

4. 下水処理場の既存施設能力を活用した 汚水処理システムの効率化に関する研究

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 藤井都弥子
研究官 松本 龍

1. はじめに

汚水処理システムには、下水道、農業集落排水、し尿処理場等がある。地方公共団体は、それぞれの地域の特性に応じた汚水処理システムを採用しており、全国の汚水処理人口普及率（2015年度末）は89.9%に達している。一方、2010年頃まで増加していた日本の総人口は減少を始め、現在の1億3千万人程度から、国立社会保障・人口問題研究所の中位推計によると、2065年には8800万人程度になると見込まれている（図-1）¹⁾。

汚水処理システムは、人口減少により処理水量の減少に伴う必要施設能力の低下や使用料収入の低下、また施設の老朽化による改築・更新費の増加等から、施設の稼働率、採算性の低下が課題となっている。そのため、改築更新時においては、同じ汚水処理システム内での統廃合、異なる汚水処理システム間での統廃合などを踏まえて汚水処理システムの効率化について検討を進める必要がある。

本研究では、人口減少社会に伴う汚水処理システムの非効率化に対応するため、地域ごとの最適な汚水処理方式及び運営シナリオの評価方法の提案と、下水処理場を核とした汚水等一括処理時の課題把握を行い、地域における効率的な汚水処理の評価方法、課題への対応方策を提示するものである。本研究は、平成27年度から平成29年度までの3か年で実施し、施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討（平成27～28年度）、し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討（平成28～29年度）、施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価（平成28～29年度）を踏まえ、汚水処理システムの効率化検討のための技術資料案として取りまとめ、地方公共団体が活用できるように公表する予定である。

汚水処理システムの効率化に関するコスト面の検討では、施設の稼働率を踏まえた維持管理費を用いることで実態に即した結果を得ることができる。過年度の研究²⁾において、同一処理場における稼働率と維持管理費の関係の経年変化より、稼働率が高くなると処理量当たりの消費電力量が小さくなる傾向を確認した。本稿では、施設更新時のコスト・エネルギー算定手法の検討結果、し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討状況、施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価における仮想都市における整備シナリオ例について述べる。

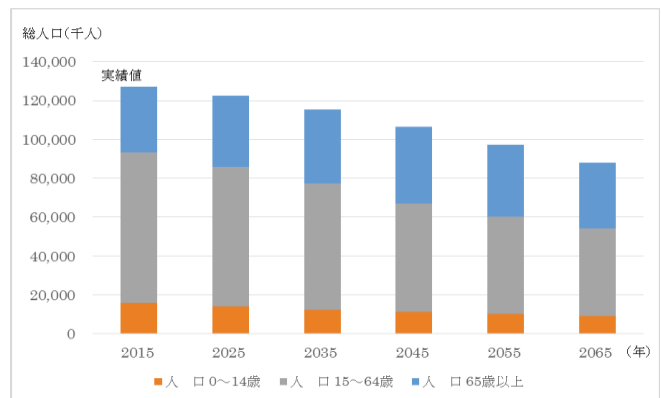


図-1 人口推計

2. 調査方法

2.1 施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討

本研究では、下水道、農業集落排水、し尿処理場の汚水処理システムを対象とした（以下、各汚水処理システムの施設を「下水処理施設」、「農業集落排水施設」、「し尿処理施設」と呼ぶ。）。特に、人口減少による処理水量の減少により、費用面での影響を大きく受けると考えられる中小規模の処理場を対象とした。施設規模として、下水処理施設は日最大汚水量 10,000m³/日以下を対象とし、農業集落排水施設、し尿処理施設においても同程度の施設規模以下を対象とした。処理方式として、対象とした施設規模の 8 割程度を占める処理方式を選定した。下水処理施設はオキシデーションディッチ法（以下、「OD 法」と呼ぶ。）、標準活性汚泥法（以下、「標準法」と呼ぶ。）、農業集落排水施設は JARUS- I、III、X I、X II、X IV とした。し尿処理施設は、下水処理施設、農業集落排水施設に比べ処理場の箇所数が少ないことから、処理方式を特定しないこととした。また、汚泥脱水工程までを調査の対象範囲とした。

