

福岡市における雑用水利用の利水効果に関する 検討

A STUDY ON THE EFFECT OF TREATED DOMESTIC WASTEWATER REUSE ON WATER UTILITIZATION IN FUKUOKA CITY

三石 真也¹・豊田 忠宏²・天方 匡純³
Shinya MITSUISHI, Tadahiro TOYODA, Masazumi AMAKATA

¹正会員 (独)土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ
(〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 国土技術政策総合研究所 水資源研究室(〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術第一課(〒161-8575東京都新宿区西落合2-18-12)

Recently, in the wake of drought occurrence, the necessity of promoting comprehensive water resources development not only including river water, also groundwater and reuse of treated domestic wastewater has pointed out. Regarding reuse of treated domestic wastewater, as its water resources is relying on rain water and life sewage water, in case of drought, it has lower safety degree of water use due to scarce rainfall and the implementation of water conservation. This study shows the safety of water utility about the reuse of treated domestic wastewater. We have modeled the status of Fukuoka City water project promoting the use of reclaimed wastewater and the rainwater utilization. We numerically evaluate the effects of reuse of treated domestic wastewater and estimated the available amount of it in the future.

Key Words : *reuse of treated domestic wastewater, rainwater utilization, reclaimed wastewater, safety of water utility, drought*

1. はじめに

雨水や下水再生水を活用する雑用水利用は、河川水や地下水とともに陸水の水循環を構成する貴重な水源として位置づけられている¹⁾。その意義は、利水安全度の向上、災害時の緊急用水、渇水時の代替水源のほか、公共用水域の水質改善効果²⁾、洪水被害の低減³⁾、水辺の再生⁴⁾、水生生物の生息場所の確保など多面的である⁵⁾。これらのうち利水面にあっては、近年、渇水の発生を期に、河川水のみならず、地下水、雑用水利用などを含む総合的な水資源開発を推進する必要性が指摘されている⁶⁾。ここに雑用水利用は、水源を雨水や生活雑排水に依存することから、渇水時において降雨の減少や節水の実施に付随する排水量の減少によって利水安全度が低下する短所を有しているが、これらの水資源供給能力について、地域の水需給バランスの観点を踏まえつつ定量的に明らかにした研究は少ない。このため、本研究では、雑用水利用の効用のうち利水面に焦点を当て、雑用水利用を推進している福岡市を対象としてモデル化を行い、雑用水利

用の利水効果について定量的な評価を行うとともに、将来利用可能量の推定を行ったものである。

2. 雑用水利用のモデル化

雑用水利用の利水効果について研究した事例として、和田ら⁷⁾は、雨水利用について、事務所ビルであるパイロット実験施設を対象にシミュレーションを実施し、雨水利用率を算定するとともに、モデル地区における雨水利用効果を算出した。また、和田ら⁸⁾は、雨水利用及び個別循環方式について、モデル流域の下水道整備地域を対象に水資源としての評価を行うとともに、河川区域への汚濁負荷量の削減効果を算定した。江藤ら⁹⁾は、雨水利用施設の利水効果について、汚濁負荷の公共用水域への流入削減効果を表現する式により評価している。ここに、将来を見通した合理的かつ総合的な水資源開発施策の展開、すなわち、ダムや地下水、雑用水利用等を適切に組み合わせた水資源開発計画を策定するためには、計画策定区域を対象とした渇水時における雑用水利用の供

給能力評価と施設数の正確な予測が不可欠である。このため、特定の行政区域全域における雑用水利用施設の導入状況を把握し、将来見通しを正確に推計するとともに、渇水時における各施設における利用量をダム水利計算精度と類似した精度で明らかにする必要がある。本研究においては、雑用水利用のうち、福岡市において、今後も導入が見込まれる雨水利用と閉鎖系循環方式について、現存するデータを活用しつつ、分析を行うこととした。一戸建て住宅における雨水利用については、福岡市における住宅に関するデータを参考にしつつ、モデル化を行うとともに、渇水年、平水年における利用可能量についてシミュレーションを実施した。ビルにおける雨水利用については、一戸建て住宅と同様にモデル化を行い、下水再生利用については、福岡市、国土交通省の統計データを参考にしつつ、ビルの用途別に分類し、渇水時における上水道の節水率も考慮して使用水量を算出した。そして、雑用水利用のこれまでの整備状況から回帰式を算出して、10年後における施設整備数と利用量を推計した。以下に詳細に分析手法を示す。

