

雨水地中貯留による水力発電増強の提案

羽田野袈裟義・永野博之（社会建設工学専攻）川崎秀明（環境共生工学専攻）

細川土佐男（九州産業大学）中島俊之（(株)大広エンジニアリング）

A PROPOSAL FOR ENHANCEMENT OF HYDRO POWER POTENTIAL BY UTILYZING THE STORAGE OF RAIN WATER IN UNSATURATED SOIL

Kesayoshi HADANO, Hiroyuki NAGANO (Civil and Environmental Engineering)

Hideaki KAWASAKI (Environmental Science and Engineering)

Tosao HOSOKAWA (Kyushu Sangyo University)

Toshiyuki NAKAJIMA (Daiko Engineering Co.Ltd)

In this paper, a technique to enhance the hydropower potential by increasing the base flow of the rivers along which hydro power station(s) is/are constructed is proposed. First, the real situation at present time of the energy gain by hydropower stations is examined using the data of annual report and the possibility or actuality of enhancement of hydropower is discussed. It has been shown that the total capacity of the existing hydro power facilities in Japan is about 47 million kW while the actually generated is only about 10 million kW in average, which implies the necessity to increase the base flow of the river. Then, the technique to increase the base flow utilizing the seepage of rain water into the soil before flowing into the rivers is discussed. The key point of this technique is the upward seepage in unsaturated soil without losing the permeability. The preferable sites are discussed from the viewpoint of the stability of the ground. Finally, a rough estimate is given for the increase of the base river flow.

Key Words : *Hydro power ,base flow increment, unsaturated soil, upward seepage*

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方の大地震と津波による福島第一原子力発電所の事故は、日本のエネルギー供給を逼迫させ、またエネルギー政策の抜本的転換を迫っている。

被災した原子力炉は10カ月以上たった今でも予断を許さない状況にあり、また周辺地域の土地利用が長期にわたり大きな制約を受け、被災した原発周辺地域の住民は長年住み慣れた場を追われ、生計と生活の両面で厳しい状態に置かれている。この状況において、原子力発電所の運転再開を求める声があるが、国民の世論の大半は多少の我慢をしても安全を求める方に傾いている。また、原発には使用済み燃料の保管の問題の他に、技術そのものの不完全さと共に原子力政策や行政・事業実施における安全対策に対する厳しい指摘がある^{1),2),3)}ことも事実である。さらに、ヨーロッパの金融不安の波及が懸念される中で、多額の国債を抱える上に東日本大震災復興財源、高齢化社会の進行に伴う社会保障費の増加が目に見えており、日本の財政事情は大変厳しいものがある。

この状況において、コンパクト・低コスト、即実行可能で安全かつ効果的で、将来に禍根を残さないエネルギー源の確保が切望されている。エネルギー供給に実績がある水力発電に関していえば、大規模なダムや発電所の新規建設は環境保全の面から実現性が低く、既存の施設の効率的な活用が求められる。また、地表に降った雨水の大半は有効利用されずに洪水として海に流出する。

本研究では、エネルギー需給に関する資料を分析するとともに、前報⁴⁾に引き続いて雨水の一部をいったん地中に貯留し、これを浸透流として河川に戻すことにより、河川の基底流量を底上げし、以って水力発電の増強を図る技術を提案する。そして、地盤安定および利水の観点から適地を提示するとともに、今後の実施に向けて検討すべき事項について述べる。

2. 電力事業と水力エネルギーの位置づけ

ここで電力の事情について、文献⁵⁾の記述を引用し、若干これを補足しつつ述べる。

表-1 発電源別総発電量(電力事業+自家用)⁵⁾

(単位: 百万kWh)

	1970	1980	1990	2000	2007	2008
水力	80,090	92,092	95,835	96,817	84,234	83,504
火力	274,782	401,967	557,423	669,177	841,289	798,930
原子力	4,581	82,591	202,272	322,050	263,832	258,128
地熱	85	871	1,741	3,348	3,044	2,750
風力	—	—	—	109	2,614	2,942
総計	359,538	577,521	857,271	1,091,501	1,195,013	1,146,254

表-2 発電源別総発電量 (年間平均)

(単位: 百万kW)