(1) 稼働率と消費電力量の関係の実態調査

統計資料、事業者へのアンケート調査により、過去 10 年間程度の処理場における処理能力、処理量、消費電力量を調査した。下水処理施設は、下水道統計³⁾より実績値を収集できるため、平成 16 年度から平成 25 年度までの下水道統計を用いて整理した。農業集落排水施設とし尿処理施設は、事業者へのアンケート調査により、平成 18 年度から平成 27 年度までの実績値を用いて整理した。調査先は、上述した処理能力、処理方法及び脱水工程までの処理場を選定した。また、安定した運転時の幅広い稼働率での実績値を収集するため、供用開始後 5 ヶ年以上を経過した処理場、他処理場の汚泥受入を行っていない処理場、過去 10 年間の稼働率差が 10% 以上ある処理場等の条件に該当する処理場から選定した。各汚水処理システムの調査施設数を表-1 に示す。

表-1 調査施設数

	調査数	有効 回答数 (施設)
下水処理施設 (OD法)	125	125
下水処理施設 (標準法)	50	50
農業集落 排水施設	100	71
し尿処理施設	47	33

各処理場における過去 10 年間程度の稼働率と消費電力量の傾向より、各処理場における稼働率と電力係数の関係を整理した。ここで、稼働率は以下の式で示され、処理能力相当の処理を実施する場合の各汚水処理システムの稼働率は、下水処理施設：70%、農業集落排水施設：100%、し尿処理施設：87%となる。電力係数は以下の式（下水処理施設の例）で示され、単位消費電力量が定格運転時に比べ大きいと電力係数は 1 以上となる。

$$\text{稼働率}[\%] = \text{年間平均処理量}[\text{m}^3/\text{日}] / \text{日最大処理能力}[\text{m}^3/\text{日}] \times 100$$

※農業集落排水施設においては、分母を日平均処理能力[m³/日]とする。

$$\text{電力係数}[-] = \frac{\text{ある稼働率での単位消費電力量}[\text{kWh}/\text{m}^3]}{\text{稼働率 70\%時の単位消費電力量}[\text{kWh}/\text{m}^3]}$$

(2) 稼働率と維持管理費の関係の実態調査

事業者へのアンケート調査により、平成 26 年度の処理能力、処理量、消費電力量、維持管理人員数、主要設備の定格電力、薬品費、保守点検費等を調査した。主要設備とは、下水処理施設は流入ポンプ、送風機、水中機械攪拌機、返送汚泥ポンプ、汚泥濃縮設備、汚泥脱水設備、脱臭ファンとした。農業集落排水施設、し尿処理施設については、消費電力量が大きい設備を

表-2 調査施設数

	調査数	有効 回答数 (施設)
下水処理施設 (OD法)	106	84
下水処理施設 (標準法)	28	27
農業集落 排水施設	100	78
し尿処理施設	91	72

5 から 10 設備程度調査した。各污水处理システムの調査施設数は表-2 に示す。また、メーカーヒアリングにより、維持管理費について不足する情報を補完した。各污水处理システムの維持管理費は、電力費、維持管理人件費、薬品費、保守点検費より算出し、電力費単価は 15 円/kWh、人件費は 700 万円/人と計上した。

各污水处理システムの稼働率と電力係数の関係と、維持管理費・電力費の費用関数より、稼働率と維持管理費の関係を整理した。ここで、維持管理費は維持管理係数を用いて整理した。維持管理係数は以下の式（下水処理施設の例）で示され、維持管理費原単位が定格運転時に比べ大きいと維持管理係数は 1 以上となる。

$$\text{維持管理係数}[-] = \frac{\text{ある稼働率での維持管理原単位}[\text{円}/\text{m}^3]}{\text{稼働率 70\% 時の維持管理費原単位}[\text{円}/\text{m}^3]}$$

事業者へのアンケート調査の回答を得た平均稼働率における施設全体の維持管理費、電力費の費用関数より、固定維持管理費を算出し、電力係数より、稼働率 70% 時（下水処理施設の場）での維持管理費を算出した上、稼働率と維持管理係数の関係を明らかにした。

2.2 し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討

下水処理場にし尿・汚泥等を受け入れた際に生じる課題等を把握するため、先行してし尿・汚泥等を受け入れている全国的な事業者にアンケート調査を行った。アンケート調査は 50 施設に対して行い、有効回答数は 41 施設となる。アンケート調査では、し尿・汚泥等の投入箇所、汚泥の前処理施設の有無及び前処理の内容、受け入れにあたっての汚泥性状や経費に関する検討の有無及び検討内容、受け入れ後に生じた課題の有無及びその内容等を調査した。

