

二度の渇水を経験した福岡市の都市成長と水需給の関連分析

システムダイナミックスモデルによる分析

ANALYSIS ON THE RELATION BETWEEN URBAN GROWTH AND WATER DEMAND & SUPPLY IN FUKUOKA CITY EXPERIENCED WATER SHORTAGE TWICE

Analysis through system dynamics model

大坂谷吉行 ——*1

青山 剛 ——*2

Yoshiyuki OSAKAYA ——*1

Takeshi AOYAMA ——*2

キーワード:

都市成長, 水需要, 水供給, ダム建設, システムダイナミックスモデル, 福岡市

Keywords:

Urban growth, Water demand, Water supply, Dam construction, System dynamics model, Fukuoka city

The population of Fukuoka City increased from 647,122 in 1960 to 1,341,470 in 2000. Urban growth has been increasing water demand. Fukuoka City has had water shortage twice in spite of its efforts to expand the capacity of water supply. This study firstly reproduced actual water supply and demand in Fukuoka City during 1960 to 2000 through System Dynamics Model. Water demand in Fukuoka City was analyzed and compared with that of Sapporo City without water shortage. The study secondly estimated the detail of water demand for urban life. The study thirdly carried out two cases of scenario simulation in order to evaluate dam construction works and Chikugo River water supply project. If those projects were not carried out, the estimated population of Fukuoka City is surely less than its actual population because of more serious water shortage.

1. 研究の背景、目的及び方法

水は都市成長の制約条件の一つと考えられる。福岡市の人口は、1960年の647,122人が2000年の1,341,470人と40年間に107.3%増加している。福岡市、広島市、仙台市と並んで「大規模地方中核都市」と呼ばれる札幌市の人口は、1960年の615,628人が2000年の1,822,368人と同じ40年間に196.0%増加している。即ち、1960年時点では福岡市の人口が札幌市の人口よりも31,494人多かったが、2000年時点では逆に札幌市の人口が福岡市の人口より480,898人多くなっている。また、1960年から2000年の40年間に札幌市では一度も渇水（水不足）が起きていない¹⁾が、福岡市では1978年と1994年の2度、長期的な給水制限を含む渇水²⁾が起きているので、水が急速な人口増加の制約条件となったと考えられる。他方、福岡市民は長期的な給水制限を伴う渇水を2度経験していることから、渇水を一度も経験していない札幌市民よりも節水意識が高い。

本研究の第一の目的は、システムダイナミックスモデル（以下、SDモデルという）を用いて、1960年～2000年の40年間（41時点）にわたる福岡市の現実の水供給と水需要を再現し、同市の水需給の実態とその経年変化を検証することである。また、札幌市のそれらと比較する。なお、SDモデルの使用ソフトは「STELLA」である。

電気洗濯機の普及、浴室付き住宅の増加、水洗便所の普及、マイカーの普及など、生活水準の向上に伴って、生活用水使用量は、人口の増加を上回るペースで増加しているが、そのメカニズムは定量的に明らかにされていない。従って、本研究の第二の目的は、SDモデルによる内部構造分析から、福岡市の生活用水使用量の内訳とその経年変化を明らかにすることである。

また、昨今、ダム建設の是非をめぐる論議が盛んであるが、ダム建設の必要性について実証的に検証した事例は少なく、政治的な利用や感情的な対立が見られる。本研究の第三の目的は、SDモデルによるシナリオ・シミュレーションから、施設整備（ダム建設、筑後川導水事業）の必要性を客観的に検証することである。

2. 水需給の再現(SDモデル1)

2.1 SDモデル1の作成方法及び妥当性

1960年～2000年の40年間（41時点）にわたる福岡市の水需給を再現するためにSDモデル1を作成した³⁾。

福岡市の水供給は、水道による給水と揚水（地下水汲上）によってまかなわれる。

福岡市水道の取水源は、①近郊河川水量、②ダム建設水量、③筑後川導水量の三つである。近郊河川水量は福岡市内を流れて博多湾に注ぐ中小河川（多々良川、御笠川、那珂川、室見川、瑞梅寺川など）からの取水量である。ダム建設水量は、福岡市が水利権を有する8つダムからの取水量である。筑後川導水量は、1972年から九州最大の河川で有明海に注ぐ「筑後川」の水を分水嶺越しに福岡市水道用水として受水している。表-1に示したように、①、②、③の取水可能量が福岡市の水利権に応じて設定されている。図-1に示したSDモデル1の供給サイドで、流入量は、①、②、③の和である。表-1から、①の取水可能量は、1963年、1969年、1980年、1987年の4回の水利権転用（工業用水→水道用水、農業用水→水道用水、発電用水→水道用水）によって増加している。②の取水可能量は、1966年、1971年、1977年、1978年、1986年、1993年、2000

*1 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博
(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*2 室蘭市議会 議員・工修

*1 Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

*2 Member, Muroran City Council, M. Eng.

