

必要平準化貯水容量を用いた流出ハイドログラフの解析

京都大学大学院農学研究科 小杉賢一朗

1. はじめに

長野県や淀川流域委員会による「脱ダム（原則としてダムを造らない）宣言」や吉野川可動堰計画への反対運動などに象徴されるように、構造物に頼らない治水を求める運動が各地で展開されている。これらに携わる人々の多くは、林地の土壌（森林土壌）が雨水を一時的にためて降雨後に徐々に流出させるという「森林の洪水緩和機能」に着目している。また、高知県での森林整備を目的とした「水源税」導入に対して多くの県民が賛成を示したように、雨が長期間降らない場合でも河川の水量を維持し続ける「森林の水源涵養機能」にも、大きな期待が寄せられている。このように、森林の「ダム」としての機能（「緑のダム」機能）が大変注目されている一方で、その科学的な解明は十分になされているとはいえない。本研究では、ハイドログラフの新たな解析手法を提示し、「緑のダム」の科学的評価を試みた。

2. 洪水に対する「緑のダム」効果の定量化

図-1aには、風化花崗岩を母材とする森林流域（流域面積0.38 ha, 平均斜度21.7°）の年間ハイドログラフを示した。ハイドログラフから、「ピークが鈍い」とか「逓減が緩やか」といった流域の定性的な特徴は判るが、「森がどのくらい水を蓄えるのか」という問いに直ちに答えることはできない。そこで、流域からの流出 q_{out} を仮想貯水タンクに溜め、 q_{aft} に調節した上で流出させることを考える。洪水緩和を想定し、 q_{aft} が超えてはならない流出強度（ q_c ）を設定する。その上で次のルールでゲート操作を行う。

- (1) $q_{out} > q_c$ なら、過大分の $(q_{out} - q_c)$ をタンクに溜めることで $q_{aft} = q_c$ として流出させる
- (2) $q_{out} < q_c$ でタンク内に水が存在するなら、次の洪水に備えて $(q_c - q_{out})$ だけタンク内の水位を減らし $q_{aft} = q_c$ として流出させる
- (3) $q_{out} < q_c$ でタンク内の水位がゼロなら、そのまま $q_{aft} = q_{out}$ とする

年間のハイドログラフが繰り返されることを想定して以上の操作を行い、得られたタンク内の水位 H の変化より、洪水防止に最低限必要な貯水容量 H_{req} が算定される。

図-1bには q_c を連続的に変化させた場合の H_{req} の変化を示した。 q_c の最低値は、年平均流出強度の 1.96 mm d^{-1} である。 q_c をこれより小さく設定すると、洪水の制御が不可能になってしまう。 q_c を大きく設定するほど H_{req} は小さくて済むようになり、 q_c が年間の最大流出強度（ 40.7 mm d^{-1} ）以上の場合には貯水タンクそのものが不要（ $H_{req} = 0$ ）となる。図-1aには、降雨強度の時系列を併せて示した。森林流域の木を全て伐採し、地表面を全て不透水性のコンクリートで覆って雨水が全くしみ込まないようにした場合のハイドログラフは、降雨強度の時系列で近似できる。この「コンクリート流域」についても、 H_{req} を求めた。コンクリート流域では、年平均流出強度が大きい（ 4.39 mm d^{-1} ）ため、貯水タンクにより制御可能な q_c の最低値が上昇している。また年最大流出強度も大きくなる（ 109 mm d^{-1} ）ため、より大きな q_c に対しても貯水タンクが必要

（ $H_{req} > 0$ ）になっている。そしていずれの q_c に対しても、 H_{req} の値はコンクリート流域で森林流域よりも大きくなっている。そこで図-1cでは、コンクリート流域の H_{req} と森林流域の H_{req} の差（ H_{eff} ）を求めてみた。 H_{eff} は「洪水を緩和するのに必要な貯水タンクの容量のうち、流域が肩代わりする容量」と考えられることから、「 $H_{eff} = \text{緑のダムの容量}$ 」と解釈できる。 H_{eff} は $10 \sim 50 \text{ mm d}^{-1}$ の q_c に対して、 $60 \sim 120 \text{ mm}$ となっている。