2.3 施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価

污水处理システムの効率化検討においては、コスト面、技術面、環境面を踏まえて総合的に方針を決定する必要があることから、効率化検討の先行事例を自治体へのアンケート調査、コンサルタント等の公表資料から収集し整理した。自治体は 13 箇所、コンサルタント等の公表資料は 10 件より収集した。また、先行事例の調査結果等を踏まえ、污水处理システムの効率化検討の技術資料素案を作成した。

仮想都市における整備シナリオ例を、本素案に沿って整理し、污水处理施設の規模縮小、再編、既存施設能力活用の各ケースを試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。また、規模縮小、再編、既存施設能力活用の用語は、それぞれ以下のとおり定義した。

規模縮小：現状及び将来の流入水量等の見通しより、必要となる処理能力を確認し、適切な施設能力で污水处理施設を個々に更新し、効率化を図っていくケース。

再編：同じ污水处理システム内の処理区間や、他の污水处理システムにおける統廃合（下水処理施設に農業集落排水施設等を統合等）することで、一方の処理施設を廃止し、効率化を図っていくケース。

既存施設能力活用：規模縮小と再編以外のケース。例として、し尿処理施設を廃止後、前処理施設に改造して下水処理施設に投入や、汚泥処理系の集約（スクラムや流域汚泥処理事業等）などの手法が挙げられる。

3. 結果及び考察

3.1 施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討

(1) 稼働率と電力係数の関係

稼働率と電力係数の関係を処理場ごとに整理し、その上で汚水処理システムごとの関係を整理した。稼働率ごとの電力係数を処理場ごとに算出し、各稼働率における複数処理場の電力係数の中央値を当該稼働率の電力係数とした。各汚水処理システムにおける稼働率と電力係数の関係を図-2に示す。