表-1 福岡市の水供給関連データ

	日平均配 水量A 千 m^3 /日	最大取水 可能量B 千 m^3 /日	取水率 A/B	河川自流水 量 b_1 千 m^3 /日	ダム開発 水量 b_2 千 m^3 /日	筑後川導 水量 b_3 千 m^3 /日	注) B=b ₁ +b ₂ +b ₃ 最大取水可能量の変化率 因
1960年	93.3	104.0	0.897	58.0	46.0	0.0	
1961年	104.0	104.0	1.000	58.0	46.0	0.0	
1962年	104.0	104.0	1.000	58.0	46.0	0.0	
1963年	117.6	144.8	0.812	98.8	46.0	0.0	水利権転用
1964年	132.7	144.8	0.916	98.8	46.0	0.0	
1965年	144.8	144.8	1.000	98.8	46.0	0.0	
1966年	159.7	229.8	0.695	98.8	131.0	0.0	南畑ダム(那珂川)
1967年	173.5	229.8	0.755	98.8	131.0	0.0	
1968年	184.0	229.8	0.801	98.8	131.0	0.0	
1969年	200.6	259.8	0.772	128.8	131.0	0.0	水利権転用
1970年	222.3	259.8	0.856	128.8	131.0	0.0	
1971年	239.7	278.0	0.862	128.8	149.2	0.0	久屋ダム(多々良川)
1972年	269.0	378.0	0.712	128.8	149.2	100.0	江川ダム(筑後川)
1973年	293.0	378.0	0.775	128.8	149.2	100.0	
1974年	298.0	378.0	0.788	128.8	149.2	100.0	
1975年	319.0	378.0	0.844	128.8	149.2	100.0	
1976年	336.0	378.0	0.889	128.8	149.2	100.0	
1977年	357.0	443.0	0.806	128.8	214.2	100.0	菅瀬ダム(那珂川)
*1978年	285.0	458.0	0.622	128.8	229.2	100.0	瑞穂寺ダム(瑞穂寺川)
1979年	335.0	568.5	0.589	128.8	229.2	210.5	寺内ダム(筑後川)
1980年	337.0	608.5	0.554	168.8	229.2	210.5	水利権転用
1981年	350.0	608.5	0.575	168.8	229.2	210.5	
1982年	342.0	608.5	0.562	168.8	229.2	210.5	
1983年	354.0	608.5	0.582	168.8	229.2	210.5	
1984年	355.0	608.5	0.583	168.8	229.2	210.5	
1985年	357.0	608.5	0.587	168.8	229.2	210.5	
1986年	358.0	635.5	0.563	168.8	254.2	210.5	ダム改良
1987年	367.0	650.5	0.564	185.8	254.2	210.5	水利権転用
1988年	379.0	650.5	0.583	185.8	254.2	210.5	
1989年	397.0	650.5	0.610	185.8	254.2	210.5	
1990年	405.0	672.3	0.602	185.8	254.2	232.3	会所ダム(筑後川)
1991年	410.0	672.3	0.610	185.8	254.2	232.3	
1992年	415.0	672.3	0.617	185.8	254.2	232.3	
1993年	411.0	703.8	0.584	185.8	285.7	232.3	長谷ダム(多々良川)
*1994年	370.0	703.8	0.526	185.8	285.7	232.3	
1995年	382.0	703.8	0.543	185.8	285.7	232.3	
1996年	399.0	703.8	0.567	185.8	285.7	232.3	
1997年	394.0	703.8	0.560	185.8	285.7	232.3	
1998年	397.0	703.8	0.564	185.8	285.7	232.3	
1999年	396.0	703.8	0.563	185.8	285.7	232.3	
2000年	398.0	737.3	0.540	185.8	319.2	232.3	猿野ダム(多々良川)

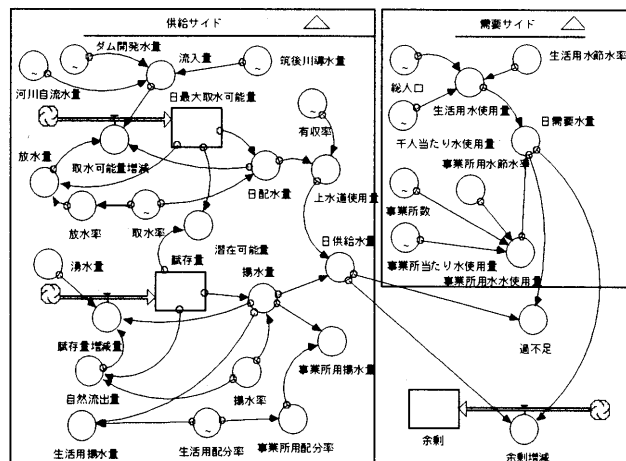


図-1 SDモデル1の構造

表-2 統計値とSDモデル1適用結果の比較(単位は $\text{km}^3/\text{日}$)