図-1の結果は、洪水緩和という目的に関して、森林流域のもつ「緑のダム」の効果が大きいことを示しているが、たとえ森林流域であっても、約 40 mm d^{-1} 以下の q_c に対しては H_{req} が正となることに注意が必要である。このことは、許容洪水流出強度が 40 mm d^{-1} 以下の場合には、「緑のダム」の機能を補完するための人工の「貯水タンク」が必要にな

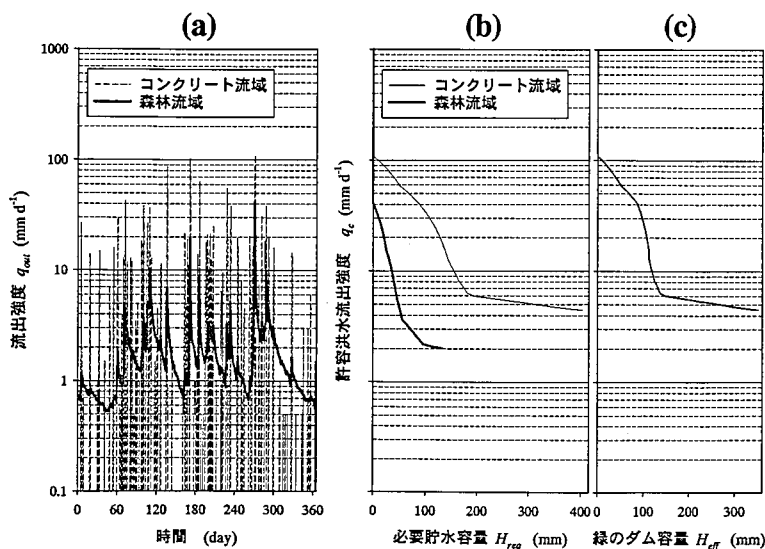


図-1 洪水緩和に関する必要貯水容量と緑のダム容量

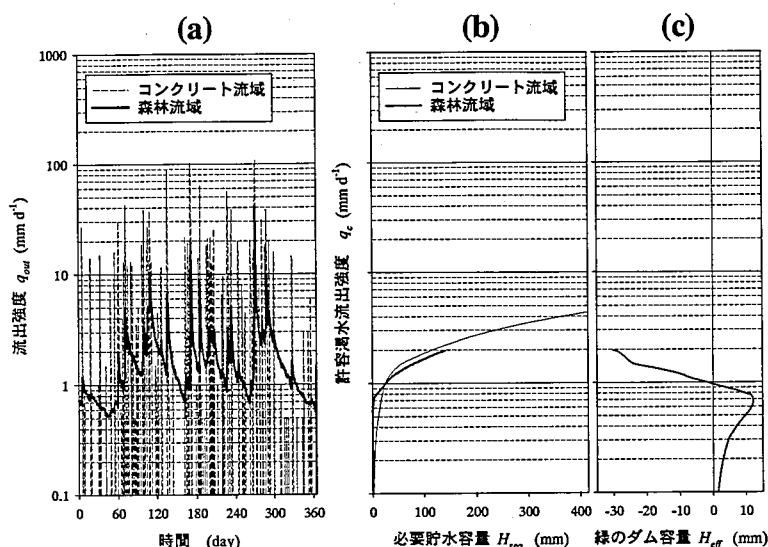


図-2 渇水緩和に関する必要貯水容量と緑のダム容量

(3) $q_{out} > q_c$ でタンクが満水なら、そのまま $q_{aft} = q_{out}$ とする

年間のハイドログラフが繰り返されることを想定した場合に、このような操作を可能とするために最低限必要な貯水容量として H_{req} が算定される。

許容渇水流出強度 q_c を連続的に変化させた場合の必要貯水容量 H_{req} の変化を、図-2b に示した。 q_c の最大値は、年平均流出強度の 1.96 mm d^{-1} である。 q_c をこれより大きく設定した場合には、 H_{req} をどんなに大きくしても許容渇水流出強度を下回る期間が生じてしまう。 q_c を小さく設定するほど H_{req} は小さくて済むようになり、 q_c が年間の最小流出強度 (0.53 mm d^{-1}) 以下の場合には貯水タンクそのものが不要 ($H_{req} = 0$) となる。洪水の解析と同様に、「コンクリート流域」についても H_{req} を求めた (図-2b)。コンクリート流域では、年平均流出強度が大きい (4.39 mm d^{-1}) ため、貯水タンクにより制御可能な q_c の最大値が上昇している。一方、雨が降らない日の流出強度はゼロになるため、 q_c をどんなに小さく設定しても貯水タンクが必要 ($H_{req} > 0$) になる。そして q_c を約 1 mm d^{-1} 以下に設定した場合には、コンクリート流域の H_{req} がより大きく、コンクリート流域が森林流域より大きな貯水タンクを必要とすることがわかる。森林流域では、降雨中に土壤内に蓄えられた雨水が遅れて流出するため、無降雨日にも流出が継続する。この結果、貯水容量が小さくて済む。しかしながら q_c を $1 \sim 2 \text{ mm d}^{-1}$ に設定した場合には、森林流域の方でより大きな貯水タンクが必要になっている。森林流域では、樹木の蒸発散による損失のため、降雨の一部しか河川に流出しない。このため、一回の降雨による貯水タンク内の水位の回復量は、コンクリート流域に比べて小さくなってしまふ。従って、大きな水需要に備えるためには、より多くの水を蓄えておく必要が生じる。さらに森林流域では、蒸発散による損失の結果、 $2 \sim 4.4 \text{ mm d}^{-1}$ の許容渇水流出強度を常に維持することは不可能であるが、コンクリート流域では大きな貯水タンクを設けることで対処できることになる。

