

〈論文〉

多目的計画法の実水配システムへの応用

熊木 由次¹⁾

¹⁾ 東京都水道局 研修・開発センター

(〒158-0085 世田谷区玉川田園調布1-19-1 E-mail: kumaki-yuji@waterworks.metro.tokyo.jp)

概要

東京都水道局の水道事業に要する電力量は、東京電力管内の総電力量の約1%を占めている。また、その内の約80%が送配水ポンプにより消費されている。一方、東京都の区部には10か所の浄水場と22か所の給水所で構成された水配システムがある。本研究は、この水配システムに要する全水流のエネルギー及び全造水コストを最小化する最適解（パレート解）が、エクセルに標準装備されたソルバー機能を使って簡単に求まることを実証している。

キーワード：多目的計画法、水配システム、水流のエネルギー、パレート解、自動演算

原稿受付 2014.2.24 原稿受理 2014.5.28

EICA: 19(1) 27-34

1. 簡易モデルによる検証

1.1 多目的計画法について

最適化法には、目的関数が複数の未知数の一次多項式で構成され、その最適化（最小化あるいは最大化）を行う一次計画法や目的関数が二次多項式で表される二次計画法などが広く知られている。さらに、複数の目的関数を想定し、それらを同時に満足させる解（パレート解）を求める多目的計画法¹⁾がある。多目的計画法の応用分野は工学・産業・経済・経営など幅広く、例えば、強度がありしかも軽量で安価な工業製品を製作するため、また、判断能力を持たせたロボットを動かすため、あるいは、投資行動における最大限の成果を得るためなど、多岐に渡っている。

1.2 水配システムの簡易モデルについて

本研究は東京都区部の配水区域を対象にしている。しかし、後述のごとく実水配システムには10か所の浄水場と22か所の給水所などが有り、送配水系統が総計で59系統もある。そのためエクセルによる多目

的計画法の解法の検証については、全体を対象にした場合には、かなり煩雑になることが予想される。そこで同システムを簡略化した簡易モデル（Fig. 1）について検証することにした。この簡易モデルは4か所の浄水場と7か所の給水所及び3か所の配水区域から構成されている。

1.3 二つの目的関数について

本研究では、目的関数として最小限の二目的（水流のエネルギーと造水コスト）を想定し、その総量の最小化（最適化）を試みている。また、各送配水系統の流量に対する水流のエネルギー特性には二次多項式を想定した。従って、この多目的計画法は多目的非線形計画法のなかで最も単純な二目的二次計画法になる。

さらに、本研究は送配水に要する電力量ではなく水流のエネルギーを扱っている。その理由は、ある吐出圧力と流量における水流のエネルギーとその時の電動機へ供給する電力量の間には、電動機の制御方式・回転数・ポンプの組合せなどによる総合効率の違いの間