3. 一戸建てにおける雨水利用

(1) 一戸建て雨水利用のモデル

雨水利用は、間欠的な降雨に頼らざるを得ない面を持つため、渇水時においては、降雨量が減少し、その効果が十分に発揮できないことが危惧されることを踏まえ、本研究では平水年のみならず、渇水年をも対象としたシミュレーションを実施した。雨水貯留施設のモデルは図-1に示すとおりであり、屋根に降った降雨が集水され、

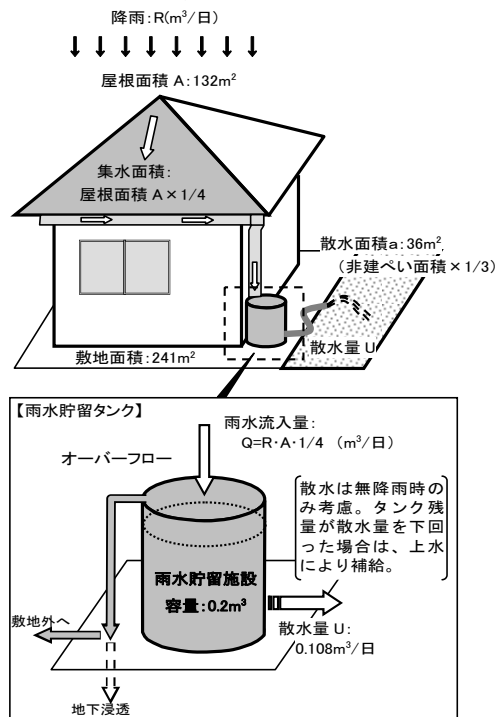


図-1 雨水貯留施設モデル

雨樋から雨水タンクに貯留される。タンク容量を超えた量は、オーバーフローし河川に放流される構造となっている。モデルの各諸元は、図-1に示すとおりであり、屋根面積は、敷地面積、建ぺい率を参考に設定し、これらは福岡市の統計値に基づく値を採用した。

雨水の利用用途としては、福岡市における行政指導を踏まえて、「庭への散水」のみを計上し、散水量は「雨水利用ハンドブック(社)雨水貯留浸透技術協会」¹⁰⁾の値を基に、1日あたり $0.003\text{m}^3/\text{m}^2$ とした。ここでは、降雨時には雨水の貯留を行い、無降雨時のみ雨水利用を行う計算としている。以上によりモデルを設定し、雨水貯留による利水効果の計算を実施した。

(2) 雨水貯留による利水効果の評価

福岡市において平水年であるH21年のほか、過去に渇水が発生したS53、H6、H14年を対象として、1戸あたりの雨水利用の効果について計算した。すなわち、1戸当りの利用水量についてはH20年度で固定し、過去に発生した渇水年、平水年等の降雨が生起したと仮定して、各年の降水量を基に敷地内の降雨量を与え、モデルにより利用可能となる雨水量を算定した。計算結果を表-1に示す。敷地内の降雨の2.3~3.4%に相当する雨水を利用できる結果となった。

渇水年においては、1年間における雨水利用量は、1戸あたり $7.20\text{m}^3/\text{年} \sim 8.87\text{m}^3/\text{年}$ であり、雨水タンクによって、散水量全体の24.3~34.1%が賄える結果となっている。一方、平水年であるH21年では35.3%を占める。ここに渇水年における雨水利用を平水年と比較すると、渇水年は散水量全体に対する雨水タンク利用量の占める率が1~11%低下する結果となっている。この原因としては、水源となる降雨の影響が考えられる。図-2に毎日の降雨量と雨水散水利用状況について、H6年7月とH21年7月を比較したものを示す。なおここでは、7月は高温であることを踏まえ、降雨の分布に係わらず無降雨日には散水を行うこととした。

H21年7月は降雨量が多く、かつ頻繁に降雨が発生しているため、タンクへの雨水貯留が効率よく行われており、雨水利用も15日に及ぶなど高い利用効果が得られている。平成6年7月のような降雨量の少なく、かつ2日し