	1970	1980	1990	2000	2007	2008
水力	9.1	10.5	10.9	11.1	9.6	9.5
火力	31.4	45.9	63.6	76.4	96.0	91.2
原子力	0.5	9.4	23.1	36.8	30.1	29.5
地熱	0.0	0.1	0.2	0.4	0.3	0.3
風力	—	—	—	0.0	0.3	0.3
総計	41.0	65.9	97.9	124.6	136.4	130.9

(表-1より単位時間平均値を算出)

表-3 発電源別総発電量シェア⁵⁾

(単位: %)

	1970	1980	1990	2000	2007	2008
水力	22.3	15.9	11.2	8.9	7.0	7.3
火力	76.4	69.6	65.0	61.3	70.4	69.7
原子力	1.3	14.3	23.6	29.5	22.1	22.5
地熱	0.02	0.15	0.20	0.31	0.25	0.24
風力	—	—	—	0.01	0.22	0.26

表-4 発電源別発電設備容量⁵⁾

(単位: 百万kW)

	1970	1980	1990	2000	2007	2008
水力	20.0	29.8	37.8	46.3	47.6	47.9
火力	46.9	98.1	125.0	166.6	176.4	179.3
原子力	1.3	15.7	31.6	45.2	49.5	47.9
地熱	—	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5
風力	—	—	—	0.1	1.5	1.8
総計	68.3	143.7	194.7	258.8	275.6	277.5

電力は、産業活動や日常生活を支える不可欠なエネルギーである。そして、離島を含む国内すべての地域に安定して電力を供給するため、戦後は地域ごとに設立された電力各社が、管轄地域内の電力の安定供給を義務付けられる一方で、電気事業の地域独占を認められてきた。電力はその殆どを貯蔵することができず、このため電力会社は夏の電力需要ピークにも対応可能な安定供給のための発電設備を保持している。したがって発電設備は余力を持たざるを得ず、電気事業は高コスト体質となる。一方、日本は特に発電用燃料の殆どを輸入に頼るため諸外国に比べて電力料金が割高であるが、電気事業の独占体質が高コスト体質の原因ともなっている。このため、

競争原理を導入して電力料金を引き下げるべきであるとの指摘がなされるようになった。

これを受けて、1995年度から工場等における自家発電電力のうち余剰分を電力会社に販売する卸電力制度が、そして2000年度からは大口需要（特定規模需要）に対する電力小売り自由化された。新規事業者による販売電力量は2008年度で特定規模需要の約2.5%にすぎないが、1994～2007年の間に電力料金は約2割低下しており、競争原理導入による効果がみられる。

次に、発電源別の総発電量をみてみる。表-1および図-1は、会計年度の発電源別総発電量の推移を示す。表-2は表-1の数値を365×24で除して求めた発電源別総発電

力の各年の平均値を示す。表-3および図-2は、表-1および図-1の結果をシェアで示している。そして、表-4および図-3は、発生源別発電設備容量の各年の値を示す。これらのデータは電力事業者以外が事業所内などで消費する電力を自らが発電する自家用電力を含み、1995年度までは1発電所500kW以上、1996年度以降は1000kW以上のものを含んでいる。したがって、一般家庭等での小規模発電は含まれていない。また、1970年度分は沖縄県が除かれている。

それによると、総発電量は1970年度の約3600億kWhから2000年度の約1兆kWhまで増加している。その増加分は火力と原子力の増加で賄われていることが分かる。この間水力は800～900億kWhとほぼ一定値で推移している。また、高度成長期には中東からの安価な石油を用いた石油火力が中心であったが、1970年代の2度にわたる石油危機のため石油依存からの脱脚が図られ、天然ガスや石炭火力への移行や原子力発電の導入、新エネルギーの開発が進められた。原子力発電は年々伸びて1998年度には総発電量の約32%に達したが、近年は相次ぐトラブル、地震の直撃による休止その後の点検などで発電量が落ち込んでいる。