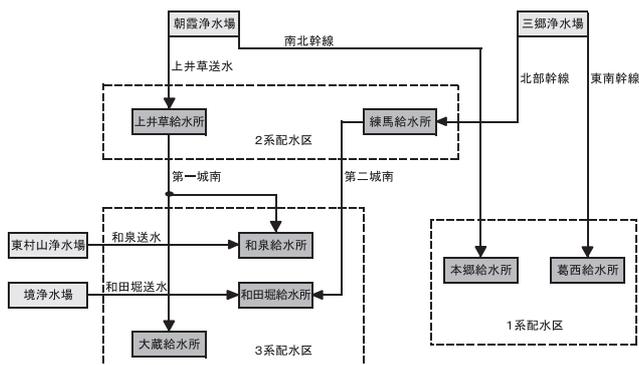


Fig. 1 Simple model of the Tokyo Waterworks Bureau

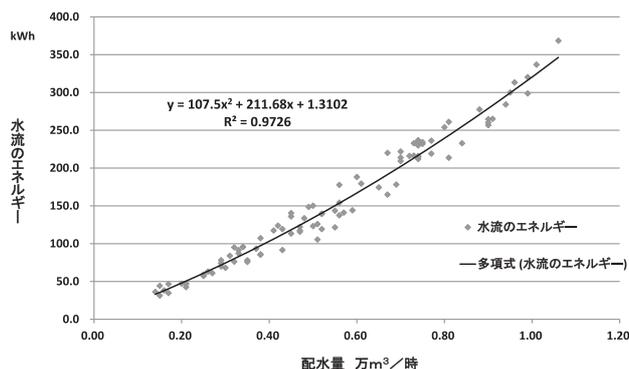


Fig. 2 Current energy of the Hongo water supply

題が発生する。そのため、流量に対する電力量のデータでは、相関の良いグラフや関係式が得られない。本郷配水の例 (Fig. 2) は代表的なグラフである。

次に、第二の目的関数である造水コストについて記す。浄水場での造水コスト (原単位) を求めるためには、分母となる水量として原水量または送水量を使用するが、この研究では送水量を採用した。そのため、ある浄水場の造水コストは、その全送配水システムの合計値に造水原単位を掛けたものになる。

1.4 簡易演算表と演算結果について

簡易演算表 (実績値) (Table 1) は、第一の要素 (水流のエネルギー) と第二の要素 (造水コスト) の二つの要素を同時に最小化する解 (パレート解) を求める様になっている。また、パレート解を求める方法としては、重み係数法を採用した。そのため、それぞれの重み係数を設定する枠と個別最適値および全体の最適値を表示する枠を一番上の表の右下に設けた。さらに、最適化演算したときの第一の要素 (水流のエネルギー) の総計の実績値と最適値とを比較するための表を一番上の表の左下に設けた。一方、表上の灰色セルが演算対象となる未知数 (各流量) であり、実績値として9月11日23時のデータを入力したものである。また、水量が入る白色セルは関連する他の水量から簡単に算出できるものである。さらに、送配水量と引入量の関係を明瞭にするため貯水量の増減値は全て0 m³/時にした。

主な制約条件の表は、各配水区域の水収支の条件を満たすための表で、下部に時間計画配水量を設定する表を設けた。また、右側にはポンプ吐出量の最大値を設定する表を設けた。ただし、最大値の数値については、最適化したときの結果を強調するため、実績値の約1.5倍にした。

エネルギー特性の表は、エネルギー特性の二次近似式の係数を設定する表である。ここでの送配水エネルギーの特性は、平成25年9月11日23時から15日22時までの実績データにより作成した。さらに、共通して、反転セルは非負条件を設定したところである。

一方、演算条件については、重み係数を

Table 1 Simple operation list (results level)

簡易演算表(100-95)(10.0-1.0) 実績値

段階	施設名	引入系統名	実績値		実績値		(第一要素)		(第二要素)	
			引入量 m ³ /時	貯水量 の増減	送配水 系統名	送配水量 m ³ /時	水流のエネ kWh	造水コスト 円/時	円/m ³	
浄水場	三郷	原水量	11,659	0	北部幹線送水	6,159	1,110	585,105	95	
		原水量	26,590	0	東南幹線送水	5,500	531	522,500	95	
	朝霞	原水量	6,000	0	上井草送水	19,190	1,988	1,919,000	100	
	東村山	原水量	4,000	0	南北幹線送水	7,400	800	740,000	100	
		境	原水量	4,000	0	和泉送水	6,000	0	600,000	100
1系配水区	葛西	東南幹線引入	5,500	0	葛西配水	5,500	491			
	本郷	南北幹線引入	7,400	0	本郷配水	7,400	217			
	上井草	上井草引入	19,190	0	上井草配水	5,400	458			
2系配水区	練馬	北部幹線引入	6,159	0	第一城南送水	13,790	435			
		和泉	第一城南引入	1,400	0	練馬配水	4,659	556		
3系配水区	和泉	第二城南送水	1,500	0	第二城南送水	1,500	655			
		和泉	和泉引入	6,000	0	和泉配水	7,400	287		
	和田堀	和田堀引入	4,000	0	和田堀配水	5,500	215			
大蔵	第一城南引入	12,390	0	大蔵配水	12,390	447				
	浄水場	給水所	合計値		総原水量	48,249	8,190	4,766,605	個別最適値	
最適値	4,428	3,762	8,190		総貯水量	0	10.0	1.0	重み係数	
実績値	4,428	3,762	8,190		総配水量	48,249	81,903	4,766,605	造水コスト	
削減量	0	0	0		末端配水量	48,249		4,848,508	最適値	
削減率	0.0	0.0	0.0		演算誤差	0		重み係数法	min	
									条件	

