

農業集落排水施設における流入動態と
運転管理の適正化に関する研究

The Study on Influent Dynamic State and Optimization of
Operation Management in Rural Wastewater Treatment Facilities

李 雨桐

2019 年

要 旨

農業集落排水施設は、1973年に農村総合整備モデル事業の一工種として整備が始められて以来、2016年度までに5,356地区で供用を開始しており、これらの維持管理が大きな課題となっている。また、環境問題への意識の高まりに加えて、閉鎖性水域での富栄養化防止対策や上乘せ規制の強化等から、上乘せ規制等による高度な水処理をより経済的に確保することが求められている。農業集落排水施設に関しては、これまで処理性能やその影響要因に関する先行研究はなされているが、運転の効率化に関する調査研究はほとんどなされていないのが実情である。

このような状況を踏まえ、供用中の農業集落排水施設について、流入負荷に係る水道水量、降水量、供用率、立地条件など変動要因と流入汚水量動態を把握するとともに、状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出を試みた。農業集落排水施設の維持管理費の軽減を図り、運転管理の効率化を進める観点から、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式を対象に、ばっ気槽管理とBOD除去性能に係る検討し、経済的に所要の性能を確保できるようなばっ気槽運転管理手法を提案した。得られた研究成果を要約すると、以下のとおりである。

1. 農業集落排水施設の日流入汚水量には、土地利用・立地条件が関与しており、処理区の土地利用・立地条件を水道水量と降水量に加味することで、これらを説明変数とする重回帰推定式から日流入汚水量を精度よく推定できることを明らかにできた。時間流入汚水量の日間変動には、管路延長、供用率、流入人口率が関与しており、時間水量日変動幅とピーク係数はこれらを説明変数とする重回帰推定式から設計基準値を設定できることが示唆された。

2. 日流入水量はトレンド成分、季節変動成分、週間変動成分、及び降雨による変動成分に分離されるとともに、状態空間モデル解析により日流入水量の有する周期的な変動特性や観測データと対応した特徴を抽出できることが確認できた。日水量負荷変動には、供用人口に対応して変動する水道使用量、降水量、流入人口動態、お盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動が関与していることが示唆された。状態空間モデルによる解析は、季節変動成分の解釈や降水に伴う変

動成分予測精度に課題が残るものの、農業集落排水施設の日流入水量の変動特性の把握には活用できるものと考えられる。

3. 連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設の BOD 除去性能確保に関して、ばっ気槽 1 室のばっ気終了時の ORP 管理範囲 100~125mV を明らかにするとともに、ばっ気装置散気方式、ばっ気強度、ばっ気時間等による DO 挙動特性と BOD 除去性能確保に必要なばっ気終了時の DO 濃度を把握した。総括酸素移動容量係数 (K_{La}) にはばっ気槽の活性汚泥粘度が関与しており、ばっ気強度、水温、MLSS を説明変数とする重回帰式から推定できることが確認された。BOD 除去速度恒数はばっ気強度、ばっ気時間、及び槽内水温を説明変数とする重回帰式から推定できることが示唆された。ばっ気強度 ($0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$) とばっ気時間 (30min) を組み合わせたばっ気槽の運転操作を通じて、少ないばっ気空気量で高い BOD 除去性能を得るなど農業集落排水施設の運転管理効率化が図られることが示された。

本研究成果が計画諸元の適切な設定や農業集落排水施設における適切な設計諸元の設定や管理手法の確立等に反映され、維持管理コストの一層の低減や維持管理性の向上等を通じて、全国の農業集落排水施設の整備と管理が円滑に進められることが期待される。

Abstract

By the year of 2016, there are 5,356 rural sewerage facilities in operation, which are provided as one of rural comprehensive improvement model projects since 1973 in Japan. It is recognized that operation and maintenance of these rural sewerage facilities become of great importance to the administrative functions of municipalities. While the concerns to the environmental issue have been raised, it should be noted that high-degree wastewater treatment is required with more economically because of prevention eutrophication in closed water area and strengthening of effluent regulation. There are several previous studies discussed about treatment performance and its influence factors, but few studies have been done to investigate the operation efficiency of rural sewerage facilities.

This study used qualitative case studies approach to investigate fluctuation factors such as drinking water usage, precipitation, utilization rate, location conditions etc. and inflow dynamics of rural sewerage facilities in service. It also made an attempt to separate the variation of inflow load and extract characteristics by using State-space analysis. Focused on several intermittent aerobic suspended-growth processes facilities, this study also discussed BOD removal performance and provided efficient management process with the aim of reducing maintenance cost. The results are summarized below:

1. This study analyzed maximum daily flow rates, average daily flow rates and minimum daily flow rates with examination of fitting non-excess probability distribution in order to comprehend the actual situation of sewerage flow rates on observed rural sewerage facilities. The discussion on influence factors of daily flow rates variation is based on real time data measured by flow meters installed in observed rural sewerage facilities. The daily flow rates are confirmed to be influenced by the land use and site conditions of rural sewerage facilities. Besides, it is clarified that hourly flow rate fluctuations and peak coefficients was influenced by the duct line length, utilization rate and floating population rate. The results of this study are

expected to be reflected in setting appropriate design units and management methods of rural sewerage facilities in the future.