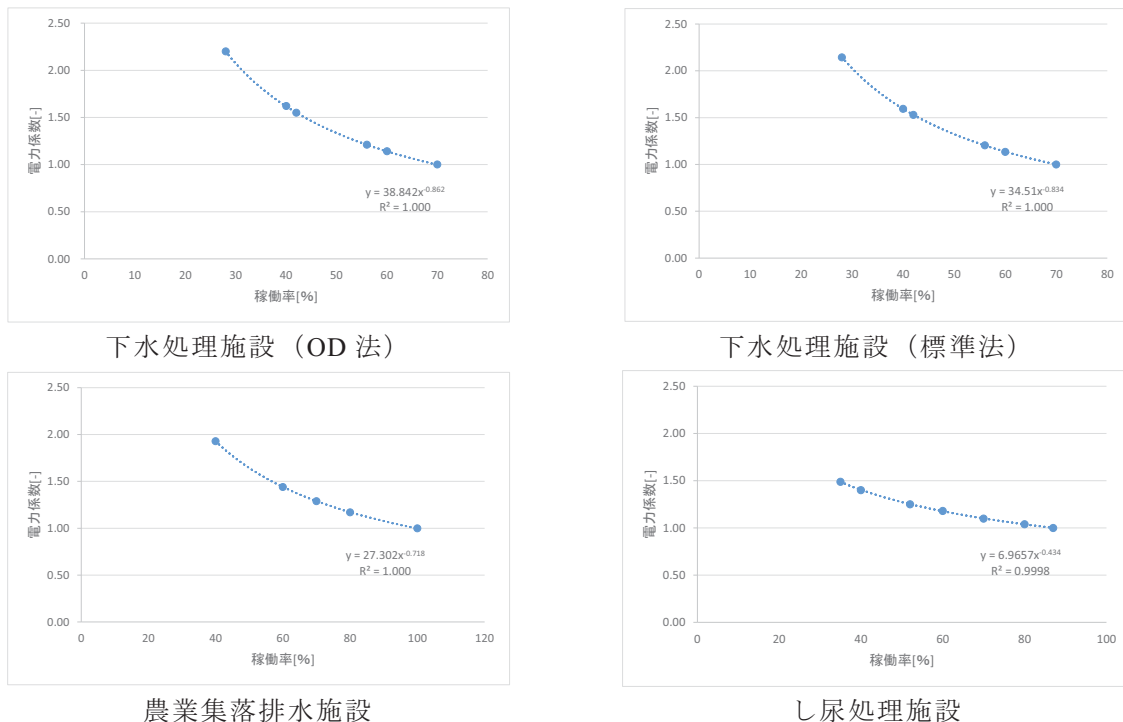


図-2 各汚水処理システムにおける稼働率と電力係数の関係

稼働率と電力係数の相関より、全ての汚水処理システムにおいて、稼働率が低下すると、電力係数が増加していることが明らかとなった。これは、施設規模が中小規模である処理場を対象としているため、流入水量の変動に対してブロワの台数制御等を行わない処理場が多く、流入水量が減少しても電力消費量はそれほど減少しないためであると考えられる。また、し尿処理施設においては、稼働率が低下した際の電力係数の増加率が、その他の処理施設に比べ小さくなっている。これは、し尿処理施設は収集したし尿を貯留した後、ほぼ一定量で処理設備に投入し処理するため、1日の処理量の変動が比較的小さくなるためであると考えられる。

(2) 稼働率と維持管理費の関係

下水処理施設 (OD 法) の場合の維持管理費と維持管理費係数の試算結果を表-3に示す。また、表-3により算出した維持管理係数を用いた各汚水処理システムにおける稼働率と維持管理係数の関係を図-3に示す。

稼働率と維持管理係数の相関より、全ての汚水処理システムにおいて、稼働率の減少に伴い、処理量あたりの維持管理費が増加する (処理原価の増大) 傾向を係数化することができた。これより、現状の稼働率と維持管理原単位及び将来の稼働率より、将来の稼働率における維持管理費を推算することができる。また、稼働率ごとの消費電力量から、エネルギーを推算することができる。

表-3 維持管理費と維持管理費係数の試算結果（下水処理施設（OD法）の例）

電力費原単位 (a)		(円/m ³)					電力係数
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000	
28 (40)		20.7	16.9	14.4	13.2	12.3	2.2
42 (60)		14.6	11.9	10.2	9.3	8.7	1.6
56 (80)		11.4	9.3	7.9	7.2	6.8	1.2
70 (100)		9.4	7.7	6.6	6.0	5.6	1.0

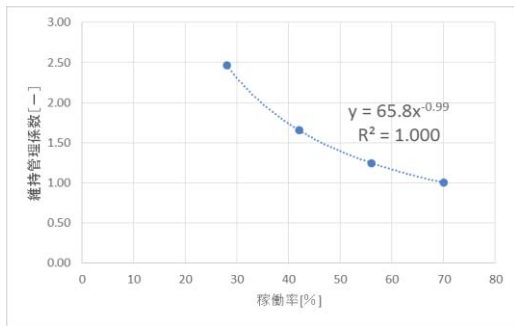
電力費 (A)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		2,117	4,307	7,370	10,092	12,612
42 (60)		2,240	4,556	7,796	10,674	13,340
56 (80)		2,331	4,741	8,112	11,108	13,882
70 (100)		2,406	4,894	8,375	11,468	14,332

固定費 (B)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
-		26,701	44,628	65,654	82,188	96,331

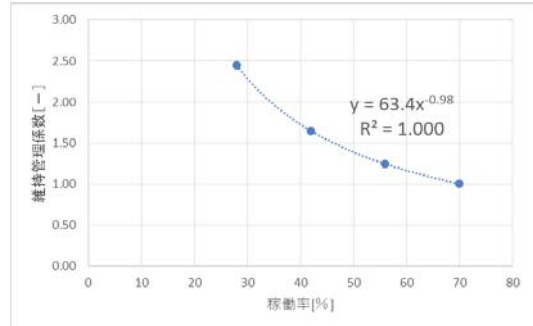
維持管理費 (T=A+B)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		28,818	48,936	73,024	92,280	108,943
42 (60)		28,941	49,184	73,450	92,863	109,671
56 (80)		29,032	49,369	73,766	93,296	110,213
70 (100)		29,107	49,523	74,029	93,656	110,662

維持管理費原単位		(円/m ³)				
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		282.0	191.5	142.9	120.4	106.6
42 (60)		188.8	128.3	95.8	80.8	71.5
56 (80)		142.0	96.6	72.2	60.9	53.9
70 (100)		113.9	77.5	57.9	48.9	43.3