主な制約条件

段階	施設名	送配水系統名	(水収支)			(最大値)		
			1系配水区	2系配水区	3系配水区	送配水量 m ³ /時	条件	最大値 m ³ /時
浄水場	三郷	北部幹線送水				6,159	≦	9,000
		東南幹線送水				5,500	≦	8,000
	朝霞	上井草送水				19,190	≦	29,000
	東村山	南北幹線送水				7,400	≦	11,000
		和泉送水				6,000	≦	9,000
1系配水区	葛西	葛西配水	5,500			5,500	≦	8,000
	本郷	本郷配水	7,400			7,400	≦	11,000
	上井草	上井草配水		5,400		5,400	≦	8,000
2系配水区	練馬	第一城南送水				13,790	≦	21,000
		練馬配水		4,659		4,659	≦	7,000
3系配水区	和泉	第二城南送水				1,500	≦	5,000
		和泉配水			7,400	7,400	≦	11,000
	和田堀	和田堀配水			5,500	5,500	≦	8,000
大蔵	大蔵配水			12,390	12,390	≦	19,000	
			12,900	10,059	25,290			
			12,900	10,059	25,290			
			配水量	配水量	配水量			
			m ³ /時	m ³ /時	m ³ /時			

エネルギー特性の表

段階	施設名	送配水系統名	(エネルギーの特性)			(第一要素)			
			二次係数	一次係数	定数	水流のエネルギー m ³ /時	水流のエネ kWh/時	原単位 Wh/m ³	傾き Wh/m ³
浄水場	三郷	北部幹線送水	716.350	-395.220	1,081.4000	6,159	1,110	180.2	48.7
		東南幹線送水	161.710	876.320	0.0029	5,500	531	96.5	105.4
	朝霞	上井草送水	164.680	571.300	284.9600	19,190	1,988	103.6	120.3
	東村山	南北幹線送水	15.872	1,110.900	-30.6510	7,400	800	108.1	113.4
		和泉送水	0.000	0.000	0.0000	6,000	0	0.0	0.0
1系配水区	葛西	葛西配水	200.830	710.530	38.9720	5,500	491	89.2	93.1
	本郷	本郷配水	107.500	211.680	1.3102	7,400	217	29.3	37.1
	上井草	上井草配水	-82.327	996.610	-55.8490	5,400	458	84.9	90.8
2系配水区	練馬	第一城南送水	55.681	59.459	247.1600	13,790	435	31.5	21.3
		練馬配水	239.750	1,076.800	2.7222	4,659	556	119.4	130.0
和泉	第二城南送水	300.590	-265.550	688.4900	1,500	655	436.9	-17.5	
	和泉配水	74.962	343.820	-8.2710	7,400	287	38.8	45.5	
3系配水区	和田堀	和田堀配水	150.630	307.220	0.8270	5,500	215	39.2	47.3
		大蔵	大蔵配水	-19.636	424.820	-49.4500	12,390	447	36.1

Table 2 Simple operation list (the most suitable solution)