表-1 シミュレーション計算結果

対象年	敷地内降雨量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	1戸当り 利用水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	総散水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	雨水 散水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	上水 補給量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	雨水散水量 /総散水量 (%)	雨水散水量 /敷地内降雨 量 (%)	雨水散水量 /総利用水量 (%)
昭和53年	274.3	211.1	27.3	8.78	18.5	32.1	3.2	4.2
平成6年	214.7		29.6	7.20	22.4	24.3	3.4	3.4
平成14年	330.5		26.0	8.87	17.2	34.1	2.7	4.2
平成21年	407.8		26.5	9.33	17.1	35.3	2.3	4.4

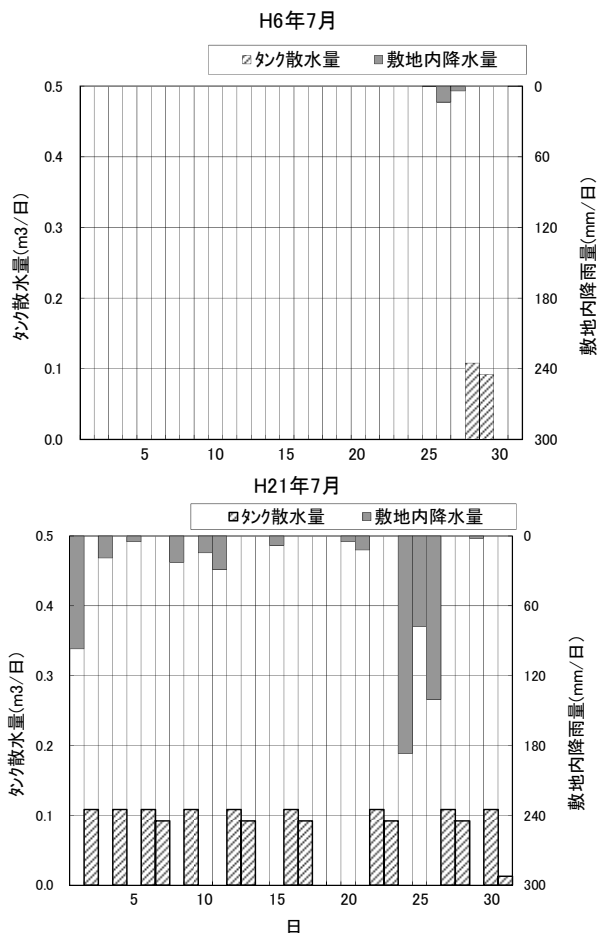


図-2 日降雨量と雨水散水利用状況
(平成6年7月、平成21年7月の比較)

か降雨のない月においては、ほとんど雨水貯留が行えないため、雨水利用が行える日が少なく、利用効果も低迷している。

図-3に月間降雨日数と月間雨水散水量の関係を示す。この図からも、降雨日数が多くなるに従って、雨水利用量が増加することが理解できる。

また、月降雨量が多い場合でも、タンクへの貯留量に制限があるため、降雨が頻繁に発生すれば利用効果が向上するが、降雨が特定の日に集中するとほとんどが無効放流となるため、利用効果が低下すると考えられる。

敷地内降雨量は、平水年である平成21年の方が平成14年に対して77.2m³ (23%) 多いが、タンク散水量としては、0.46m³と5%の増加に留まっている。

このように、雨水貯留による効果は、降雨への依存性が非常に高いものの、一戸当たりの水道総利用水量に対する効果は、3.4%~4.4%と一定の水準を保つ。特に平成21年7月のように降雨に恵まれた時期においては、7.8%を占める。

ここでは、(2)までの各戸における雨水利用量の推計を活用し、福岡市における導入状況から将来の雨水利用量を予測した。これまでの雨水貯留施設の導入家屋は図-4

に示すとおりであり、平成21年現在、695戸に導入されている。これまでの導入実績からその傾向を回帰式にて求め、将来10年程度の限られた期間内での近似的予測を行うにあたり、次式を得た。

$$Y = 131.64 * X \quad (1)$$

ここに、Y：導入家屋数

X：H16 年度を基準とした年数

(1)式から10年後の平成31年における導入家屋数を推計すると1,975戸となる。(2)で求めた雨水散水量に家屋数を乗じて福岡市全体の雨水散水量を求めると表-2のとおりであり、福岡市の水道需要量約145百万m³/年(平成20年度)に対する雨水利用量の割合は、0.01%程度に留まる。これは、福岡市の人口が140万人余りである一方で、導入家屋数が小さいことによるものと考えられ、福岡市全体の水道需要量に対する効果は極めて小さく、ダ