	1960 年	1965 年	1970 年	1975 年	* 1978 年	1980 年	1985 年	1990 年	* 1994 年	1995 年	2000 年
水道・生活 統計値	43.6	52.6	100.8	166.0	157.3	176.5	206.6	246.3	243.8	246.8	271.7
揚水・生活 統計値	36.0	32.0	28.0	24.0	21.6	20.0	16.0	12.0	8.8	8.0	4.0
合計・生活 統計値	79.6	84.6	28.8	190.0	178.9	196.5	222.6	258.3	252.6	254.8	275.7
合計・生活 モデル値	79.6	84.6	28.7	190.0	178.9	196.6	222.6	258.7	252.5	254.8	275.7
水道・事業 統計値	25.1	48.2	75.5	99.9	96.5	112.3	113.2	125.8	107.0	106.8	111.7
揚水・事業 統計値	36.0	32.0	28.0	24.0	21.6	20.0	16.0	12.0	8.8	8.0	4.0
合計・事業 統計値	61.1	80.2	103.5	123.9	118.1	132.3	129.2	137.8	115.8	114.8	115.7
合計・事業 モデル値	61.1	80.2	103.5	123.9	118.2	132.3	129.2	137.8	115.8	114.8	115.8
水道 生十事 統計値	68.6	100.8	176.3	265.9	253.8	288.8	319.8	372.1	350.8	353.6	383.4
揚水 生十事 統計値	72.0	64.0	56.0	48.0	43.2	40.0	32.0	24.0	17.6	16.0	8.0
合計 生十事 統計値	140.6	164.8	232.3	313.9	297.0	328.8	351.8	396.1	368.4	369.6	391.4
日需要水量 モデル値	140.7	164.9	232.3	313.9	297.0	328.8	351.8	396.4	368.3	369.6	391.5
日供給水量 モデル値	140.7	164.9	232.4	314.0	297.0	328.9	351.8	396.5	368.4	369.7	391.5

年の新設ダム供用やダム改良によって増加している。③の筑後川導水は1972年の100千 m^3 /日から始まったが、1979年と1990年の新規ダム供用によって増加している。福岡市水道統計では、①、②、③及び合計が示されている。水道による給水を定式化すると、以下のようになる。

$$\text{日平均配水量} = \text{日最大取水可能量} \times \text{取水率}$$

$$\text{日平均有收水量} = \text{日平均配水量} \times \text{有收率}$$

$$\text{日平均有収水量} = \text{日平均水道使用量}$$

$$\text{日平均水道使用量} = \text{日平均生活用水道使用量}$$

+ 日平均事業所用水道水使用量

また、日平均配水量と日平均有収水量の差は、水道料金を徴収できない「漏水、消防用水、公共用水など」によるものである。

福岡市の揚水（地下水汲上）の正確な統計はない。福岡市水道局に対するヒアリング調査から、地下水賦存量が 80,000 m³ 程度であること、非給水人口（総人口－給水人口）の 8 割程度であることが分かり、各年の非給水人口（総人口－給水人口）を考慮すると、1960 年の揚水率を 90%、2000 年の揚水率を 10%と設定して、モデル化した。即ち、揚水率は 1960 年から 2000 年の 40 年間に毎年 4%ずつ低下させた。

$$\text{日揚水量} = \text{地下水賦存量} \times \text{揚水率}$$

また、生活用と事業所用の配分率が不明であるため、日揚水量は生活用と事業所用に半分ずつ配分することにした。

$$\text{日供給水量} = \text{日平均水道使用量} + \text{日揚水量}$$

需要サイドは、人口千人当り日平均水使用量（原単位1）と事業所当り日平均水使用量（原単位2）を1960年から2000年までの5年毎の統計値（9時点）から求め、これらをsmoothing^{注2）}で各年の原単位が滑らかな曲線になるようにして、テーブル関数で与えた。

日需要水量=日平均生活用水使用量+日平均事業所用水使用量

再現モデルにおいて、日需要水量は水使用実績である。従って、

$$\text{余剰} = \text{日供給水量} - \text{日需要水量} > 0$$

表-2から、日平均生活用水使用量、日平均事業所用水使用量ともに、統計値とモデル値が概ね、一致している。表-2では5年毎の9時点と渇水のあった2時点のデータのみを示したが、SDモデル1の1960年~2000年の41時点で最大誤差率（統計値に対するモデル値の誤差の割合）は、1%未満である。特に渇水があった1978年と1994年は、その影響で供給、需要ともに落ち込んでいるため、smoothingが難しく、誤差率の拡大が危惧されたが、1%未満に抑えることができた。

2.2 SDモデル1に基づく考察

表－3に福岡市と札幌市の比較を示す。福岡市の日需要水量（生活＋事業所）は1960年の140.7千 m^3 /日が2000年の391.5千 m^3 /日に増加し、40年間の増加率は178.3%と人口増加率（107.3%）であり、人口増加率は196.0%である。

福岡市の日平均生活用水使用量は、1960年の79.6千 m^3 /日が2000年年には275.7千 m^3 /日に増加し、40年間の増加率は246.4%である。札幌市の日平均生活用水使用量は、1960年の48.3千 m^3 /日が2000年には371.2千 m^3 /日に増加し、40年間の増加率は668.5%である。