簡易演算表(100-95)(10.0-1.0) 最適解

段階	施設名	引入系統名	最適解		最適解		(第一要素)		(第二要素)	
			引入量 m ³ /時	貯水量 の増減	送配水 系統名	送配水量 m ³ /時	水流のエネ kWh	造水コスト 円/時	円/m ³	
浄水場	三郷	原水量	17,000	0	北部幹線送水	9,000	1,306	855,000	95	
		原水量	18,666	0	東南幹線送水	8,000	805	760,000	95	
	朝霞	原水量	9,000	0	上井草送水	13,766	1,383	1,376,615	100	
	東村山	原水量	3,583	0	南北幹線送水	4,900	518	490,000	100	
		境	原水量	3,583	0	和泉送水	9,000	0	900,000	100
1系配水区	葛西	東南幹線引入	8,000	0	葛西配水	8,000	736			
	本郷	南北幹線引入	4,900	0	本郷配水	4,900	131			
	上井草	上井草引入	13,766	0	上井草配水	5,476	465			
2系配水区	練馬	北部幹線引入	9,000	0	第一城南送水	8,290	335			
		和泉	第一城南引入	0	0	練馬配水	4,583	547		
3系配水区	和泉	第二城南送水	4,417	0	第二城南送水	4,417	630			
		和泉	和泉引入	9,000	0	和泉配水	9,000	362		
	和田堀	和田堀引入	3,583	0	和田堀配水	8,000	343			
大蔵	第一城南引入	8,290	0	大蔵配水	8,290	289				
水流のエネ	浄水場	給水所	合計値		総原水量	48,249	7,849	4,739,900	個別最適値	
	最適値	4,011	3,837	7,849		総貯水量	0	10.0	1.0	
実績値	4,428	3,762	8,190		総配水量	48,249	78,487	4,739,900	造水コスト	
削減量	417	-75	342		末端配水量	48,249		4,818,387	最適値	
削減率	9.4	-2.0	4.2		演算誤差	0		重み係数法	min	
									条件	

一方、演算条件については、重み係数を

Table 4-2 Operation list of all districts

造水コスト		(水収支)											(最大値)		
		第一城南 送水管	第二城南 送水管	金町系 直配量	金町系 配水量	板橋系 配水量	芝系 配水量	城北系 配水量	第二城南 配水量	一城支線 配水量	長沢系 直配量	東海系 配水量	系統別送配水量 送配水量	条件	最大値
円/時	円/m ³	m ³ /時													
1,280,000	100			12,800									12,800	≦	15,000
1,860,000	100			18,600									18,600	≦	28,200
1,300,000	100			13,000									13,000	≦	28,700
2,000,000	100												20,000	≦	22,000
400,000	100			4,000									4,000	≦	5,000
900,000	100												9,000	≦	9,000
100,000	100												1,000	≦	1,100
210,000	100												2,100	≦	3,300
													23,380	≦	28,830
													30,900	≦	50,000
2,300,000	100												23,000	≦	27,500
790,000	100												7,900	≦	13,500
1,164,000	100							11,640					11,640	≦	15,040
600,000	100												6,000	≦	7,100
574,000	100												5,740	≦	10,000
0	100												0	≦	6,000
400,000	100												4,000	≦	4,300
899,800	100												8,998	≦	11,346
260,000	100												3,200	≦	3,200
													0	≦	0
103,000	100												1,610	≦	1,700
													0	≦	0
				-6,100									5,500	≦	5,700
					2,800								2,800	≦	3,000
				-2,600	2,600								2,600	≦	4,200
					3,911								3,911	≦	4,947
				-1,983									0	≦	0
				-4,400	7,600								7,600	≦	9,000
				-1,500									0	≦	0
				-4,621	5,973								5,973	≦	8,542
				-4,900	5,500								5,500	≦	8,000
				-3,629	2,700								2,700	≦	4,830
				0	5,000								5,000	≦	5,600
				-2,900									0	≦	0
				-690	1,120								1,120	≦	1,680
						700							700	≦	2,700
						992							992	≦	2,499
						1,497							1,497	≦	1,503
				0									0	≦	0
													4,100	≦	5,200
				-1,400				7,400					7,400	≦	10,600
													0	≦	0
								1,900					1,900	≦	4,600
													0	≦	0
								-1,000					0	≦	0
													4,000	≦	4,100
													5,400	≦	7,000
													5,200	≦	8,400
													21,320	≦	33,610
													7,400	≦	8,700
													11,025	≦	17,286
													4,659	≦	6,756
													23,034	≦	26,414
													7,400	≦	9,400
													5,400	≦	10,100
													0	≦	0
													5,500	≦	5,500
													0	≦	0
													6,400	≦	10,600
													3,500	≦	5,100
													5,600	≦	7,300
													4,300	≦	5,600
													12,390	≦	18,460
													0	≦	0
													3,852	≦	4,117
													0	≦	0
													0	≦	0
													1,530	≦	2,010
													-2,120	≦	2,230
													1,251	≦	1,947
													-6,773	≦	10,086
													6,773	≦	10,086
													3,700	≦	4,940
													0	≦	0
15,140,800	個別最適値	0	3,034	-1,020	37,204	3,189	8,300	42,824	24,100	16,670	7,818	10,473			
	min	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
1.0	重み係数	0	3,034	12,657	37,204	3,189	8,300	42,824	24,100	16,670	7,818	10,473			
15,140,800	造水コスト	第一城南	第二城南	金町系	金町系	板橋系	芝系	城北系	第二城南	一城支線	長沢系	東海系			
15,463,973	最適値	送水管	誤差量	直配量	配水量	配水量	配水量	配水量	配水量	配水量	直配量	配水量			
	min	m ³ /時													

