

ダム貯水池による河川水の流域内滞留時間 の変化に関する検討

ON THE CHANGE OF BASIN SCALE
RIVER WATER RESIDENCE TIME BY DAM RESERVOIRS

馬籠純¹・竹内邦良²・金丸茂男³・石平博⁴

Jun MAGOME, Kuniyoshi TAKEUCHI, Shigeo KANEMARU and Hiroshi ISHIDAIRA

¹学生会員 山梨大学大学院 工学研究科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³学生会員 山梨大学大学院 工学研究科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

⁴正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

The purpose of this study is to understand the potential impact of reservoir induced water storage on the basin scale water cycle. In this study, the increase of the basin scale residence time of river water is used as the index of the effect of reservoir on water cycle, and its spatial and temporal distribution in Japan are demonstrated. The results of analysis show that the potential increase of residence time by dam reservoirs in Japan has gradually increased from 1960's and reached to 14.5 days in 1995. The actual residence time increase is also estimated in the Tone river basin where operation and seasonal variation of river discharge are taken into account. It is shown that the estimated actual residence time is much smaller than the potential, in the case of the Tone river basin, 45%.

Key Words : Residence time, Dam reservoir, Water storage in reservoirs, Runoff

1. はじめに

1998年現在、世界では堤高が15m以上のものだけで、41 413個以上ものダム貯水池があると報告されている¹⁾。全世界の1年間に利用可能な河川水は約12 500 km³とされている²⁾が、これらダム貯水池の合計貯水容量は、その約半分に当たる6000 km³を超え、また、満水時湛水面積の合計は、フランスの国土面積に相当する約50万km²である³⁾。これらダム貯水池により開発された水資源は、河川、湖沼、地下水などと共に、都市、農業、工業用水の水源として用いられている。また、ダム貯水池は、洪水調節機能、水力発電による電力供給源、さらには観光、レクリエーションなど様々な便益を社会にもたらしている。

一方で、ダム貯水池は河川水を滞留させるため、水循環過程への影響も少なくない。河川水の滞留は、貯水池内における土砂堆積、富栄養化を引き起こすだけでなく、その上流域に排水不良、土砂堆積、下流域に河道水不足、

河床低下、さらに水生生物の移動、生息阻害などの影響を及ぼす。このようにダム貯水池は、水を滞留させることにより、流水や土砂、栄養塩等の物質輸送過程を通じ、河川の化学、生物環境にも様々な影響を及ぼす。したがって、ダム貯水池の機能維持および適切な河川管理を行うためには、ダム貯水池による流域地表水の滞留時間を定量的に把握し、水循環へ与える影響を明らかにすることが必要である。

ダム貯水池による水の滞留に伴う影響に関しては、これまでも多くの検討がなされてきている。例えば、安藝、白砂ら⁴⁾は、日本国内の貯水池内における水の交換率と水温、密度構造との関係について検討し、貯水池による滞留の影響を評価している。また、Vorosmarty et al⁵⁾は貯水池がその流域へ及ぼす影響に関して、0.5°メッシュの全球河道網と貯水容量0.5km³以上の大ダムの貯水容量から、ダム貯水池による河川水の滞留時間の分布をグローバルスケールで検討し、大河川の河口部において3ヶ月を超えるような流出遅れがあることを示している。しかしながら、滞留時間増加の流域内分布、地域