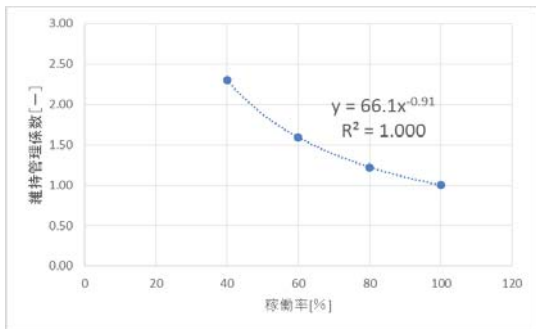
維持管理係数		係数 (平均値)				
稼働率(%)	処理能力 [m ³ /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		2.48	2.47	2.47	2.46	2.46
42 (60)		1.66	1.66	1.65	1.65	1.65
56 (80)		1.25	1.25	1.25	1.25	1.24
70 (100)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



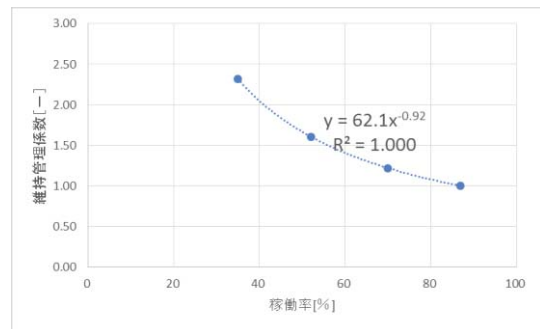
下水処理施設（OD法）



下水処理施設（標準法）



農業集落排水施設



し尿処理施設

図-3 各汚水処理システムにおける稼働率と維持管理係数の関係

3.2 し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討

し尿・汚泥等受入時の課題に対するアンケート調査結果を図-4に示す。受入処理場の約2割(8/41)で、汚泥処分費の増加、維持管理に掛かる経費や手間の増加といった課題等があることを確認した。なお、課題があると回答のあった8施設のうち、半数以上はし尿等の受入割合(受入量/受入前の計画処理量)が比較的大きい(1割以上)。このことから、し尿等の受入割合が課題等の発生に影響することが考えられる。

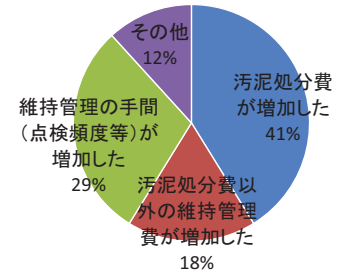


図-4 し尿・汚泥等受入時の課題のアンケート調査結果

3.3 施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価

人口減少に伴う汚水処理施設の稼働率の減少の影響等を踏まえた、コスト面、技術面、環境面における効率的な汚水処理システムの評価方法を技術資料素案として作成した。仮想都市における整備シナリオ例を、本素案に沿って整理し、汚水処理施設の規模縮小、再編、既存施設能力活用の各ケースを試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。試算に用いた更新費、維持管理費の費用関数を表-4に示す。なお、以降において、「持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構想マニュアル」(平成26年1月国土交通省、農林水産省、環境省)4)を「都道府県構想マニュアル」と呼ぶ。今回策定した効率的な汚水処理システムの評価手法の検討フロー図及び都道府県構想マニュアルとの関係を図-5に示す。