橋・大蔵・八雲・玉川・上池台・東海の22か所がある。そのうち2か所以上の送配水システムを持つ給水所が10か所あるため、送配水システムとしては合計で36系統

になる。その他に、北鹿浜・高井戸・代々木の3か所の増圧ポンプ所がある。従って、浄水場と給水所・増圧ポンプ所を合わせれば、総計で59系統にもなる。

Table 5 Energy properties of all districts

エネルギー特性の表(実績値)

施設名	系統名	水流のエネルギー(二次式)			実績値 m ³ /時	(第一要素)			(第二要素)	
		二次係数	一次係数	定数		水流のエン kWh/時	原単位 Wh/m ³	傾き Wh/m ³	造水コスト	
									円/m ³	円/時
金町	金町4配	64.1710	569.450	2.04080	12,800	836	65.3	73.4	100	1,280,000
	金町3配	-258.1000	1,743.200	-990.01000	18,600	1,359	73.1	78.3	100	1,860,000
	金町5配	39.7090	598.300	-5.23690	13,000	840	64.6	70.2	100	1,300,000
三郷	北部幹線送水	716.35000	-395.2200	1,081.40000	20,000	3,156	157.8	247.0	100	2,000,000
	東南幹線送水	161.71000	876.3200	0.00290	4,000	376	94.1	100.6	100	400,000
三園	練馬送水	-254.36000	1,464.1000	-238.66000	9,000	873	97.0	100.6	100	900,000
	板橋送水	-314.80000	574.6700	0.00350	1,000	54	54.3	51.2	100	100,000
	三園配水	571.66000	788.2900	2.42310	2,100	193	92.0	102.8	100	210,000
朝霞	原水連絡(順)	899.82000	-192.5200	1,624.90000	23,380	6,093	260.6	401.5	0	0
	原水導水	14.35300	437.6400	16.43000	30,900	1,506	48.7	52.6	0	0
	上井草送水	164.68000	571.3000	284.96000	23,000	2,470	107.4	132.9	100	2,300,000
	南北幹線送水	15.87200	1,110.9000	-30.65100	7,900	857	108.5	113.6	100	790,000
東村山	城北線送水	240.15000	-319.0700	94.91100	11,640	49	4.2	24.0	100	1,164,000
	和泉送水	0.00000	0.0000	0.00000	6,000	0	0.0	0.0	100	600,000
	多摩系送水	0.00000	0.0000	0.00000	5,740	0	0.0	0.0	100	574,000
境	境(甲)送水	0.00000	0.0000	0.00000	0	0	0.0	0.0	100	0
	境(乙)送水	0.00000	0.0000	0.00000	4,000	0	0.0	0.0	100	400,000
長沢	長沢線送水	0.00000	0.0000	0.00000	8,998	0	0.0	0.0	100	899,800
砧	大蔵送水	687.25000	970.4500	5.45950	3,200	386	120.7	141.0	100	260,000
	長沢線引入				600					
砧下	砧下配水	670.82000	1,216.7000	2.90510	1,610	216	134.3	143.3	100	103,000
	長沢線引入				580					
水元	北部幹線送水	82.1240	1,437.300	-40.44100	5,500	775	140.9	152.8		
	水元配水	446.7300	657.560	14.66300	2,800	234	83.5	90.8		
北鹿浜	鹿浜配水	179.7200	152.370	0.88620	2,600	53	20.3	24.6		
小右衛門	小右衛門配水	291.4500	588.840	13.34700	3,911	288	73.7	81.7		
南千住	南千住配水	137.4800	859.030	1.21520	7,600	733	96.5	106.8		
亀戸	亀戸配水	439.0600	413.850	24.82000	5,973	429	71.8	93.8		
葛西	葛西配水	200.8300	710.530	38.97200	5,500	491	89.2	93.1		