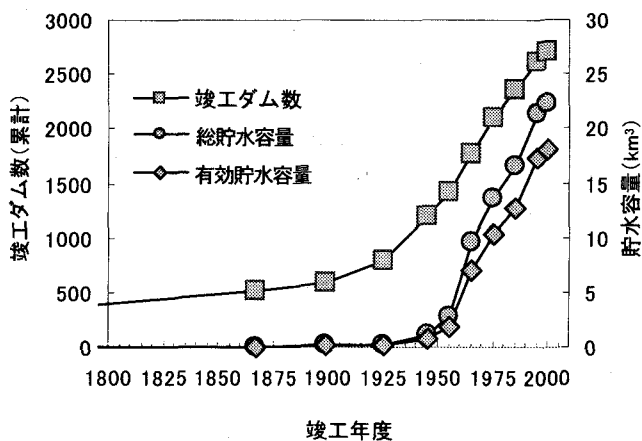


図-1 日本のダム貯水池建設の推移

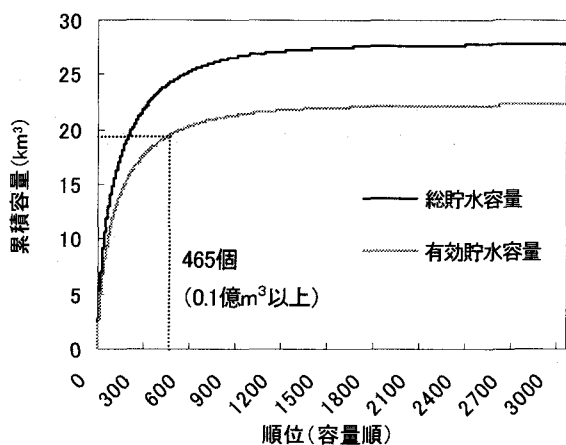


図-2 日本のダム貯水池の累加貯水容量曲線

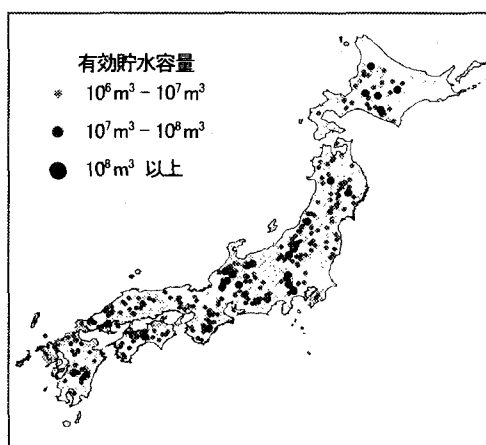


図-3 日本のダム貯水池の分布 (1995現在)

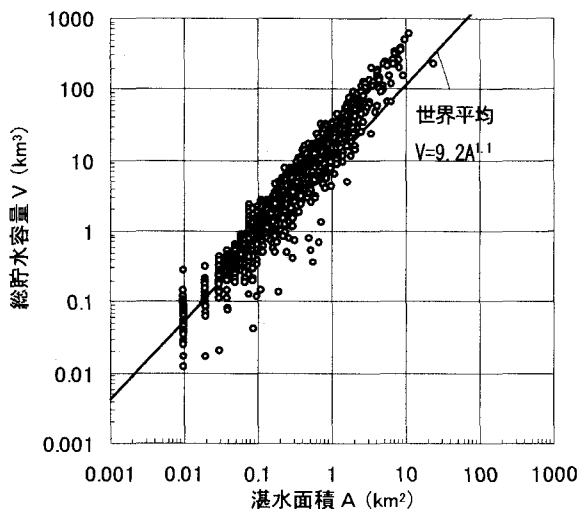


図-4 日本のダム貯水池の湛水面積-貯水容量関係

分布、季節変化等、各地域での滞留時間に関する詳細は、まだ十分に検討されていない。

そこで、本研究では河川水の滞留時間の増加（3節参照）を指標として、ダム貯水池の建設が水の滞留を通じて水循環へ与える影響の評価を試みる。すなわち、日本国内のダム貯水池を対象として、ダム貯水池における平均滞留時間、および流域、地域毎の平均滞留時間の変化について検討するとともに、流域内における上流から下流までの貯水池による滞留時間の分布について検討・考察する。

2. 日本におけるダム貯水池の建設状況

(1) ダム貯水池建設の推移

図-1は、ダム年鑑（2001年度版）⁶⁾をもとに、日本国内の堤高が15m以上のダム貯水池について、建設数とその累計貯水容量の変化を示したものである。なお、種々の統計データでは一般的に高さ15m以上の水資源施設をダムとして集計しており、これ以降、ダム貯水池とは以

上の定義に従うものとする。図-1より、竣工ダム数は、1945年から2000年にかけて1199個から2704個と増加し、この55年間で現在の56%が建設されている。総貯水容量については、この期間で現在の95%を創出している。また増加率は、ダム数、貯水容量ともに1955年以降で小さくなっている。特に貯水容量の増加率が大きいことから、この期間に比較的大規模なダム貯水池が建設されたことが分かる。