図-2c には、コンクリート流域の H_{req} と森林流域の H_{req} の差として求められた「緑のダムの容量」 (H_{eff}) を示した。 H_{eff} は、 0.7 mm d^{-1} 程度の許容渇水流出強度に対して約 12 mm の最大値を持つが、洪水緩和に関する緑のダム容量 (図-1c) に比べてかなり小さな値である。洪水緩和の場合には、森林の「雨水を森林土壤内に一時的に蓄える効果」と「蒸発散により流出量を減らす効果」が共にプラス側に働くのに対し、渇水緩和の場合には、これらがそれぞれプラス、マイナス要因として働くため、「緑のダムの容量」は小さくなる。さらに 1 mm d^{-1} 以上の許容渇水流出強度に対しは、マイナスの効果がプラスの効果よりも大きくなる結果、 H_{eff} は負の値となっている。つまり、「樹木を全て伐採し流域全体をコンクリートで覆った方が有利」ということになる。これはかなり極端な議論で、コンクリート流域は洪水緩和の目的において不利であるし (図-1)、森林は環境に対する他の効用 (気候緩和、保健休養・風致維持、種の保全、 CO_2 固定等) を持つ。ただし渇水緩和に話を絞ると、大きな水需要に対しては「コンクリート流域」がより有利になる。人工構造物の設置・自然の改変を抑え、森林が持つ水源涵養機能に依存した水資源管理を行うためには、節水に心がけ、水需要を極力抑えることが大前提になると考えられる。

ることを意味している。許容洪水流出強度は下流域の状況によって決まるものであり、「下流域の河川堤防が整備された」や「多少の河川の氾濫を許容する社会的合意が得られた」ことなどにより、許容洪水流出強度が 40 mm d^{-1} より大きくなれば、「貯水タンク」は不要になるといえる。

3. 渇水に対する「緑のダム」効果の定量化

洪水緩和の場合と同様に、渇水緩和に関しても、流域からの流出を一端貯水タンクに溜めて調節することを考える。この場合は、「 q_{aft} が下回ってはならない流出強度」として許容渇水流出強度 q_c を設定することになる。ただし洪水緩和の場合とは逆で、 q_c は年間の平均流出強度 q_{ave} よりも小さな値とする。ゲート操作のルールは、以下の通りである。

- (1) $q_{out} < q_c$ なら、不足分の $(q_c - q_{out})$ だけ水位を減らし $q_{aft} = q_c$ として流出させる
- (2) $q_{out} > q_c$ でタンクが未満水なら、次の渇水に備えて $(q_{out} - q_c)$ をタンクに溜め $q_{aft} = q_c$ として流出させる