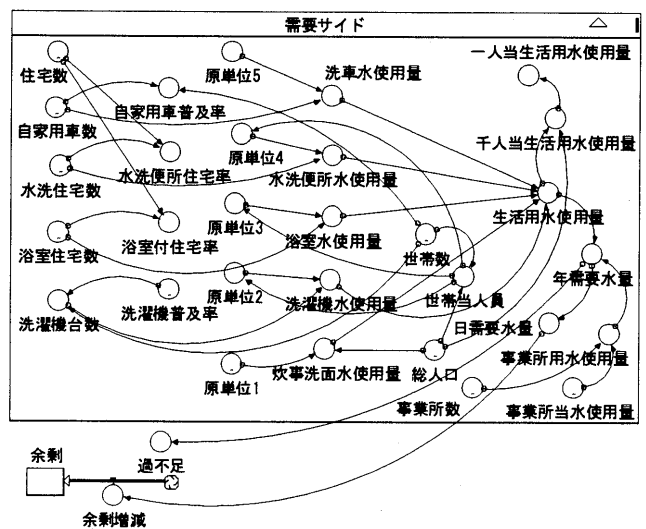
また、表－3から、福岡市の一人当り日平均生活用水使用量は、123.0 ℓ （1960年）、150.9 ℓ （1970年）、180.5 ℓ （1980年）、208.8 ℓ （1990年）、205.6 ℓ （2000年）と増加し、40年間の増加率は67.2%である。なお、福岡市で渇水が生じた1978年の一人当り日平均生活用水使用量は、169.5 ℓ であり、2度目の渇水が生じた1994年の一人当り日平均生活用水使用量は、197.7 ℓ である。札幌市の一人当り日平均生活用水使用量は、79.0 ℓ （1960年）、84.9 ℓ （1970年）、150.2 ℓ （1980年）、191.6 ℓ （1990年）、205.7 ℓ （2000年）と増加し、40年間の増加率は160.4%である。夏暑い福岡市では夏場の水需要が大きく、1960年時点の一人当り日平均生活用水使用量は、札幌市のそれを55.7%上回っていたが、2度の渇水を経験し、2000年時点の一人当り日平均生活用水使用量は両市ともに205 ℓ ～206 ℓ で同じである。2度の渇水を経験した福岡市では水需要の増加が抑えられ、一度も渇水を経験していない札幌市では生活の高度化に伴って、一人当り日平均生活用水使用量が伸びていったと言えよう。なお、東京都の調査^{注3)}によれば、一人当り日平均水使用量は、250 ℓ （1998年）であり、寒冷地である札幌市のそれや節水対策が進んでいる福岡市のそれに比べて、約25%多い。

福岡市の日平均事業所用水使用量は1960年の61.1千 m^3 /日が1977年の153.0千 m^3 /日まで増加していたが、渇水のあった1978年には118.1千 m^3 /日と大幅に落ち込んだ。その後、125～135千 m^3 /日に回復したが、2度目の渇水のあった1994年に115.8千 m^3 /日である。2度の渇水、水を大量に消費する事業所数の減少、省資源技術（節水や水のリサイクル技術）の普及などにより、事業所用水使用量は、横ばいあるいは減少気味である。渇水を経験していない札幌市においても事業所用水使用量は減少している。⁴⁾

3. 生活水の内部構造分析(SDモデル2)

3.1 SDモデル2の作成方法及び妥当性

都市成長は、人口増加だけでなく、生活水準の向上を伴う。生活水準の向上と水需要の関連を見るには、生活用水使用量の内訳とそ



図－2 SDモデル2の需要サイド

表－3 福岡市と札幌市の比較（水使用量はモデル値）

福岡市	1960年	1965年	1970年	1975年	*1978年	1980年	1985年	1990年	1994年*	1995年	2000年
人口	64.7万	75.0万	85.3万	100.2万	105.5万	108.9万	116.0万	123.7万	127.8万	128.5万	134.1万
日平均水需要（使用）量	140.7	164.9	232.3	313.9	297.0	328.8	351.8	396.4	368.3	369.6	391.5
日平均生活用水使用量	79.6	84.6	128.7	190.0	178.9	196.6	222.6	258.7	252.5	254.8	275.7
1人当り生活用水使用量	123.0 ℓ	112.8 ℓ	150.9 ℓ	187.8 ℓ	169.5 ℓ	180.5 ℓ	191.9 ℓ	209.1 ℓ	197.6 ℓ	198.3 ℓ	205.6 ℓ
日平均事業所用水使用量	61.1	80.2	103.5	123.9	118.2	132.3	129.2	137.8	115.8	114.8	115.8
札幌市	1960年	1965年	1970年	1975年	1978年	1980年	1985年	1990年	1994年	1995年	2000年
人口	61.6万	82.1万	101.0万	124.1万	133.4万	140.2万	154.3万	167.2万	174.1万	175.7万	182.2万
日平均水需要（使用）量	148.1	87.0	293.7	390.8	437.7	465.2	495.6	565.6	606.7	616.0	597.8
日平均生活用水使用量	48.7	66.4	84.4	141.8	180.9	210.1	266.3	320.7	348.2	355.0	373.1
1人当り生活用水使用量	79.0 ℓ	80.8 ℓ	83.6 ℓ	114.2 ℓ	135.6 ℓ	149.9 ℓ	172.6 ℓ	191.8 ℓ	200.0 ℓ	202.1 ℓ	204.8 ℓ
日平均事業所用水使用量	99.4	170.0	209.3	249.0	256.8	255.1	229.3	245.0	258.5	261.0	224.6