(2) ダム貯水池の累加貯水容量

図-2は、国土数値情報ダムファイル（W01-07P）のデータをもとに、貯水容量が記載されている3070個のダム貯水池の貯水容量を、今後の計画分も含め、大きいものから容量順に累加したものである。有効貯水容量でみた場合、（3070個の約1/6に相当する）0.1億 m^3 以上の465個のダム貯水池で、日本全体の87%の容量を占めていることがわかる。

(3) ダム貯水池の分布

ダムファイル（W01-07P）より得られるダム位置（緯

経度)と貯水容量をもとに、1995年における総貯水容量100万 m^3 以上のダム貯水池の分布を図-3に示す。ダム貯水池は全国に建設されており、容量の大きなものは山地部に多くみられ、特に北陸および群馬・新潟・福島の間境付近に大規模なものが多い。

(4) 湛水面積－貯水容量関係

ダム年鑑(2001年度版)⁶⁾記載の湛水面積と総貯水容量およびダムファイルのデータをもとに、計1553個のダム貯水池の湛水面積(A)－貯水容量(V)関係を図-4に示す。比較のために、世界各国7936個のダム貯水池における常時満水位時のA、Vより求めた、世界の平均的なA-V関係(竹内⁷⁾)も合わせて示した。これより、日本のダム貯水池は世界の平均的なダム貯水池と比べて、同じ湛水面積に対してより大きな貯水容量をもっており、湛水面積、貯水容量の比でみると、急峻な山岳地に効率的な良いダム貯水池が多く建設されていることが分かる。

3. 滞留時間の定義

滞留時間の増加は、ダム貯水池による水、栄養塩、土砂などの物質輸送過程の変化を通じて、河川の化学、生物環境へ大きな影響を及ぼすと考えられている。この滞留時間は、水がある領域に流入してから流出するのに要する時間であり、貯水容量/流入量で定義される。しかし、この定義は押し出し形態の流出を仮定した場合であり、流入・流出、混合、通過経路によって、水の滞留時間は異なる。

本研究では、平均滞留時間を指標として、ダム貯水池、ダム貯水池の存在する流域、地域の平均滞留時間、および流域内における滞留時間の分布を以下のように求め、検討を行う。

a) ダム貯水池における平均滞留時間

$$T_R = \frac{V_R}{Q_i} \quad (1)$$

ここで、 T_R はダム貯水池での平均滞留時間、 V_R は対象ダム貯水池の有効貯水容量、 Q_i は対象ダム貯水池への平均流入量である。

b) 流域および地域毎の平均滞留時間

$$T_{ave.} = \sum V_R / Q_o \quad (2)$$

$T_{ave.}$ はダム貯水池を含む対象領域(流域、もしくは地域)の平均的な滞留時間、 V_R は対象領域内に位置するダム貯水池の有効貯水容量、 Q_o は対象領域出口の流量である。

c) 流域内における滞留時間の分布

流域内における滞留時間の分布の検討では、Vorosmarty et al⁵⁾の定義を用いる。まず、対象とする

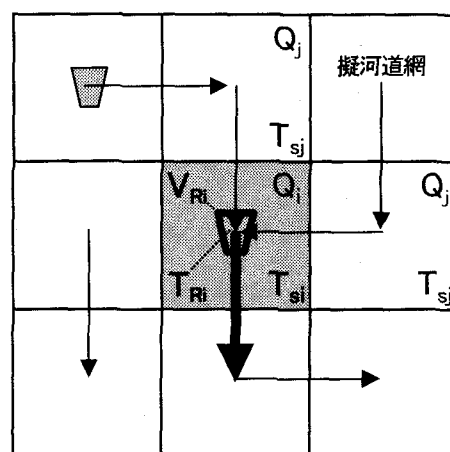


図-5 滞留時間の定義 (Vorosmarty et al⁵⁾)