表-4 各汚水処理システムにおける費用関数一覧

区分	施設	Xの値	Xの単位	適用範囲	試算式	備考		
更新費 建設費 [千円]	下水処理施設	●処理場全体建設費※1	処理能力	m ³ /日	10,000~50,000m ³ /日	$y = 1,550,000(x/1,000)^{0.58} \times (103.3/101.5)$	(焼却なし・参考)	
		●処理場全体機械設備更新費	処理能力	m ³ /日	1,000~10,000m ³ /日	$y = 72,734x^{0.26}$		
		●水処理系機械設備	処理能力	m ³ /日	1,000~10,000m ³ /日	$y = 978.8x^{0.59}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m ³ /日	~299m ³ /日	$y = 14,680x^{0.49}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m ³ /日	300~1,300m ³ /日	$y = 505,000(x/1,000)^{0.64}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m ³ /日	1,400~10,000m ³ /日	$y = 1,380,000(x/1,000)^{0.42} \times (103.3/101.5)$		
	共通	●水処理系機械設備	処理能力	m ³ /日	1,000~10,000m ³ /日	$y = 1,580x^{0.66}$		
		●汚泥処理系※2	処理能力	m ³ /日	15~170m ³ /日	$y = 112,140x^{0.26}$		
		●脱臭設備(活性炭)	処理能力	m ³ /日	1,000~10,000m ³ /日	$y = 125,019x^{0.04}$		
	農業集落排水施設	●処理場全体建設費	計画人口	人	-	$y = 2271.2x^{0.6663}$		
	し尿処理施設	施設全体	●標準脱窒素処理	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 237,636x^{0.4571}$	
			●高負荷脱窒素処理	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 796,386x^{0.1031}$	
			●高負荷膜分離	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 766,089x^{0.0971}$	
		前処理施設※3 (機械設備更新)	●浄化槽汚泥の比率高い脱窒素	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 226,590x^{0.4569}$	
			●標準脱窒素処理、高負荷膜分離	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 57,548x^{0.5274}$	
●高負荷脱窒素処理			処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 55,786x^{0.5207}$		
新設※4	●浄化槽汚泥の比率高い脱窒素	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 121,642x^{0.4949}$			
	●前処理+2倍希釈	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 234,173x^{0.4582}$			
	●MP建設費	基数	基	-	9,200千円/基	機械電気設備のみ、ポンプ設備は2台		
管路施設	新設	●自然流下管建設費(下水道)	延長	m	-	63千円/m		
		●圧送管建設費(下水道)	延長	m	-	45千円/m		
		●管きよ建設費(集落排水)	延長	m	-	56千円/m		
		●管きよ建設費(農業)	延長	m	-	31千円/m		
維持 管理費 [千円/ 年]	下水処理施設	●処理場全体	処理能力	m ³ /日	1,000~10,000m ³ /日	$y = 2,468x^{0.382}$	(焼却なし・参考)	
		●処理場全体	処理能力	m ³ /日	10,000m ³ /日以上	$y = 18,800(x/1000)^{0.69} \times (103.3/101.5)$		
		●処理場全体	処理能力	m ³ /日	300~1,300m ³ /日	$y = 19,000(x/1000)^{0.78}$		
	農業集落排水施設	●処理場全体	処理能力	m ³ /日	1,400~10,000m ³ /日	$y = 28,600(x/1000)^{0.58} \times (103.3/101.5)$		
		●処理場全体	計画人口	人	-	$y = 37,811x^{0.6835}$		
	し尿処理施設	●施設全体	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 17,845x^{0.57}$		
		●前処理施設	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 6,716x^{0.2692}$		
	管路施設	●MP	基数	m	-	220千円/基/年		
		●管きよ(下水道)	延長	m	-	60円/m/年		
		●管きよ(農業)	延長	m	-	31円/m/年		

※1 土木、建築、機械、電気を含む
 ※2 汚泥濃縮への投入汚泥量は、TS1%を想定して設定
 ※3 し尿前処理施設の改造は、受入施設(トラックスケール、し尿除去装置等)、前処理施設(破砕機、ドラムスクリーン等)、貯留施設(攪拌機、攪拌プロウ等)に加えて、脱臭設備を見込む
 ※4 し尿前処理の新設費は建築、土木、機械、電気等すべての建設費を見込む
 ※5 「都道府県構想マニュアル」以外の費用関数は平成26年度単価で試算
 ●の記載は「都道府県構想マニュアル」に記載されている費用関数