※ 人口及び1人当り（日平均）生活用水使用量を除き、他の項目の単位は千 m^3 /日である。西暦年の*印は渇水があった年を示す。

表－4 福岡市の日平均生活用水使用量の内訳

	1960年	1965年	1970年	1975年	*1978年	1980年	1985年	1990年	*1994年	1995年	2000年
生活1 炊事洗面その他	58.50	43.15	67.77	103.97	78.04	86.52	88.99	94.89	63.02	60.91	58.78
	74.2%	51.2%	52.5%	54.8%	43.6%	44.0%	40.1%	36.6%	25.0%	23.9%	21.3%
生活2 洗濯機使用	9.28	23.14	32.89	43.73	47.09	51.24	55.92	63.99	69.37	70.54	78.15
	11.8%	27.5%	25.5%	23.0%	26.3%	26.1%	25.2%	24.7%	27.5%	27.7%	28.3%
生活3 浴室付き住宅	10.19	15.33	22.96	32.32	37.99	40.44	47.99	55.08	60.52	61.82	67.91
	12.9%	18.2%	17.8%	17.0%	21.2%	20.6%	21.6%	21.3%	24.0%	24.3%	24.6%
生活4 水洗便所住宅	0.77	1.89	3.66	7.05	12.04	14.24	24.19	38.19	51.22	52.75	62.15
	1.0%	2.2%	2.8%	3.7%	6.7%	7.2%	10.9%	14.7%	20.3%	20.7%	22.5%
生活5 マイカー洗車	0.16	0.66	1.71	2.81	3.63	4.14	5.11	6.85	8.19	8.53	9.28
	0.2%	0.8%	1.3%	1.5%	2.0%	2.1%	2.3%	2.6%	3.2%	3.4%	3.4%
生活合計 モデル2値	78.89	84.16	128.99	189.88	178.79	196.59	222.19	259.00	252.33	254.55	276.23
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
生活合計 モデル1値	79.58	84.60	128.72	190.05	178.82	196.56	222.60	258.66	252.53	254.82	275.71
生活合計 統計値	79.57	84.59	128.75	190.05	178.86	196.53	222.62	258.33	252.64	254.76	275.70

※ %が付いている数値を除いた数値の単位は、千 m^3 /日である。西暦年の*は渇水が起きた年であることを示す。

の経年変化を考察する必要がある。生活用水使用量の内訳を把握するため、SDモデル2を作成した。供給サイドは、SDモデル1と同じなので、SDモデル2の需要サイドのみを図-2に示した。

需要サイドは、SDモデル1の日平均生活用水使用量を生活用水1（炊事、洗面、その他）、生活用水2（洗濯機用水）、生活用水3（浴室付き住宅の浴室用水）、生活用水4（水洗便所付き住宅）、生活用水5（自家用車の洗車用水）に分けた。生活用水5^{注4}を除いて、原単位が得られないため、1960年～2000年の41時点において、生活用水1、生活用水2、生活用水3、生活用水4及び生活用水5の合計（モデル値）が、日平均生活用水使用量の統計値とできるだけ一致する（誤差率が1%未満になる）ようにシミュレーションを数十回繰り返して、各年の生活用水1から生活用水4の原単位をsmoothingの方法で求めた。なお、事業所揚水使用量は、SDモデル1と同じである。

表-4は、福岡市の生活用水1～生活用水5の各使用量と日平均生活用水使用量（生活用水1から生活用水5までの合計）を100%とした時の構成比を示している。ただし、41時点全ての値を表示するスペースがないので、表-4では5年毎の9時点及び渇水のあった年の2時点の計11時点の値を示している。なお、モデル2の生活用水使用量（合計）は、モデル1のそれに比べて、誤差が少し大きくなるが、それでも統計値に対する誤差率は1%未満であった。

3.2 SDモデル2による考察

生活用水1（炊事、洗面及びその他の用水）は、1960年に74.0%を占めていたが、2000年には21.3%にシェアが低下している。外食機会の増加、核家族化の進行、ペットボトルの飲料水の普及などが原因と考えられる。

次に1960年代に各家庭に洗濯機が普及することによって、生活用水2（洗濯機用水）が水需要となって現れた。1960年11.8%が1970年には25.5%と拡大している。しかし、1970年以降、人口増加に伴って生活用水2そのものは増加しているが、シェアは1980年に26.1%、2000年に28.3%と微増である。ランドリーの利用（洗濯の外注）や核家族化などが原因と考えられる。

次に戸建住宅、集合住宅を問わず、各戸に浴室が普及することによって、生活用水3（浴室付き住宅の浴室用水）の水需要が現れた。生活用水3のシェアは、1960年に12.9%、1970年に17.8%、1980年に20.6%、1990年に21.3%、2000年に24.5%と拡大している。

さらに下水道整備が進捗することによって、水洗便所が普及し、生活用水4（水洗便所付き住宅）の水需要が顕在化していった。生活用水4のシェアは、1960年に1.0%にすぎなかったが、1970年代に下水道整備が急速に進み、1980年のシェアは7.2%を占める。その後もさらに整備が進み、2000年には22.5%を占めるに至った。