流域内をメッシュ分割し、これらのメッシュを落水線理論により作成される擬河道網で接続する。次に、各メッシュにおいて、ダム貯水池の有効貯水容量 V_{Ri} による滞留時間増加分 T_{Ri} を求め、これに上流のダム貯水池による滞留時間を加えた合計の滞留時間を河川水の滞留時間 T_{si} として、以下の式で求める(図-5)。

$$T_{Ri} = \frac{V_{Ri}}{Q_i} \quad (1')$$

$$T_{si} = \frac{\sum T_{sj} \cdot Q_j}{Q_i} + T_{Ri} \quad (3)$$

式(1')の V_{Ri} はメッシュiのダム有効貯水容量、 Q_i はメッシュiでの流量である。式(3)の T_{sj} および Q_j は、メッシュiに流入するメッシュでの河川水滞留時間と流量である。

4. 滞留時間の計算と考察

(1) ダム有効貯水容量と流量

滞留時間を求めるにあたり、次のデータを使用した。

ダム貯水池の有効貯水容量Vについては、ダム年鑑および国土数値情報ダムファイルから取得した。また、ダム位置はダムファイルの値を用いた。

流量Qについては、降水量(mm/年)から蒸発散量(mm/年)を差し引き、対象地域の面積(km^2)を乗じて求めたものを用いた。ここで、降水量は気象庁観測平年値より約1kmのメッシュ統計値を使用した。また、日本のような湿潤な地域ではThornthwaite法が流域全体の実蒸発散量と良く一致することが野上⁸⁾によって指摘されており、積雪地域においても風間⁹⁾によってその妥当性が確認されている。そこで、本研究では気温のメッシュ統計値から、Thornthwaite法により蒸発散量を推定した。

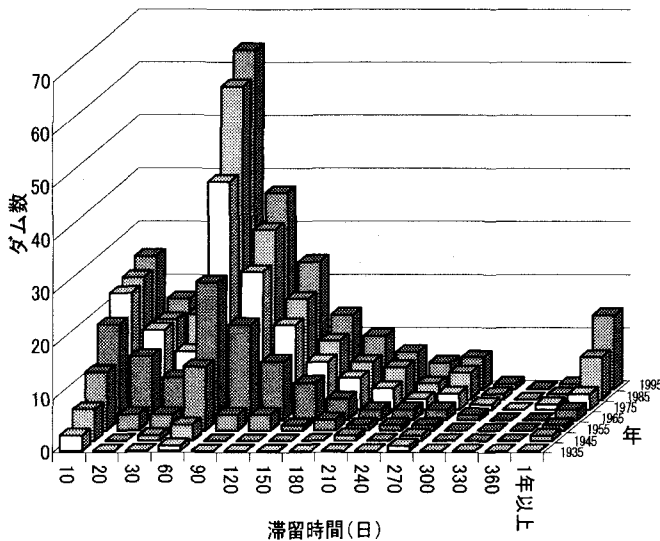


図-6 ダム貯水池における平均滞留時間の分布

(2) 滞留時間の計算

a) ダム貯水池における平均滞留時間

本研究では、一級河川109水系における、国土交通省監修の流量年表に記載されている最下流流量観測地点の上流域に位置し、1995年以前に建設された合計241個のダム貯水池を対象とした。なお、この241個の総有効貯水容量は、1995年時点での日本全体の約70%である。また、ダム貯水池への流入量 Q_i は、前述の方法でメッシュ統計値より求めた最下流流量観測地点の流量から、その流域面積と各ダム貯水池の流域面積の比によって算出し、式(1)によりダム貯水池の滞留時間を求めた。

図-6は、得られた滞留時間を、1935年時点から1995年までの年代別のヒストグラムで表したものである。まず、各年代とも滞留時間は幅広く分布している。また、極端に長いものや短いものも存在することがわかる。これは流入量に対し、極端に有効貯水容量の大きな、もしくは小さなダム貯水池があることに対応しており、各貯水池の利用目的に大きく影響していると考えられる。また1955年以降で増大しており、近年は、滞留時間の長いダム貯水池が増えている傾向が伺える。このことは、この期間に大規模な貯水容量を持つダム貯水池が建設されたこと、および、比較的流量が小さな上流域にダム貯水池が建設されたことを示すと考えられる。

b) 流域および地域毎の平均滞留時間

流域および地域毎の平均的な滞留時間は、メッシュ統計値より求めた対象領域出口の流量 Q_o と各ダム貯水池の有効貯水容量 V_p から、式(2)により計算した。

図-7は一級河川の最下流流量観測地点における流域109水系の流域平均滞留時間である。1965年から1995年まで10年間隔で計算したが、ここでは1995年のものを示す。全体的に西日本で短く東日本で長い傾向が見られる。