前記のように、自家用及び新規参入による電力はまだまだ少なく、小規模発電が各地で開発されている水力発電は今後伸びる要素が多分にある。また、表-2と表-4から、水力発電の最近年の実績平均約1000万kWは設備容量約4700万kWの高々20%程度であり、既存水力発電施設の発電量の増強が極めて有効であることが明らかである。水力発電では河川の流水を利用するが、雨として陸上に降り注ぐ水は、その大部分が洪水として海にそのまま流出し、有効利用される水は降水全体のごく一部である。そして日本の多くの河川で河状係数が軒並み3ケタの高水準⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を示している。雨水が河川に出てくる前に地中に貯留できれば河川基底流量の大幅な増強が見込まれる。これが本研究の中心課題である。

3. 雨水地中貯留の技術提案

(1) 構成と原理

前述のように、雨として陸上に降り注ぐ水は、その大部分が洪水として海にそのまま流出し、有効利用される水は降水全体のごく一部である。これは、雨水の地中貯留の役割を担うべき不飽和土への浸透が起り難いことが大きく関係している。不飽和土壌の上に雨として降った雨が浸透しようとする、土壌中の空気が雨水の浸透を妨げるのである。具体的には、不飽和土中で上から下へと向かう水とその下方の土壌中の空気（気体）とが土壌の間隙において置き換えられることが必要であるが、

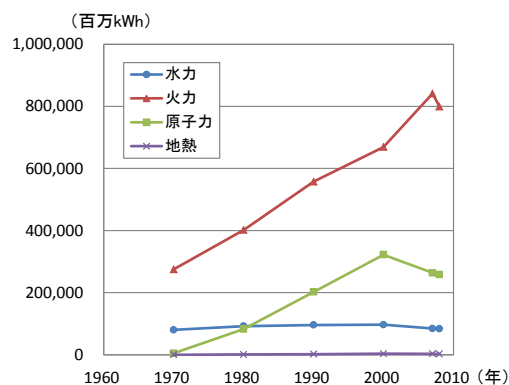


図-1 発電源別総発電量

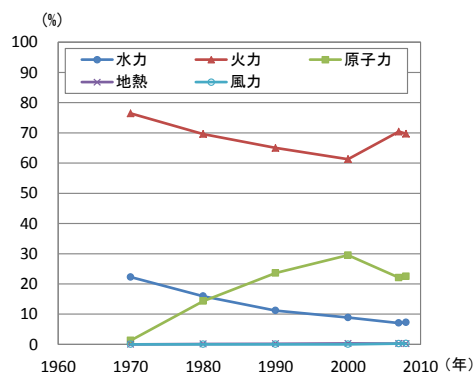


図-2 発電源別総発電量シェア

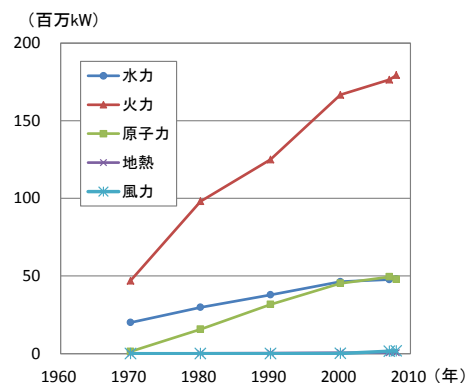


図-3 発電源別総発電設備容量

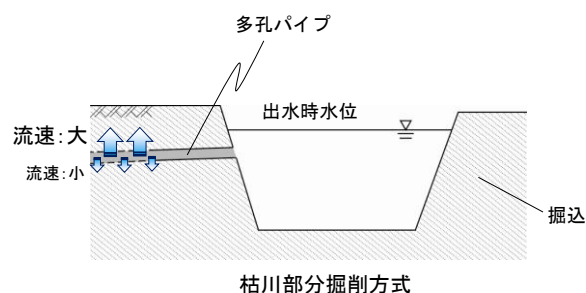


図-4 浸透施設の構成と原理

下向き浸透における半固定状態の土粒子の骨格の間隙ではこの置換えが起り難いのである。

この状況を克服するには不飽和土中の上向き浸透を利

用することが有効である。図-4に示すように、流路の側岸の、平時には水面上にあり出水時に水面下となる位置から有孔パイプを流路側方の地中に埋設し、出水時に流路水位の水頭を利用して不飽和土中に上向き浸透して水を貯留する。図中の流路は降雨時に水みちとなる筋あるいは枯川部分を適宜掘削して形成した例であるが、その他にも種々の形態がありうる。