1970年代入って、モータリゼーションが本格化することによって生活用水5（自家用車の洗車）による水需要が顕在化していった。表-2から生活用水5のシェアは1960年に0.3%、1970年に1.3%、1980年に2.1%と拡大し、2000年には3.4%となった。

生活用水使用量の内訳とその経年変化については、福岡市と札幌市で大きな差は見られない。

4. シナリオA(SDモデル3による検討)

福岡市の取水可能量は、①河川自流水、②ダム開発水量、③筑

後川導水量の3つに分かれる。シナリオAでは、水資源開発がない場合、即ち、②と③がなく、2000年時点の河川自流水185,800 m³/日を限界取水量と想定して、SDモデル3を作成して、シミュレーションを行った。供給サイドは水道（河川自流取水による分のみ）と揚水（地下水汲上）になる。河川自流の取水可能量は現実どおりに水利権転用が行われて増加したと想定した。

日供給水量 = 日平均水道使用量 + 日揚水量

日平均水道使用量 = 限界取水量 × 取水率 × 有収率

限界取水量 = 河川自流水

限界取水量 = 日最大取水可能量 - ダム開発水量 - 筑後川導水量

節水率は、政策変数であり、節水率=0.0の場合、節水率=0.1の場合、節水率=0.2の場合及び節水率=0.3の場合について、需要が供給を上回る年とその前年（限界年とする、以下も同様）の人口（限界人口とする。以下も同様）を求めた。

(1) 節水をしない（節水率=0.0）場合

表-5から、取水率や揚水率を現実どおりにすると、1966年に供給<需要となるので、その前年（1965年）の人口750千人が限界人口となる。そこで1966年以降の取水率を0.9に上げ、揚水率を現実どおりにすると、1967年に供給<需要となるので、その前年（1966年）の人口778千人が限界人口となる。さらに1967年以降の揚水率を0.9に上げても、1968年に供給<需要となるので、その前年（1967年）の人口799千人が限界人口となる。

(2) 節水率=0.1の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1966年に供給<需要となるので、1965年の人口750千人が限界人口となる。そこで1966年以降の取水率を0.9に上げ、揚水率を現実どおりにすれば、1969年に供給<需要となるので、その前年（1968年）の人口818千人が限界人口となる。さらに1969年以降の揚水率を0.9に上げても、1970年に供給<需要となるので、その前年（1969年）の人口833千人が限界人口となる。

(3) 節水率=0.2の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1968年に供給<需要となるので1967年の人口799千人が限界人口となる。そこで1968年以降の1967年の人口799千人が限界人口となる。そこで1968年に供給<需要となるので、その前年（1970年）の人口853千人が限界人口となる。さらに1971年以降の揚水率を0.9に上げても、1972年に供給<需要と鳴るので、その前年（1971年）の人口891千人が限界人口となる。

(4) 節水率=0.3の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1971年に供給<需要となるので、1970年の人口853千人が限界人口となる。そこで1971年以降の取水率を0.9に上げ、揚水率を現実どおりにすれば、1972年に供給<需要となるので、その前年（1971年）の人口891千人が限界人口となる。さらに1972年以降の揚水率を0.9に上げても、1975年に供給<需要となるので、その前年（1974年）の人口967千人が限界人口となる。

5. シナリオB(SDモデル4による検討)

福岡市の取水可能量は、①河川自流水、②ダム開発水量、③筑後川導水の量3つに分かれる。ここでいう「②ダム開発水量」とは、

那珂川水系、多々良川水系など、福岡市内を流れる中小河川に建設されたダムからの取水である。これに対して③の筑後川導水量は、本来、有明海に注いでいる筑後川の水を分水嶺越しに日本海側の福岡市へ給水している。シナリオAでは、1972年に供用を開始した筑後川導水事業がなかった場合、即ち、1972年以降の取水可能量から筑後川導水量分を差し引いた値を限界取水量と想定して、SDモデル4を作成して、シミュレーションを行った。供給サイドは、河川自流、ダム開発及び揚水になる。

日供給水量 = 日平均水道使用量 + 日揚水量

日平均水道使用量 = 限界取水量 × 取水率 × 有収率

限界取水量 = 河川自流水量 + ダム開発水量

限界 = 日最大取水可能量 - 筑後川導水量

節水率は、政策変数であり、節水率=0.0の場合、節水率=0.1の場合、節水率=0.2の場合及び節水率=0.3の場合について、需要が供給を上回る年とその前年（限界年とする、以下も同様）の人口（限界人口とする、以下も同様）を求めた。

(1) 節水率=0.0の場合（節水をしない場合）

表-6から、取水率や揚水率を現実どおりにすると、1972年に供給<需要となるので、その前年（1971年）の人口891千人が限界人口となる。そこで1972年以降の取水率を0.9に上げ、揚水率を現実どおりにすると、1973年に供給<需要となるので、その前年（1972年）の人口912千人が限界人口となる。さらに1973年以降の揚水率を0.9に上げても、1975年に供給<需要となるので、その前年（1974年）の人口967千人が限界人口となる。