また、図-8は、日本の各地域における滞留時間の経年変化である。各地域とも増加傾向であり、全国平均は

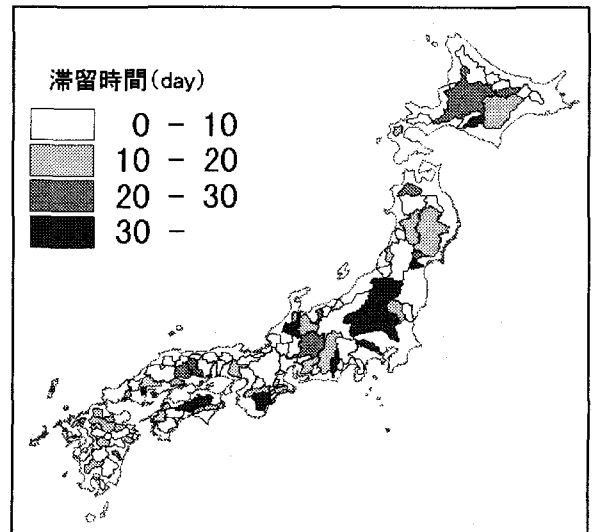


図-7 流域の平均滞留時間 (1995年)

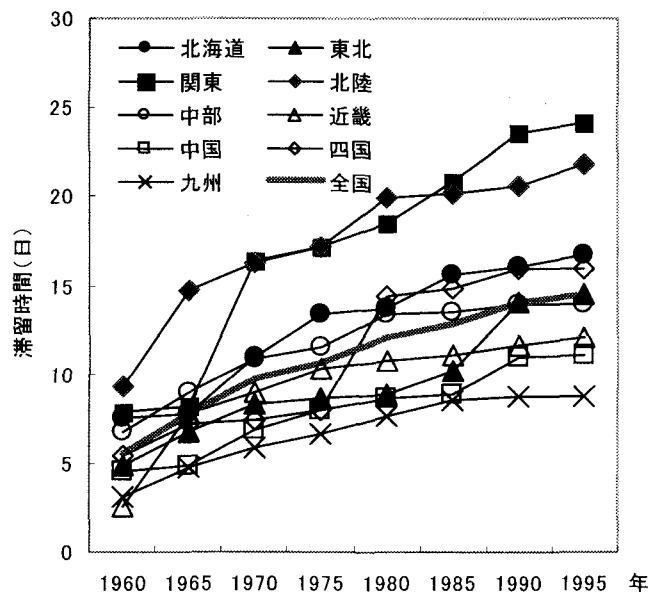


図-8 地域毎の平均滞留時間の変化

1960年から1995年に5.5日から14.5日と約1.6倍に増加している。この日本の平均滞留時間14.5日は、全世界の平均滞留時間約175日（1年間の平均利用可能な河川水を約12500 km³、ダム貯水池の合計貯水容量を約6000 km³とした場合）と比較して、かなり小さいと言える。これは世界的な大ダムに比べ、日本のダムの貯水容量は極めて小規模である³⁾ことを示している。地域別では、図-7にもみられたように、関東、北陸が特に長く、中国、九州で短いことが分かる。また、滞留時間が急激に増加している期間がみられるが、これは大規模ダムの建設時期に対応している。例えば、関東では1965年から70年の5年間で約8日増加しているが、これは、この間に矢木沢ダム（1967年、有効貯水容量1.76億m³）や下久保ダム（1968年、有効貯水容量1.2億m³）の建設により、滞留時間が大きく増加したものと考えられる。