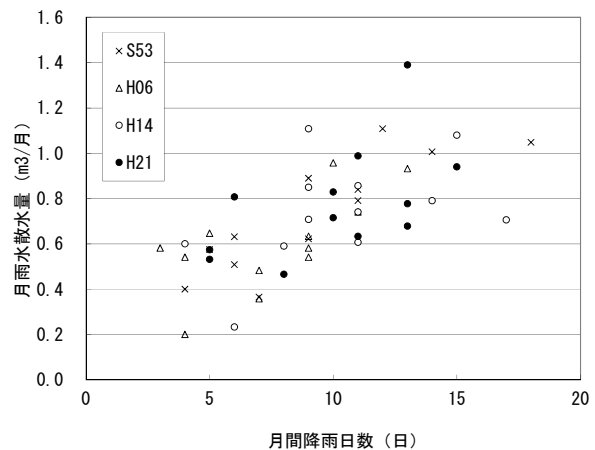


図-3 月間降雨日数と月間雨水散水量

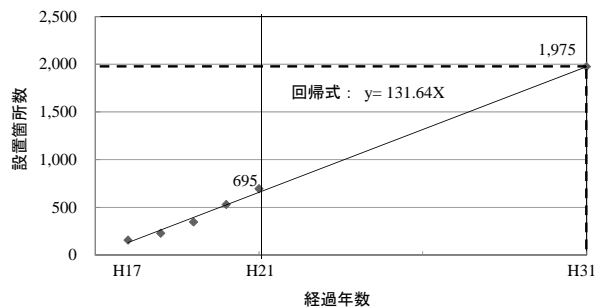


図-4 将来の雨水貯留施設数推定

表-2 将来施設推計による雨水利用率(10年後)

対象年	敷地内降雨量 (m ³ /年)	総散水量 (m ³ /年)	雨水散水量 (m ³ /年)	水道水散水量 (m ³ /年)	雨水散水量 / 総散水量 (%)	雨水散水量 / 敷地降雨量 (%)	雨水利用量 / 上水給水量 (%)
昭和53年	541,660	53,965	17,354	36,611	32.1	3.2	0.012%
平成6年	424,094	58,444	14,211	44,233	24.3	3.4	0.010%
平成14年	652,800	51,405	17,518	33,887	34.1	2.7	0.012%
平成21年	805,350	52,259	18,429	33,830	35.3	2.3	0.013%

ダム等水資源開発施設の代替案とはなり難い。ここに、ダムと同等になるためには、規制の導入により全家屋に雨水タンクを設置させるほどの変化が必要であり、それは非現実的である。

4. ビルにおける雨水利用と下水再生利用

(1) 閉鎖系循環方式の推計方針

閉鎖系循環方式の大部分を占める施設は、ビルにおける雑用水利用であり、詳細には個別循環方式、地区循環方式、広域循環方式に区分される。福岡市においては、平成24年までに地区循環方式を廃止する予定であり、その後も新設の予定はない。このため、本研究では、ビルにおいては、雨水利用のほか下水再生利用として、個別循環方式と広域循環方式について、利用量を推計することとした。

(2) 個別循環方式利用量の推計

a) 平常時の雑用水利用量の推計

国土交通省水資源政策課は、雨水・下水再生水利用の課題及び今後の施策の方向性をとりまとめることを目的として、雑用水利用の普及状況の実態を調査している¹¹⁾。その調査内容は、建物利用用途、延床面積、下水再生水利用量、雨水利用量などである。また、福岡市も同様に調査を実施し、一定の情報を得ている。調査により把握している施設数は、それぞれ205施設、290施設であり、ここでは、福岡市資料が国土交通省資料を包含するものと仮定して取り扱った。

国土交通省資料は、施設内利用量について、162施設についてのみデータを有しており、43施設については、不明としている。ここでは、福岡市全体290施設の利用量を次の手順により分析した。

- 1) ビル別に年単位水量を稼働日数で除して、日単位利用量を算出する。
- 2) 雑用水利用量は、ビルの利用用途により、大きく異なり、使用水量は延床面積に比例するとの仮説を立て、用途別に延床面積、使用水量の回帰式を求め(図-5 参照 但し施設数が3施設以上の用途に限る)使用水量が不明なビルについて推計した。
- 3) 福岡市資料のみが把握している85施設の使用水量については、延床面積が不明であるため、用途別に施設数で補完することとし、用途別の平均床面積を用いて使用水量を算出した。