この方式では、パイプの有孔部より上方の土中間隙に存在する空気は、パイプからその水頭をもって排出された水により心太（ところてん）式に上方へと押され、地表から大気中へと放出される。この場合、下向き浸透とは異なり、目詰まりは起こらず、これとは逆に噴砂に見られるように土粒子間の空隙の膨張により有効透水係数を増加することが期待される。また、この方法は浸透流の動力源であるピエゾ水頭（圧力水頭）の面でもふつうの降雨時の地表面からの浸透に比べて遥かに有利である。ふつうの降雨時の地表面からの浸透の場合、圧力水頭は表面流の水深でふつうの区域で数cm程度、水みち部分で数10cm程度であるが、この方式では1m以上の水頭を容易に与えることができる。このことから水貯留量を大きくとることで有利である。

(2) 実施上の課題と条件

この技術を実施する上で第一の条件は、地盤の安定問題で、実施地点の両側で水を含んだ土壌を支える安定な地盤が存在することである。これにより崩壊や流動を避けることができる。その意味で、地表形状が凸でないことが条件となる。これを満足する地形として、盆地、カルデラなどが挙げられる。カルスト地形のドリネは天然で実質的にこの機能・作用を実現している。また、急勾配から緩勾配へと変化する地点は、土石流・土砂混入流として流動する土砂が堆積を起こすほど安定であり、したがってその近くにより低い土地へと続く傾斜がない限り可能であろう。力学的には、上流からの土砂流を受動土圧でもって受け止め、土砂を堆積させていると解釈できる。このような場所として、谷出口、扇状地の扇頂部、山地・山麓境界などが挙げられる。例えば、河川沿いに存在する平坦な農耕地や休耕地などの緑地内の山との境界近くは地盤安定面の問題が少なく、ここで地中に加圧浸透させると貯留された水は時間をかけて地中を通して河川に流入する仕組みが容易にできる。このような平坦な場所で本川に流入する支川を図-4の流路（掘削部分）とすれば、本川の水位上昇継続時間が長いことを利用して本提案技術の効果を発揮しやすい。

第二の条件は、水力発電の要請から、地中貯留された水が高い位置エネルギーを持っていることである。したがって、標高が高いことが条件となる。

以上より、標高の高い位置にある盆地、谷出口、扇状

地、山地・山麓境界、カルデラ、台地などが適地である。そしてその下流に既存の水力発電所や小水力発電開発予定地があり、小河川や降雨時の水みちで、周囲に原野や休耕地があることが条件となる。

日本地図を参考に適地と思われる盆地等を北から順に独断を交えて比較的広い土地をリストアップすると、名寄盆地、上川盆地、富良野盆地、横手盆地、三本木原台地、北上盆地、山形盆地、米沢盆地、郡山盆地、会津盆地、十日町盆地、六日町盆地、那須野原台地、沼田盆地、長野盆地、上田盆地、松本盆地、甲府盆地、伊那盆地、高山盆地、大野盆地、琵琶湖周辺、上野盆地、亀岡盆地、福知山盆地、篠山盆地、津山盆地、勝山盆地、吉備高原、三次盆地、石見高原、日田盆地、阿蘇カルデラ、人吉盆地、都城盆地などとなる。

発電以外の利水では瀬戸内などの少雨地域の土地で有効である。また、石狩、仙台、関東、濃尾、徳島、筑後など広大な平野に適用すると治水に対して一定の効果が期待される。

(3) 平時流量増大の概略評価方法

本提案の方法による平時の流量増大の評価は詳細な浸透流解析を必要とするが、ここでは概略評価を示す。平時の流量増大 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$ の概略評価は、一連降雨の雨量を $R(\text{mm})$ 、それによる帯水層厚増加 $\Delta H(\text{m})$ 、帯水層の空隙率 λ 、帯水区域 $A(\text{km}^2)$ 、当該地点の流域面積 $A_B(\text{m}^2)$ 、流出継続時間 $T(\text{day})$ に対して、

$$R(\text{mm})/1000 \times A_B(\text{m}^2) > \lambda \Delta H(\text{m}) A(\text{km}^2) \quad (1)$$