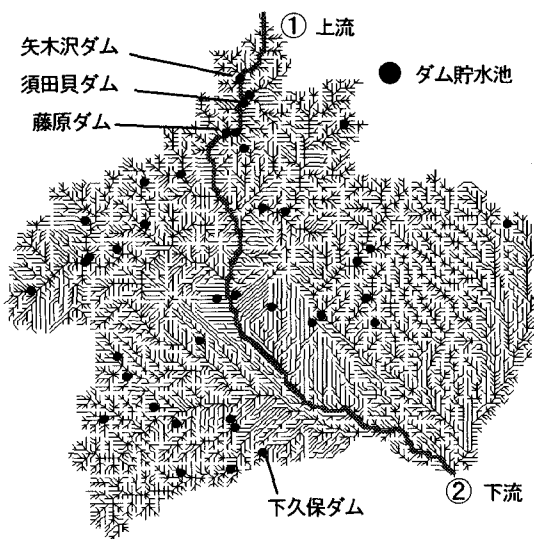


図-9 利根川上流域一擬河道網

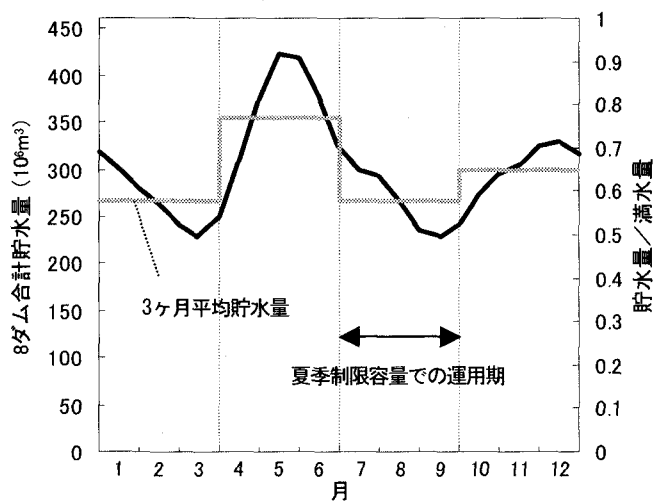


図-10 利根川上流8ダム貯水量変動図 (1992-2000年平均)

(利根川ダム統合管理所 : <http://www.ktr.mlit.go.jp/tonedamu/>より)

c) 流域内における滞留時間の分布

次に、利根川の栗橋流量観測所の上流域（以下、利根川上流域と表記）を対象とし、流域内における滞留時間の分布について検討した結果を示す。対象としたダム貯水池は、合計で39個、その合計有効貯水容量は約6億 m^3 である。

本研究では、約1kmのメッシュサイズで対象領域を分割した。さらに、擬河道網による各メッシュの接続関係を用いて、式(1')により貯水池の滞留時間 T_{Ri} を求めるとともに、式(3)から各メッシュでの滞留時間 T_{si} を計算した。用いたDEMは数値地図1kmメッシュ（標高）であり、敖¹⁰⁾の手法で得られた擬河道網は図-9のとおりである。また、各メッシュの流量 Q_i は、メッシュ統計値の降水量とThorntwaite法により推定した蒸発散量から求めた年平均の流量であり、各ダム貯水池の有効貯水容量 V_{Ri} は、ダムファイルの値を用いた。

図-11の太線（上）は、以上の方法で求めた利根川本川に沿った（最上流からダム群を通り、出口の栗橋流量観測所付近まで：図-9 ①～②）滞留時間 T_{si} の変化を示している。ここで、矢木沢ダム、須田貝ダム、藤原ダムが運用されている上流区間においては、滞留時間は大きく、下流になるにつれて滞留時間は短くなっている。さらに、滞留時間の大きな増加が見られた地点は、上流域の有効貯水容量の大きなダム群の地点に対応している。上流区間の約70km付近までは100日以上であり、その下流は50日未満、最下流では39日となった。また、対象流域内の39個のダム貯水池による滞留時間 T_{Ri} は最小で0.06日、最大で2592日、平均で264日であった。この中で、滞留時間の大きなものは、上流域の本川沿いではなく、流量は小さいが、容量の大きなダム貯水池であり、発電用のものも多くみられた。逆に滞留時間の小さなダム貯水池は、貯水容量に対して流量の大きい比較的下流に位置するものと考えられる。