一例として、図-5にホテルにおける延床面積と雑用水利用量の関係を示す。また、表-3に個別循環方式利用量の推計を示す。

b) 渇水時の雑用水利用量の推計

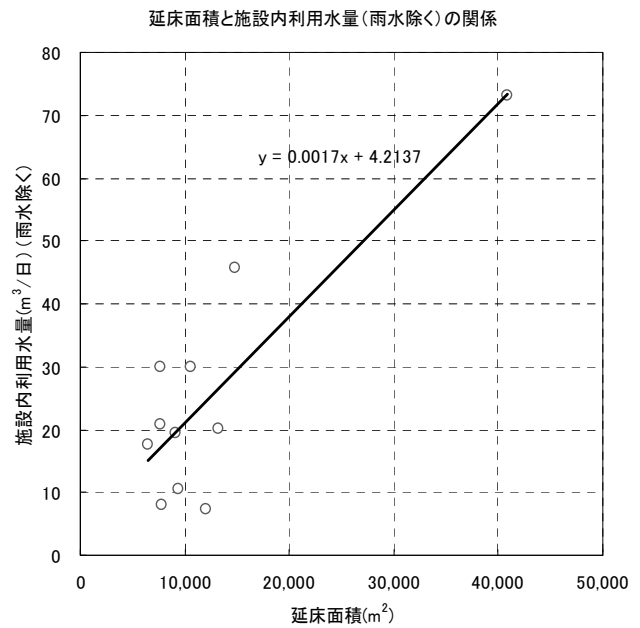


図-5 延べ床面積と雑用水利用の関係
(ホテルにおける例)

表-3 個別循環施設内雑用水利用量

個別循環用途別施設名	施設内 利用水量 C _i (m ³ /年)	標本 施設数 n _i	実態 施設数 f _i	補正率 f _i /n _i	補正後施設内 利用水量 C _{in} (m ³ /年)
事務所ビル	152,979	89	94	1.06	161,573
学校	205,217	54	86	1.59	326,828
医療・福祉機関	239,457	18	21	1.17	279,366
百貨店・スーパー	83,666	8	22	2.75	230,081
ホテル	206,889	14	21	1.50	310,333
体育館	8,481	5	14	2.80	23,747
駅・空港・バスターミナル	138,714	2	5	2.50	346,785
工場	27,625	3	6	2.00	55,250
その他施設	10,334	6	21	3.50	36,169
合計	1,073,362	199※	290	-	1,770,132

※ 205施設のうち6施設については延べ床面積が不明のため補完対象外

渇水時には、給水制限に伴って雑用水の水源である雑排水が減少し、これに伴って雑用水利用量も減少すると考えられる。渇水時における日単位での雑用水利用量は、統計として把握されていないため、ここでは、給水制限がそのまま雑用水利用量に反映すると仮定して、次式により利用量を求めた。

$$Y = (1 - \frac{pD}{365 \times 100}) \times \sum C_i \quad (2)$$

ここに、Y：取水制限を考慮した年間施設内利用水量

p：給水期間内平均給水制限率
D：給水制限日数
Ci：用途別施設内利用水量

a)の結果と(2)式を組み合わせることにより、渇水時における雑用水利用量は表-4のとおりと推計された。昭和53年、平成6年の渇水時においては、平常時の約80～90%の利用水量となるものと推計された。

c)雨水利用量の推計

国土交通省資料¹¹⁾によれば、個別循環方式205施設のうち18施設で雨水利用が行われている。これらを建物用途により事務所ビル、学校、商業施設に区分するとともに、図-1と同様の雨水貯留モデルを作成し、代表する5つの施設について平水年及び渇水年を対象としたシミュレーションを実施した。さらに、延床面積と雨水利用量の相関性が高いことを利用し、建物用途毎に延床面積に基づき残る13施設の雨水利用量を算出した。結果は、表-5に示すとおりであり、56～79千m³/年の利用量と考えられる。

(3) 広域循環方式利用量の推計

福岡市において、広域循環方式を採用している施設は、中部再生水処理施設及び東部再生水処理施設であり、それぞれ4,700m³/日、120m³/日の下水再生水を利用している。これらの水量は、当該施設における下水処理量の1/10以下の水量であるため、渇水時においても水源不足の恐れはないことは自明である。