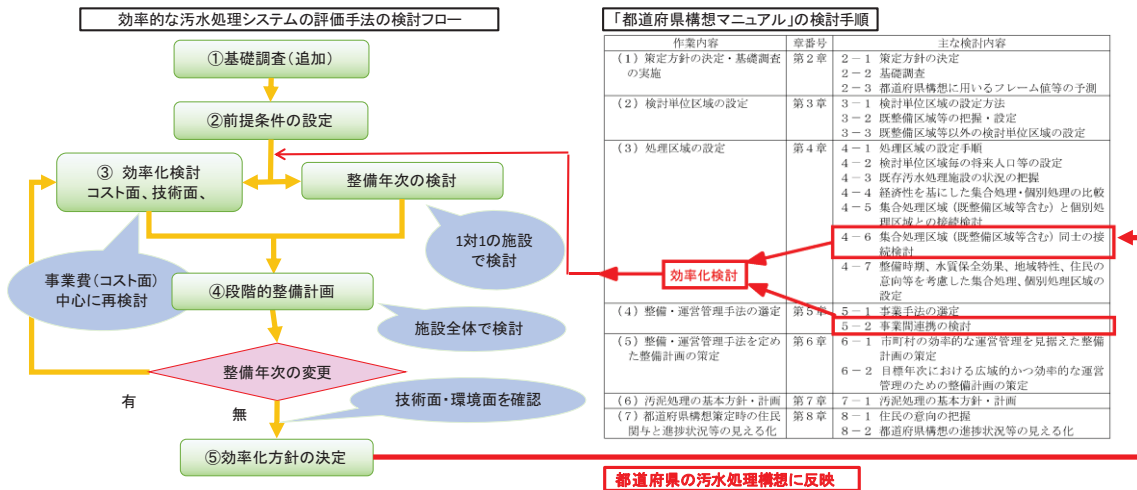


図-5 効率的な汚水処理システムの評価手法の検討フロー図及び都道府県構想マニュアルとの関係

ここでは、仮想都市における整備シナリオ例の一例を示す。本整備シナリオ例における仮想都市は、汚水処理システムが下水処理施設しかない場合を想定した。仮想都市では、下水道の処理区域を二つ（A処理区とB処理区）有し、平成28年度を現況値とした平成51年度までの計画汚水量の将来予測を図-6に、二つの処理区の現況の施設能力、稼働率を表-5にそれぞれ示す。

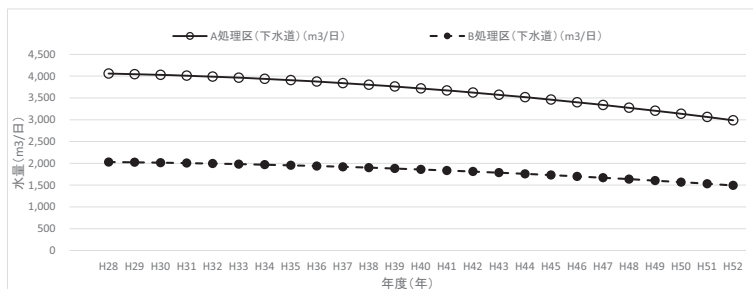


表-5 処理方式、施設能力及び、稼働率

	A処理場	B処理場
処理方式	標準法	OD法
処理能力 (m³/日)	9,000	4,700
稼働率 (%)	45	43

図-6 水量予測結果

仮想都市における検討ケースのイメージ図を図-7に示す。仮想都市において、検討ケースごとにコスト面、技術面、環境面における試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。図-8及び表-6に示すとおり、各処理場における設備の更新時期を踏まえ、ライフサイクルコストのほか、技術面としては効率化に伴う課題への対応方策の確認（管きよの流下能力や処理能力等）、環境面としては消費エネルギー量、温室効果ガス排出量について評価を行っている。本整備シナリオ例では、B処理区をA処理区に接続し、B処理場を廃止する再編が最も効率的となる。