さらに、同様の手法を大淀川流域、筑後川流域にも適用した。なお、参考までに、タイ・チャオプラヤ流域（総貯水容量約95億 m^3 のSirikitダムを含む）に対しても、同様の検討を行った。その結果、河口部の滞留時間 T_{si} はそれぞれ12日、8日、193日（約6.4ヶ月）、ダム貯水池による滞留時間 T_{Ri} は平均で86日、12日、807日（約2.2年）となった。この結果から次のことが伺える。Vorosmarty et al⁵⁾も指摘しているように、大陸の大流域・大貯水池は流域出口においても数ヶ月スケールの滞留時間をもたらす。これに対して、日本の流域は数日から10数日程度（河口部）であり、滞留時間は比較的短い。この違いは、日本と世界との貯水容量規模の差によると考えられる。

(3) 考察

(2) で求めた滞留時間は、流域での貯留がダム貯水池のみであること、水利用による水の損失および河道外からの還元水は無いこと、さらにダム貯水池の貯水量 V を有効貯水容量（一定値）として求めたものである。また、流量 Q も実測値ではなく、降水量から蒸発散量を差し引いた年平均の流量を用いている。これらの意味で、(2)における滞留時間はダム貯水池による年平均のポテンシャル滞留時間と考えられる。しかし、実際のダム貯水池では、貯水池操作により、図-10のように貯水量が変動する。また、ダム貯水池への流入量も、気温、降水量と同様に季節変動がある。

そこで、より現実的な条件での滞留時間について考察するため、利根川上流域を対象として、(2)で求めた流域内滞留時間の分布と、貯水量の変化および流量の変化を考慮した場合の滞留時間の分布との比較を行った。ここでは、各ダム貯水池の有効貯水容量 V_{Ri} を利根川上流8ダム（矢木沢、奈良俣、藤原、相俣、藺原、草木、下久保、渡良瀬遊水地）における1992年から2000年の平均の

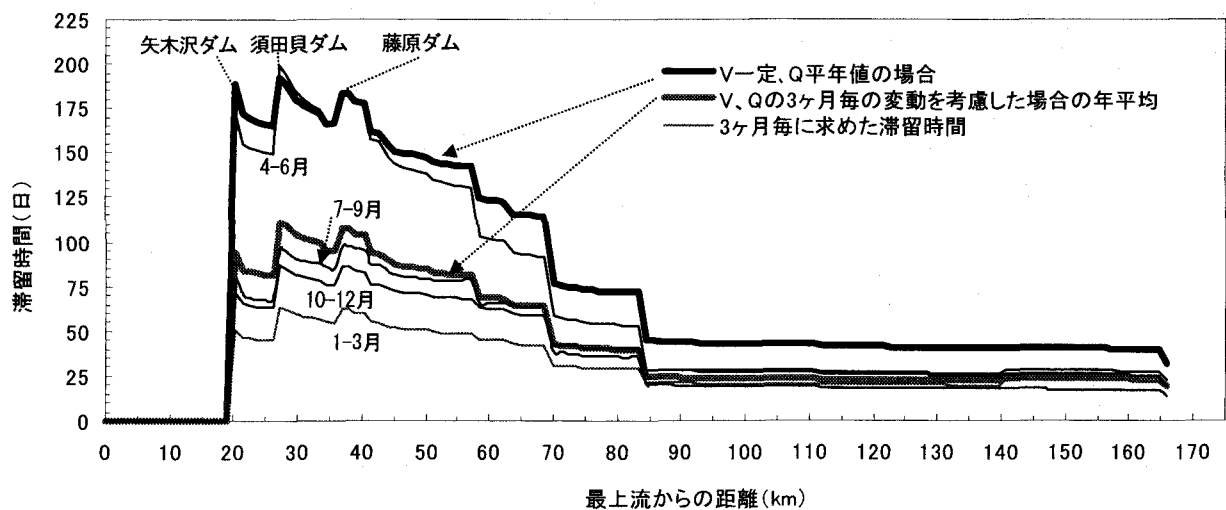


図-11 利根川上流域の滞留時間の分布 (図9 ①～②の区間)