表-4 渇水時における雑用水利用量

対象年	平常時施設内 利用水量総計 (m ³ /年)	給水制限日数 (日)	給水制限期間内 平均給水制限率 (%)	渇水時の施設内 利用水量総計 (m ³ /年)
昭和53年	1,770,132	197	38.8	1,399,832
平成6年	1,770,132	150	25.3	1,585,757
平成14年	1,770,132	0	0.0	1,770,132

表-5 個別循環施設雨水利用量

施設用途	雨水利用水量			
	渇水年			平水年
	S53年 1,138mm	H6年 891mm	H14年 1,372mm	H20年 1,781mm
学校 (7施設)	11,082	9,727	10,536	10,872
事務所ビル (8施設)	11,986	11,927	13,240	13,038
その他(車庫・車両基地)	55,408	46,511	54,140	55,286
その他(医療・福祉機関)				
その他(百貨店・スーパー)				
18施設合計	78,476	56,238	77,916	79,196

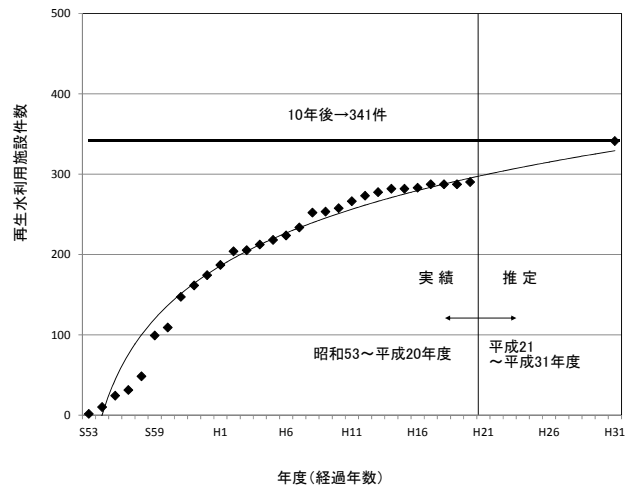


図-6 将来の再生処理施設数推定 (個別循環施設)

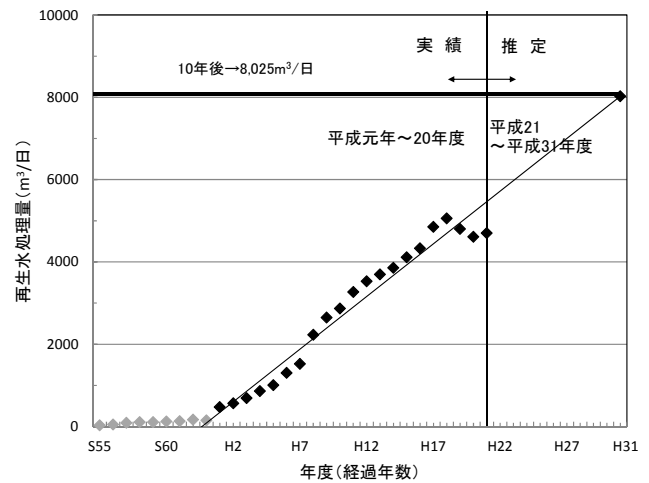


図-7 将来の再生処理施設数推定 (広域循環施設)

(4) 現況及び将来における雑用水利用量

(2), (3)の結果を合計すると現況施設による雑用水利用量は、年によって若干の差異はあるものの、表-6に示すとおり、約328～366万m³/年であり、上水道給水量の2.26～2.52%に相当する。昭和53年において最も厳しい給水制限を実施していた6月において最小の上水給水量は196,386m³/日であり、当該日において雑用水利用は、4.58%の供給を占める。

また、平成31年における雑用水利用を推計するために、図-6,7に示すように、平成20年までの施設整備数の推移から回帰式を算出し、平成31年度における施設数を推計した。

雑用水利用量は施設数に比例して増大すると仮定して、平成31年度における利用量を表-6のとおり推計した。平成21年からの雑用水利用の増量は、1,440～1,500千m³であり、上水道給水量の1%程度に相当する。これに対して、福岡市が取水を予定している五ヶ山ダムは15,100千m³の利水容量を有しており、ダム建設に伴って、平常時においては河川自流の取水が可能となることを加味すれ