(2) 節水率=0.1の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1972年に供給<需要とな

るので、1971年の人口891千人が限界人口となる。そこで1972年以降の取水率を0.9に上げ、揚水率を現実どおりにすれば、1975年に供給<需要となるので、その前年（1974年）の人口967千人が限界人口となる。さらに1975年以降の揚水率を0.9に上げると、2000年まで供給>需要となり、水不足は生じない。

(3) 節水率=0.2の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1973年に供給<需要となるので1972年の人口912千人が限界人口となる。そこで1973年以降の取水率を0.9に上げると、2000年まで供給>需要となり、水不足は生じない。

(4) 節水率=0.3の場合

取水率や揚水率を現実どおりにすると、1983年に供給<需要となるので1982年の人口1,119千人が限界人口となる。そこで1983年以降の取水率を0.9に上げると、2000年まで供給>需要となり、水不足は生じない。

6. まとめ

1960年～2000年の40年間（41時点）の福岡市の水需給をSDモデル1で再現した。その結果、福岡市では2度の渇水を経験したことから節水が広がり、水需要の伸びが抑えられた。1970年代前半まで、福岡市の人口1人当たり生活用水使用量は、札幌市のそれを上回っていたが、最初の渇水年（1978年）以降、札幌市のそれとほぼ同じくらいである。

SDモデル2による内部構造分析から1960年～2000年の40年間（41時点）の福岡市の生活用水使用量の内訳を推計することができた。全体的な傾向は札幌市とあまり変わらない。

シナリオA（ダム開発水量と筑後川導水量の両方がない場合）のSDモデル3によるシミュレーションから、1970年前後に水需要が水供給を上回り、渇水（水不足）になったと推測される。

シナリオB（ダム開発水量はあるが、筑後川導水量がない場合）のSDモデル4によるシミュレーションから、筑後川導水が供用されていても2度の深刻な渇水が生じたのであるから、供給不足を補う方法は20%～30%の節水を恒常的に行う他はない。逆説的に言えば、筑後川導水があればこそ、2度の渇水時に節水でしのぐことができたと言えよう。

7. 今後の課題

本研究で作成したSDモデル、特に内部構造分析に用いたSDモデル2の信頼性を高めるには、福岡市や札幌市の一般家庭において使途別の水使用量の実態調査を行い、モデルによる推計値と比較、検証することが重要と考えられる。

また、福岡市の揚水統計では、生活用と事業所用の配分率が無いため、モデルでは半分ずつ配分せざるを得なかった。水使用量全体に占める揚水の割合は、1960年から1965年に高いので、配分率の設定を変えると、生活用水使用量と事業所用水使用量への影響は否めないが、生活用水使用量（生活用水1から生活用水5）の比率としては、大きな影響はないと考えられる。また、1970年の揚水の割合は15.3%で、その後、年々低下し、2000年には2%になっているので、配分率の設定を変えることによるモデルへの影響は次第に小さくなっている。

表-5 シナリオAの限界年と限界人口（福岡市）

節水率	取水率	揚水率	限界年	限界人口
0.00	現実	現実	1965年	750千人
	0.90	現実	1966年	778千人
	0.90	0.90	1967年	799千人
0.10	現実	現実	1965年	750千人
	0.90	現実	1968年	818千人
	0.90	0.90	1969年	833千人
0.20	現実	現実	1967年	799千人
	0.90	現実	1970年	853千人
	0.90	0.90	1971年	891千人
0.30	現実	現実	1970年	853千人
	0.90	現実	1971年	891千人
	0.90	0.90	1974年	967千人

表-6 シナリオBの限界年と限界人口（福岡市）

節水率	取水率	揚水率	限界年	限界人口
0.00	現実	現実	1971年	891千人
	0.90	現実	1972年	912千人
	0.90	0.90	1974年	967千人
0.10	現実	現実	1971年	891千人
	0.90	現実	1974年	967千人
	0.90	0.90	水不足は生じない	
0.20	現実	現実	1972年	912千人
	0.90	現実	水不足は生じない	
	0.90	0.90	水不足は生じない	
0.30	現実	現実	1982年	1,119千人
	0.90	現実	水不足は生じない	
	0.90	0.90	水不足は生じない	

札幌市の場合、取水は河川自流のほか、豊平峡ダムと定山溪ダムで行われている。しかし、福岡市のダムは、札幌市の二つのダムに比べて、規模（有効貯水量）が小さく、数が多い。筑後川水系を除いても8つのダム⁵⁾があり、「ダム建設水量」にまとめると、個別のダムの効果を検証できない。

また、筑後川導水量も表-1に示したように、1972年の江川ダムの供用、1979年の寺内ダムの供用、1990年の合所ダムの供用で、取水可能量が大きく変化しており⁶⁾、個々のダムの効果は、筑後川導水量を個々のダムに分割しないと計測できない。