江東	江東配水	-189.3600	767.190	-39.81600	2,700	154	56.9	66.5		
豊住	豊住配水	142.6400	534.400	-0.82700	5,000	302	60.4	67.7		
(晴海・豊洲含む)										
有明	有明配水	248.6900	839.230	-0.23690	1,120	97	86.5	89.5		
板橋	第一板橋配水	-258.0900	1,267.800	-0.29660	700	87	124.5	123.2		
	第二板橋配水	-170.6600	1,434.500	-0.14800	992	140	141.6	140.1		
大谷口	大谷口配水	1,067.4000	965.470	11.11500	1,497	180	120.0	128.5		
本郷	ポンプ線配水	94.3150	771.450	-4.00400	4,100	328	80.0	84.9		
	南北支線送水	107.5000	211.680	1.31020	7,400	217	29.3	37.1		
芝	芝配水	-524.1300	536.390	-21.55400	1,900	61	32.3	33.7		
上井草	城北補給	183.85000	686.1300	0.14190	4,000	304	76.0	83.3		
	ポンプ所配水	-82.32700	996.6100	-55.84900	5,400	458	84.9	90.8		
	武蔵野送水	939.21000	161.4700	75.01000	5,200	413	79.4	113.8		
	第一城南送水	55.68100	59.4590	247.16000	21,320	627	29.4	29.7		
高井戸	高井戸配水	7.79240	838.3800	-200.09000	7,400	425	57.4	85.0		
	城北補給	51.37500	1,121.5000	-14.51800	11,025	1,284	116.5	123.5		
練馬	練馬周辺配水	239.75000	1,076.8000	2.72220	4,659	556	119.4	130.0		
	第二城南送水	300.59000	-265.5500	688.49000	23,034	1,672	72.6	111.9		
和泉	第二ポンプ所配水	74.96200	343.8200	-8.27100	7,400	287	38.8	45.5		
	淀橋送水	0.00000	0.0000	0.00000	5,400	0	0.0	0.0		
和田堀	第一ポンプ所配水	150.63000	307.2200	0.82700	5,500	215	39.2	47.3		
	代々木送水	0.00000	0.0000	0.00000	3,500	0	0.0	0.0		
	第二城南支線送水	0.00000	0.0000	0.00000	6,400	0	0.0	0.0		
代々木	代々木配水	169.58000	238.3600	2.77610	3,500	107	30.6	35.7		
淀橋	第一ポンプ所配水	420.85000	249.7300	96.29300	5,600	368	65.7	72.1		
	第二ポンプ所配水	79.97800	906.1400	-8.90420	4,300	396	92.0	97.5		
大蔵	第一城南支線送水	-19.63600	424.8200	-49.45000	12,390	447	36.1	37.6		
八雲	八雲配水	-610.58000	1,374.9000	-65.72700	3,852	373	96.9	90.5		
玉川	ポンプ線配水	-2,090.60000	1,326.5000	-39.64200	1,530	114	74.8	68.7		
	上池台送水	0.00000	0.0000	0.00000	1,880	0	0.0	0.0		
上池台	ポンプ線配水	-1,618.10000	1,091.6000	-16.65300	1,251	95	75.6	68.7		
	第二城南支線配水	0.00000	0.0000	0.00000	6,773	0	0.0	0.0		
東海	東海配水	-1,693.00000	2,133.9000	-216.34000	3,700	341	92.3	88.1		

また、引入れ系統については全地区の演算表 (Table 4) の様になっている。

一方、想定する配水区域は、ポンプの吐出圧力 (TP 換算値) の実績値及び周囲との関連性より、9 か所の配水区域 (直配区域 2 か所を含む) を想定した。

因みに、59 系統に関するグラフを作成し二次近似したときの係数は、全地区のエネルギー特性 (Table 5) の様になった (注: 自然流下の係数は全て 0 である。また、13 系統において近似式が凹関数になった)。