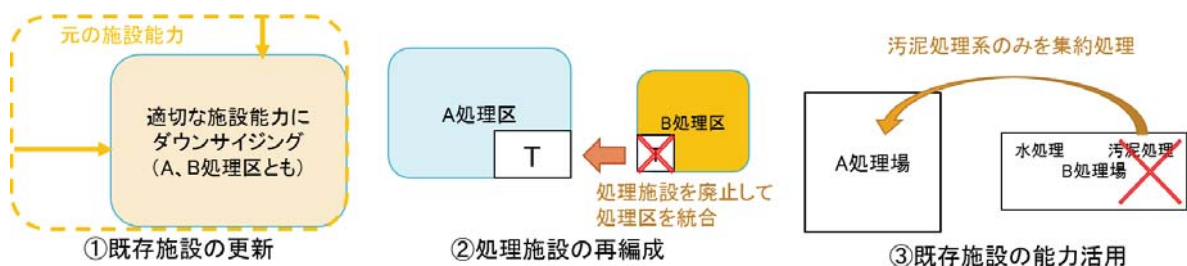


図-7 検討ケースのイメージ図

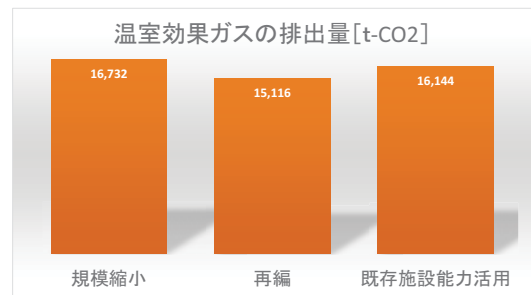
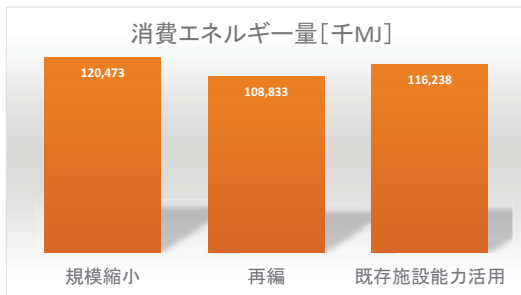
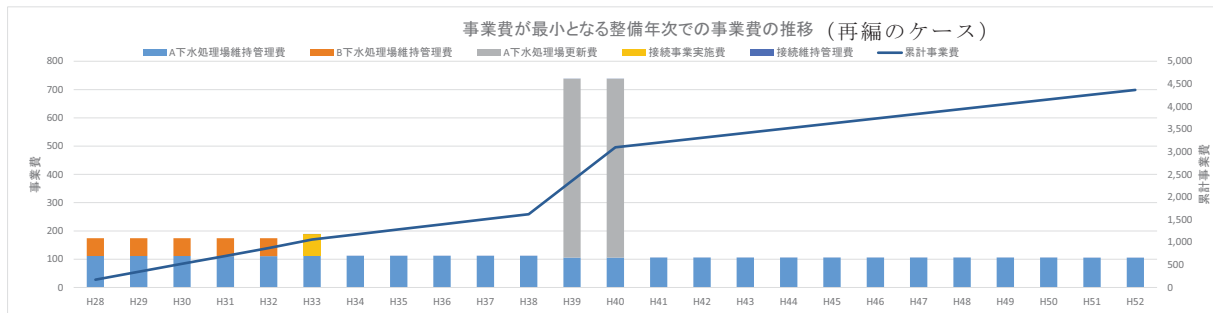


図-8 整備シナリオ試算結果

表-6 整備シナリオ試算結果

項目		パターン1	パターン2	パターン3
概要		規模縮小	再編	既存施設能力活用
		A、B下水処理場それぞれをダウンサイジング	B下水処理場をA下水処理場に接続	B下水処理場の汚泥処理系をA下水処理場に接続
コスト (25年間)	総額	5,879 百万円	4,368 百万円	5,016 百万円
	年価	235 百万円/年	175 百万円/年	201 百万円/年
技術面		現施設更新のため検討省略	管きよ流下能力等	処理能力等
環境面 (25年間)	消費エネルギー量	120,473 千MJ	108,833 千MJ	116,238 千MJ
	温室効果ガス排出量	16,732 t-CO ₂	15,116 t-CO ₂	16,144 t-CO ₂
評価		△	◎	○

4. おわりに

今年度の研究において、稼働率を踏まえたコスト・エネルギーの算定手法の確立、汚水処理システムの効率化検討における評価方法の素案を策定し、仮想都市における整備シナリオ例を試算・検討し、妥当性の確認を行った。次年度は以下の事項を調査・検討し、汚水処理システムの効率化検討のための技術資料案として取りまとめ、地方公共団体が活用できるように公表を行う予定である。

- ・し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の詳細な実態調査を実施し、課題への対応方策を整理
- ・効率的な汚水処理システムの評価手法について、実都市でのモデルケース検討を実施

【参考文献】

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所 日本の将来推計人口（平成29年推計），2017年4月
- 2) 松本ら（2016）第53回下水道研究発表会講演集，pp.344-346
- 3) (公社)日本下水道協会 下水道統計（平成15年度版～平成25年度版）
- 4) 国土交通省、農林水産省、環境省 持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構想マニュアル，2014年1月