本研究では、水道の給水を日平均配水量でモデル化している。しかし、渇水のあった1978年の最大取水可能量は、表-1のように1976年や1977年よりも増加している。単純に言えば、渇水であれば、取水率を上げれば良いことになるが、表-1に示したように1978年の取水率は0.662で、1976年の取水率(0.889)や1977年の取水率(0.806)より小さくなっている。最大取水可能量は、平常的に福岡市が同市の水利権として取水可能な量である。しかし、水利権を有するダムの貯水量や筑後川の水量が少ない場合には、目一杯取水したくてもできないという現実がある。福岡市の「渇水の記録」によれば、最低有効貯水量の平年値(25,000千 m^3)に対して1978年の最低有効貯水量は2,661千 m^3 と10.6%にすぎない。

また、2度目の渇水が起きた1994年は、前年(1993年)に多々良川の長谷ダムの供用で最大取水可能量が増えている。しかし、1994年の取水率は0.526で、1992年の取水率(0.617)や1993年の取水率(0.584)よりも低い⁷⁾。取水率を上げることができない原因は、1994年の最低有効貯水量は6,528千 m^3 と最低貯水量の平年値の26.1%と低いためである。1960年から2000年までを水需給の再現を含めてシミュレーションする場合、日平均のデータでモデル作成をせざるを得ない。

水利権を反映した最大取水可能量を基本としながらも、年間降雨量や季節変動係数を取り込んで、渇水状態をよりリアルに表現できるSDモデルに改良することが今後の課題である。

福岡市では1978年の渇水で、「節水型都市づくり」⁸⁾を進めている。同年8月には「節水普及課」を設置し、翌1979年4月に「節水の日」を制定している。また、1978年から市民の「節水意識」⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を調査している。さらには「節水型便器」の普及状況を把握している。また、1977年の節水蛇口(節水コマ入り)普及率は4.7%であったが、1978年の節水蛇口普及率は79.8%と急上昇している。他方、水道局は、古い水道管の取り替え事業を中心に漏水対策を進めた。

その結果、水道の有収率は1960年の0.736が、1970年に0.8を超え、1984年に0.9を超え、1997年に0.95を超えた¹²⁾。本研究のシナリオ・シミュレーションは、節水率を0.1、0.2、0.3の3通りで機械的に設定して行った。節水率を一律に設定するのではなく、「節水蛇口」普及の効果、「節水型便器」普及の効果、「漏水対策」推進の効果を推計できるモデルの作成も今後の課題である。

注

注1) 1978年は、福岡管区気象台創設以来89年ぶりと言われた大旱魃となり、1978年5月20日から1979年3月24日の実に287日間に及ぶ給水制限が行われた。1日平均給水制限時間は14

時間であった。福岡市の年間平均降雨量は1,604mmであるが、1978年の年間降雨量は1,138mmであった¹³⁾。

1994年の渇水は、1994年8月4日から1995年5月31日の実に295日間に及ぶ給水制限が行われた。1日平均給水制限時間は8時間であった。福岡市の年間平均降雨量は1,604mmであるが、1994年の年間降雨量は891mmであった¹⁴⁾。

注2) Smoothingとは、各時点の数値をテーブル関数で与える場合に異常値(例えば、渇水)の時点を除いて、各時点の数値を数学の包絡線を描くように滑らかな曲線で連続させるモデル作成作業のことである。

注3) 平成13年版『日本の水資源』(国土交通省)¹⁵⁾の6頁に「家庭における水の使われ方の変化」(東京都)として、平成2年度と平成10年度の調査結果が掲載されている。なお、内訳は、「洗面その他」、「洗濯」、「炊事」、「トイレ」及び「風呂」の5区分である。しかし、サンプル調査であり、2時点にすぎない。

注4) 福岡市における洗車に関するデータが得られなかったため、室蘭市内のガソリンスタンドの調査結果を利用した。2001年の1年間に6,451台を洗車し、2,129 m^3 を使用しており、洗車は1台当たり330 l 要することが分かった。一般家庭では平均して月に2回洗車している。

参考文献

- 1) 大坂谷吉行、青山剛 システムダイナミックスモデルによる都市成長と水需給の関連分析～札幌市におけるケーススタディ～日本建築学会 技術報告集第23号(掲載決定) 2006.6
- 2) 福岡市 『福岡市統計書』各年版1961～2001
- 3) 福岡市水道局 『水道統計』各年版1961～2001
- 4) 前掲1)
- 5) 福岡市水道局 福岡市の水源・浄水場 水道局ホームページ 2005
- 6) 前掲5)
- 7) 福岡市水道局 福岡市の水道の歩み 水道ホームページ 2005
- 8) 福岡市水道局 節水型都市づくり～①効率的な水運用、②配水管整備、③漏水対策～ 水道局ホームページ 2005
- 9) 福岡市水道局 市民の節水意識 水道局ホームページ 2005
- 10) 福岡福岡市水道局 上手な節水方法 水道局ホームページ 2005
- 11) 福岡市水道局 節水機器の紹介 水道局ホームページ 2005
- 12) 福岡市水道局 福岡市の水道事業 水道局ホームページ 2005
- 13) 福岡市水道局 「渇水の記録」(昭和53年と平成6年の渇水の記録) 水道局ホームページ 2005
- 14) 前掲13)
- 15) 国土交通省土地・水資源局 平成13年版『日本の水資源』～豊かな暮らしを育む水資源と水源地域の展望～ 2001

[2005年10月20日原稿受理 2006年2月20日採用決定]