2.2 全地区の演算表による演算結果について

全地区の演算表 (Table 4) においては、浄水場の全エネルギーは 19,266 kWh, 給水所の全エネルギーは 13,051 kWh, 合計で 32,317 kWh であった。この演算表で最適化演算を行った結果は、浄水場で 17,263 kWh, 給水所で 10,472 kWh, 合計で 27,734 kWh となり 4,583 kWh の削減、率にして 14.2% の改善であった。

ただし、この演算においては、全ての造水コストを 100 円/m³ にしており、第二の要素に関する最適化は行っていない。

一方、送配水量に関するこの変化については紙面の都合で詳しく述べられないが、主な変化について記すと、影響が大きい数値は朝霞浄水場の原水連絡に関連するものである。当初の原水連絡から東村山・和泉送水量分の、6,000 m³/時が減っており、それを補うため朝霞浄水場の上井草送水量や南北幹線送水量が、それぞれ約 4,500 m³/時増えている。反対に、自然流下の境浄水場や長沢浄水場は最大限の送水量を出している。一方、東海給水所の引入量を見ると、山越えルート of 第一城南支線からは、0 m³/時になる半面、全量が海越えルート of 東南幹線からの引入れになっている。

2.3 最適運用計画の自動演算について

全地区の演算表 (Table 4) は、未知数の値として実績値を設定した演算表であり、エクセルのソルバー機能により最適解を求めるものである。しかし、未知数の部分を全て 0 にした場合から演算をスタートさせても、一部に収斂の違いによる誤差が生じるものの、ほぼ同様な最適解が得られる。即ち、配水量予測を適切に行い各配水区域の時間計画配水量が確定できれば、水配システム上の全ての浄水場や給水所の送配水量や引入量が自動演算できる。しかも、全水流のエネルギーや全造水コストを最小化した最適解 (パレート解) として、10 秒程の演算時間で得られる。

3. 演算のためのデータの加工について

3.1 水流のエネルギー特性について

第一の目的関数である水流のエネルギーの総量を求めるためには、系統ごとの流量に対する水流のエネルギー特性を知る必要がある。そして水流のエネルギーを求める式は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{水流のエネルギー} &= \\ & \text{係数} \times \text{吐出流量} \times \text{ポンプの実揚程} \\ \text{ポンプの実揚程} &= \\ & \text{ポンプの吐出圧力} - \text{配水池の水位} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{配水池の水位} &= \\ & \text{貯水量} \div \text{配水池の床面積} \end{aligned}$$

使用した各種 (吐出流量・ポンプの吐出圧力・貯水量などの TP 換算値) のデータは、前出の 4 日間の時間データを使用している。その結果得られたグラフと近似式は、本郷配水の例 (Fig. 2) の様になった。同様に 59 系統のグラフと近似式を作成した。また、作成したグラフの決定係数 (R²) の内訳は、0.99 台が 23 系統, 0.98 台が 6 系統, 0.97 台が 7 系統, その他の 0.9 台が 9 系統, 0.8 台が 3 系統, 0.6 台が 1 系統, 自然流下が 10 系統であり、殆どのケースで良好な数値を示していた。

一方、目標圧制御をしている配水系統や到達圧 (越流堰の高さ) が一定と考えられる送水系統に関しては、その流量と損失圧 (吐出圧力 - 到達圧) の関係から、ヘーゼン・ウイリアムスの式を疑似的 (管路網を短管として仮定) に当て嵌めたグラフを作成した。これにより得られた H. W. 式の決定係数 (R²) の内訳は、0.99 台が 2 系統, 0.98 台が 5 系統, 0.97 台が 1 系統, その他の 0.9 台が 11 系統, 0.8 台が 8 系統, 0.7 台が 3 系統, 0.6 台が 2 系統, 0.4 台が 1 系統, 0.1 台が 2 系統であり、殆どのケースで良好な数値を示していた。例として、本郷配水に関するグラフは流量係数 (Fig. 6) である。ここでの到達圧 (日比谷公園 1600 のテレメータ値) は同配水区域を代表する圧力である。その決定係数は、0.95 であり、H. W. 式で近似できることが分かる。なお、同式の定数項は圧力の TP 換算値の誤差から生じているものと思われる。上記の特性が利用できれば、吐出圧制御と流量制御とを区別する必要がなくなる可能性がある。