表-6 雑用水利用率の推計

評価対象	対象年	雑用水利用量			雑用水利用量/上水給水量		
		個別循環	広域循環	合計	個別循環	広域循環	合計
		(m ³ /年)	(m ³ /年)	(m ³ /年)	(%)	(%)	(%)
① 現況施設	昭和53年	1,525,568	1,759,300	3,284,868	1.05	1.21	2.26
	平成6年	1,693,950	1,759,300	3,453,250	1.17	1.21	2.38
	平成14年	1,894,137	1,759,300	3,653,437	1.30	1.21	2.52
	平成20年	1,896,434	1,759,300	3,655,734	1.31	1.21	2.52
② 将来施設	昭和53年	1,793,857	2,929,125	4,722,982	1.24	2.02	3.25
	平成6年	1,991,852	2,929,125	4,920,977	1.37	2.02	3.39
	平成14年	2,227,244	2,929,125	5,156,369	1.53	2.02	3.55
	平成20年	2,229,945	2,929,125	5,159,070	1.54	2.02	3.55

ば、年間総取水量は、ダム利水容量の数倍となる。以上から雑用水利用は、上水道給水の一定の割合を担う水源ではあるが、ダムによる水資源開発の代替案としては成立が難しいことがわかる。

5. まとめ

本研究は、雑用水利用が推進されている福岡市を対象にその利用量について評価を行ったものであり、以下に示す結果が得られた。

- (1) 一戸建てにおける雨水貯留施設による雨水利用についてモデル化し、その効果を定量的に評価することができた。雨水貯留は降雨への依存性が極めて高く、渇水時には雨水利用量が低減するが、各々の家屋においては、上水道給水量の 3.4～4.4%に相当する効果が期待できる。また降水に恵まれた平成 21 年 7 月のような時期においては、7.8%の効果となる。
- (2) ビルにおける雑用水利用、雨水利用について、行政の所有するデータを建物用途別に分析した結果、上水道給水量の 2.26～2.52%に相当する効果があるものと推計した。なお、昭和 53 年渇水の最も給水制限が厳しい時期にあつては、約 4.58%に相当する効果がある。
- (3) 平成 31 年度における雑用水利用導入施設数を過去のデータに基づき予測し、福岡市全体の雑用水利用量を推計した結果、今後 10 年間で上水道の約 1%

に相当する水量を供給することが可能と考えられる。但し、その水量は、約 1,500 千 m³ と効果は限定的であり、福岡市において取水を予定しているダムなどの水資源開発施設の代替性は小さい。

謝辞：本研究を行う上で、九州大学大学院小松利光教授、首都大学東京河村明教授、横山勝英准教授から御指導を賜るとともに、国土交通省水資源政策課、福岡市からデータを御提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)国土交通省ホームページ、健全な水循環系構築に向けて <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/junkan/index-3.html>
- 2)城戸由能、岡 太郎、深尾大介、住宅地における発生源別懸濁態汚濁物質の流出解析と発生源対策の評価、水工学論文集、第48巻、pp.1453-1458、2004.2.
- 3)渡辺亮一、山崎惟義、皆川朋子、伊豫岡宏樹、山下輝和、岩田和也、流域治水を目的とした家庭用雨水貯留タンクの利用実態把握、土木学会第66回年次学術講演会、VII-001、pp1-2、2011.9.
- 4)佐藤 寛、再生水利用システムに関する研究、中央学院大学社会システム研究所 第10巻第2号、pp.83-97、2010.3.
- 5)平成20年版日本の水資源、国土交通省土地・水資源局水資源部、pp.27-28、2008.8.
- 6)閣議決定:利根川水系及び荒川水系における水資源開発基本計画、2008.
- 7)和田安彦、三浦浩之、村岡治道:雨水利用中水道システム導入による都市水循環適正化の研究、土木学会論文集 No.587/VII-6、pp.27-36、1998.
- 8)和田安彦、三浦浩之、多田律夫、尾崎平:節水型都市構築のための都市内水資源有効利用の研究、土木学会論文集 No.622/III-11、pp.59-71、1999.
- 9)江藤剛治、栗田秀明:雨水貯留施設の利水効果、第31回水理講演会論文集、pp.283-286、1987.
- 10)社団法人雨水貯留浸透技術協会:雨水利用ハンドブック、pp.66、1998.
- 11)国土交通省水資源政策課:平成21年度雨水・再生水の有効利用普及方策検討業務報告書、2010.

(2011.9.30受付)