の条件で次のように与えられる。

$$\Delta Q(\text{m}^3/\text{s}) = \lambda \Delta H(\text{m}) \times A(10^6 \text{m}^2) / T(24 \times 3600 \text{s})$$

$$= 11.5 \lambda \Delta H(\text{m}) \times A(\text{km}^2) / T(\text{day}) \quad (2)$$

例えば、 $\lambda = 0.4$ 、 $\Delta H = 1(\text{m})$ 、 $A = 1(\text{km}^2)$ 、 $T = 50(\text{日})$ とすると、 $\Delta Q = 0.092(\text{m}^3/\text{s})$ となる。

将来的には現地実験と組み合わせた浸透流解析により流出継続時間 T と流量増加 ΔQ を種々のケースで見積もっておき、その結果を予定地点の見積もりに使うことが有効であろう。

前掲式で $\lambda \Delta H \times A$ として与えられる貯水量は、掘削成形した流路内の水位、有孔パイプの管径、土層厚、土粒子径を考慮した浸透流解析により見積もることが必要である。今後はこの浸透流解析を通して定量評価を行なう。

4. 結語

以上、本研究では効果的な雨水の地中貯留を通して水力発電の増強を図る技術を提案した。まず、雨水の大半は有効利用されることなく海に流出する現状を指摘し、

次に日本の電力事情の概要を調べ、水力発電は合計約4700万kWの設備容量を持ちながら年間平均の発生電力はその約20%の約1000万kWに過ぎないことを確認した。

次いで、不飽和土中の上向き浸透を利用する雨水地中貯留により河川流量を平準化する方法を提案し、その合理性として、透水係数を大きくとることができること、および浸透流の動力源である圧力水頭を地表面流に比べて格段に大きくとることができることを述べた。また、地盤安定の面から、適地の地形として、凹状の地形、具体的に標高の高い盆地、谷出口などを挙げた。そして、平常時流量増加量評価にむけて今後の取組について述べた。

この技術は、発電による収益増加を通して地域の活性化を促す要素を多分に持ち、近年問題になっている中山間地のコミュニティ崩壊の歯止めにある一定の役割を果たすことが期待される。また、瀬戸内地域など渇水で頻繁な節水・取水制限を余儀なくされる地域の水資源確保で有意義と理解している。この他、治水においても一定の効果を発揮すると考える。

最後に、クリーンエネルギーのあるべき姿について一言述べる。2011年の東日本震災を機に新エネルギーとして太陽光発電を拡大して電力を賄おうとする動きがある。これには多くの緑地への設置も視野に入っている。しかしながら、当然の理として緑地は水源涵養や第一次産業の生産現場、あるいは遊水池などとして確保すべきで、このような土地まで透水性の低い基礎を必要とする太陽光発電に利用することは、国土保全上望ましい姿では

ない。また、太陽光発電は、単純計算で単価が高いことに加え、大量の器材の耐用年数経過後の処理、強風時の飛来物やパネルに付着する塵芥の対策が不十分と見られる。したがって、太陽光発電は日陰を作ることにより人々が恩恵を被る場所に特化すべきであろう。

参考文献

- 1) 桜井淳: 新版 原発のどこが危険か, 朝日新聞出版, 2011.
- 2) 福島県原子力安全対策課: 平成21年度版「原子力行政のあらまし」, <http://www.pref.fukushima.jp/nuclear/aramashi/index.html>
- 3) 宝島社編: 放射能と原発「本当の話50」, 宝島7月号, pp.21-41, 2011.
- 4) 羽田野袈裟義, 永野博之, 小金井真, 松崎浩憲, 種浦圭輔: 包蔵水力倍増と夏季省エネの技術提案, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, CD-ROM, II, pp.395-396, 2011.
- 5) (財)矢野恒太郎記念会編: 日本国勢図会2010/2011, pp.130-138, 2010.
- 6) 東三郎, 北村泰一, SUDARMADJI Triyono: 水源地帯の水文学的地域性に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, 第46巻, 第2号, pp.249-270, 1989.
- 7) 高橋裕: 新版 河川工学, 東京大学出版会, p.290, 2008.
- 8) 野満隆治, 瀬野錦蔵: 新河川学, 地人書館, p.101, 1979.
- 9) 西畑勇夫: 河川工学, 技報堂出版, p.240, 1982.

(平成 24年 1月 30日受理)