貯水量変動 (図-10) と同じ割合で変動するものと仮定して、3ヶ月間隔で V_{Rt} を変化させた。流量 Q_t は、(2) の c) と同様にメッシュ統計値より、3ヶ月毎の蒸発散量を推定し、降水量から差し引いたものを用いた。

図-11は、以上の方法で求めた河川水の滞留時間 T_{st} の分布である。太線 (下) は3ヶ月毎の計4時期の滞留時間を平均したもので、貯水量 V 、流量 Q の変動を考慮した場合の年平均の滞留時間である。このようにして求めた滞留時間は、太線 (上) の V が一定で Q が平年値のポテンシャル滞留時間と比較して、どの河道区間においても滞留時間は小さな値をとり、平均で約45%と半分以下となった。つまり、現実のダム貯水池による滞留時間は、ポテンシャルの滞留時間に比べてかなり小さいと考えられる。実際、夏季制限容量で V が小さく Q が比較的大きい7-9月期には、滞留時間は短くなると思われる。そこで、細線の7-9月期における滞留時間の計算結果を確認すると、ポテンシャル滞留時間の約40%前後であり、以上の推察と対応している。また、それ以外の期間では、冬季を含む10-12月期、1-3月期の両時期に流量 Q が小さくなり、4-6月期は大きくなるため、滞留時間は前者で比較的大きく、後者で小さいと考えられる。しかし、今回の検討では、上流部で流量 Q が冬季で降雪分のため過大評価、4月の融雪期で過小評価となったため、そのような傾向は見出せなかった。これは、降水量と蒸発散量の差をそのまま流量 Q とすることでは、3ヶ月単位であっても降雪、融雪の影響から正確な水収支は得られないことによると思われる。

5. まとめ

本研究では、ダム貯水池が水循環に及ぼす影響を定量的に示すため、日本におけるダム貯水池の建設状況を把握するとともに、ダム貯水池による滞留時間増加の地域

分布、流域内での滞留時間の変化を求めた。以下に、その結果を示す。

- (1) 日本全国の平均的なポテンシャル滞留時間は近年増加してきており、1995年で約14.5日となった。
- (2) 貯水池操作による貯水量変動と流量の季節変動により、実際の滞留時間はポテンシャル滞留時間よりも小さいと考えられ、利根川上流域では約45%であった。

今後は、貯水池による水の滞留時間の増大に伴う、土砂および栄養塩の物質輸送に対する影響についても検討を行いたい。

参考文献

- 1) ICOLD: World register of Dams 1998, International Commission on Large Dams, Paris., 1998.
- 2) Igor A. Shiklomanov: World water resources: *Modern assessment and outlook for the 21-st century*, World Freshwater Resources (CD-ROM), 1999.
- 3) 竹内邦良: ダム建設の現状と将来, ダム技術, No. 119, 1996.
- 4) 安藝周一, 白砂孝夫: 貯水池汚濁現象の調査と解析, 電力中研技術第二研究所報告, 1974
- 5) Vorosmarty et al: *The Storage and Aging of Continental Runoff in Large Reservoir Systems of the World*, Ambio, Vol.26 No.4, pp. 210-219, 1996.
- 6) 日本ダム協会: ダム年鑑2001, 2001.
- 7) Takeuchi. K.: *On the scale diseconomy of large reservoirs inland occupation*, IAHS Publication, No.240, pp.519-527, 1996.
- 8) 野上道夫: 暖かさの指数と流域蒸発散量-気候値メッシュデータによる解析-, 地理学誌, Vol.99, No. 6, pp. 144-156, 1990.
- 9) 風間聡, 沢本正樹: 積雪のある流域における水収支について, 水工学論文集, 第38巻, pp. 113-118, 1994.
- 10) 敖天其, 竹内邦良, 石平博: 大河川の擬河道網作成における問題点および流出解析への影響, 水工学論文集, 第45巻, pp. 139-144, 2001.

(2001. 10. 1受付)