
- Bell, F.G. (1992) *Engineering Properties of Soils and Rocks, Third Edition.* Butterworth Heinemann, Oxford.
- 地学団体研究会地学事典編集委員会編(1981)地学事 典 増補改訂版.地学団体研究会,平凡社.
- Downs, P.W. and Simon, A. (2001) Fluvial geomorphological analysis of the recruitment of large woody debris in the Yalobusha River network, Central Mississippi, USA. *Geomorphology*, 37, 65 91.
- Gilbert, G.K. (1907). Rate of recession of Niagara Falls. USGS Bull., **306**, p.31.
- Hayakawa, Y. and Matsukura, Y. (2003). Recession rates of waterfalls in Boso Peninsula, Japan and a predictive equation. *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**, 675–684.
- Heimsath, A.M., Chappel, J., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K. and Finkel, R.C. (2001) Late Quaternary erosion in southeastern Australia: A field example using cosmogenic nuclides. *Quaternary International*, 83 85, 169 185.
- Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) Rock Slope Engineering Revised third edition. The Institution of Minig and Metallurgy.
- 三野(石川)与吉(1958)日光,華厳滝について.藤本 治義教授還暦論文集,国際文献出版,344363.
- Niemann, J.D., Gasparini, N.M., Tucker, G.E. and Bras, R.L. (2001) A quantitative evaluation of Playfair's Law and its use in testing long-term stream erosion models. *Earth Surface Processes* and Landforms, 26, 1317–1332.
- 日光の動植物編集委員会編(1986)日光の動植物.栃 の葉書房.
- Philbrick, S.S. (1970) Horizontal configuration and the rate of erosion of Niagara Falls. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 3723-3732.
- Philbrick, S.S. (1974) What future for Niagara Falls? *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **85**, 91–98.
- Righter, K. (1997) High bedrock incision rates in the Atenguillo River Valley, Jalisco, Western Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*,

22, 337 343.

- 佐々木 実(1993)男体火山の活動史.文部省科学研 究費自然災害特別研究,計画研究「火山災害の規模と 特性」報告書,5358.
- 佐々木 実(1994)、日光火山群の岩石学 . 月刊地球, 16,221 230.
- Seidl, M.A., Finkel, R.C., Caffee, M.W., Hudson, G.B. and Dietrich, W.E. (1997) Cosmogenic isotope analyses applied to river longitudinal profile evolution: Problems and interpretations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 195 209.
- 鈴木毅彦・奥野 充・早川由紀夫(1994) テフラからみ た日光火山群の噴火史.月刊地球,16,215 220.
- Tinkler, K.J., Pengelly J.W., Parkins, W.G. and Asselin, G. (1994). Postglacial recession of Niagara Falls in relation to the Great Lakes. *Quaternary Res.*, **42**, 20 29.
- 栃木県(1957)大谷川總合開發事業 解説及び計算書. 栃木県.

- 栃木県日光土木事務所・日本工営株式会社(2001)平成 12年度調査業務委託(国庫補助火山砂防費)報告書.
- von Engeln, O.D. (1940) A particular case of knickpunkte. Ann. Amer. Geogr., 30, 268 271; 281 284.
- Wohl, E.E. (1993) Bedrock channel incision along Piccaninny Creek, Australia. J. Geol., 101, 749 761.
- 山口梅太郎・西松裕一(1977)岩石力学入門第2版. 東京大学出版会.
- 吉村光敏(2001)「滝の地学」または「観瀑術入門」 房総の滝を例にして.自家出版.
- Zaprowski, B.J., Evenson, E.B., Pazzaglia, F.J. and Epstein, J.B. (2001) Knickzone propagation in the Black Hills and northern High Plains: A different perspective on the late Cenozoic exhumation of the Laramide Rocky Mountains. *Geology*, **29**, 547 550.

(2002年5月8日受付,2003年6月23日受理)