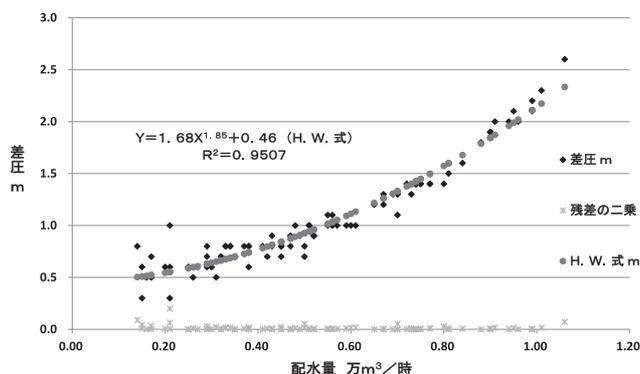


Fig. 6 Flow quantity coefficient of the Hongo water supply

3.2 給水施設などの水収支について

同様に 4 日間の時間データを基に、浄水場や給水所の引入量や配水量および貯水量の水収支を調べたところ、その誤差は殆どのケースで無視できる程度であっ

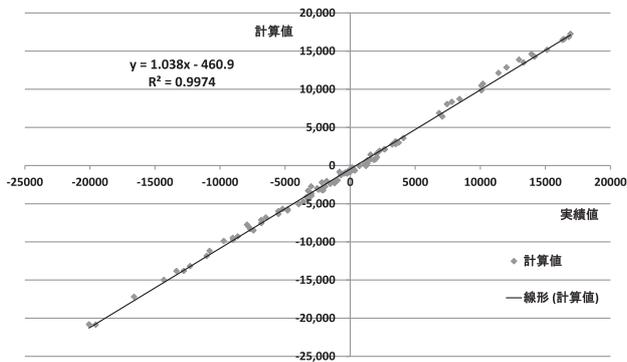


Fig. 7 Coefficient of correlation of the Kamiigusa reservoir

た。また、幾つかの給水所に関しては、水位計から求めた貯水量の増減値を横軸に、引入量と配水量の差から求めた貯水量の増減値を縦軸に取ったグラフを作成し、その相関係数と一次近似式の傾きを求めた。相関グラフ (Fig. 7) は上井草給水所の配水池に関するものである。その相関係数はほぼ1であり、一次近似式の傾きもほぼ1であった。従って、かなりの正確さであることが分かる。

4. ま と め

本研究は、まず東京都区部の配水区域内にある主な浄水場 (三郷・朝霞・東村山等) と給水所 (練馬・上井草等) から構成される簡易モデル (Fig. 1) を想定し、これに多目的非線形計画法 (二目的二次計画法) を適応し、エクセルに標準装備されたソルバー機能による最適化演算を行った。その結果、パレート解の図 (Fig. 3) の様な滑らかである程度連続した最適解が得られることが判明した。次に、この手法を東京都区部の実水配システムに拡張し、実データを基に最適化演算を行った。その結果は、送配水に要する全水流のエネルギーが 14.2% も削減できることが判明した。さらに、この演算は流量の初期値が 0 であっても、ほぼ同様な最適解が得られことが判明した。従って、このソフト (全地区の演算表 (Table 4)) は最適運用計画の自動演算ソフトとしても活用できるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 中山弘隆, 谷野哲三, 共著: 多目的計画法の理論と応用, (社) 計測自動制御学会

The Multi-objective Programming Applied to Real System of Water Supply

Yuuji Kumaki

Training & Development Center, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

(E-mail : kumaki-yuji@waterworks.metro.tokyo.jp)

Abstract

The electric energy required for water service business of the Tokyo Waterworks Bureau occupies approximately 1% of the total electric energy of the Tokyo Electric jurisdiction. In addition, approximately 80% of those are used by pumps. On the other hand, there is the water supply system constructed at ten places of water purification plants and 22 places of water stations in the ward of Tokyo. This study demonstrates that the most suitable solution (Pareto solution) minimizing the energy of all currents required for this water supply system and a water purification cost is easily found using a Solver function shipped with for Excel.

Key words : multi-objective programming, system of water supply, energy of water flow, pareto solution, auto-calculate