2. The daily inflow rate of wastewater was separated (a) the trend component, (b) the seasonal change component, (c) the weekly change component, and (d) the precipitation-corresponding component. These components were well correlated with influent quantity. The value predicted by the state space model well explained actual inflow discharge data. The daily inflow rate of wastewater related with (i) influent quantity that corresponding with population in basin, (ii) the dynamics of population in basin, (iii) the amount of precipitation, and (iv) events including summer holiday, near the close to another year, and so on. The analysis with the state space model has a few agenda of prediction precision of the precipitation-corresponding component and understanding of the seasonal change mechanism.

3. ORP of first aeration tank in intermittent aerobic suspended-growth sewerage treatment facilities should be held in range of 100 ~ 125mV in order to ensure BOD removal performance, and DO behavior characteristics vary with operation condition such as types of diffused aeration devices, aeration intensity, and aeration time. K_{La} can be classified by types of diffused aeration devices, and it can be deduced from aeration intensity, temperature and MLSS of aeration tank mixed fluid, also, BOD reaction rate constant can be deduced from aeration intensity, aeration time and temperature of aeration tank mixed fluid. It is shown that operation efficiency of intermittent aerobic suspended-growth sewerage treatment facilities can be improved by choosing the recommend combination of aeration intensity ($0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$) and aeration time (30min) which is appropriate to the diffused aeration device, as the result, required BOD removal performance can be obtained with less consumption of air quantity.

These conclusions are wished to be considered when set up appropriate design values or determine operating procedure of rural sewerage facilities. It is expected that construction and maintenance of nationwide rural sewerage facilities will be developed smoothly by optimizing operating procedure and decreasing maintenance cost.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の目的	1
1.2	本研究の構成	2
1.3	農業集落排水施設整備の現状と課題	4
1.3.1	農業集落排水施設整備の目的と特質	4
1.3.2	農業集落排水施設整備事業の実施状況	6
1.3.3	農業集落排水施設の処理方式	9
1.3.4	農業集落排水処理技術の課題	12
第 2 章	農業集落排水施設流入汚水量の実態と影響要因	14
2.1	概説	14
2.2	研究方法	16
2.2.1	調査施設と調査期間	16
2.2.2	検討手法	16
2.3	結果と考察	18
2.3.1	日流入汚水量	18
2.3.1.1	日流入汚水量と設計諸元の関係	18
2.3.1.2	日平均汚水量の変動要因	21
2.3.1.3	設計諸元設定の定量化と考え方	29
2.3.2	時間流入汚水量	30
2.3.2.1	時間流入汚水量と設計諸元の関係	30
2.3.2.2	時間汚水量の変動要因	34
2.3.2.3	設計諸元設定の定量化と考え方	36
2.4	要約	39
第 3 章	状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出	41
3.1	概説	41
3.2	研究方法	42
3.2.1	調査施設	42

3.2.2	解析手法	43
3.3	結果と考察	47
3.3.1	日流入水量の時系列的な変動特性と変動要因	47
3.3.2	日流入水量の周期性を有する変動特性と変動要因	53
3.3.3	適用モデルに対する汎用性の検証	58
3.4	要約	61
第4章	連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設におけるばっ 気槽管理とBOD除去性能	63
4.1	概説	63
4.2	研究方法	64
4.2.1	調査施設と調査期間	67
4.2.2	調査内容	67
4.2.3	検討手法	68
4.3	結果と考察	69
4.3.1	BOD除去性能とばっ気槽のORP管理	69
4.3.2	ばっ気槽の設計・運転操作とDO挙動特性	76
4.3.3	ばっ気槽の総括酸素移動容量係数 K_{La} とDO管理	79
4.3.4	効率的な処理能確保のためのばっ気槽管理への反映	85
4.4	要約	89
第5章	総括	90
5.1	本研究のまとめ	90
5.2	今後の課題	92
	謝辞	93
	引用文献	95

第 1 章 序論

1.1 本研究の目的

農村は、我が国の可住地面積の 9 割を占め、総人口の 4 割が居住する空間、就業の場であるほか、食料の安定供給、国土と自然環境の管理・保全、国民への緑の余暇空間の提供など重要かつ多面的な役割を果たしている。我が国の高度経済成長を契機とする農村社会における混住化の進展、生活水準の向上、農業生産様式の変貌等により、農村の水環境を巡る状況は大きく変化してきた。水質汚濁の主要な原因である生活排水が増加する一方で、農村集落からの排水を処理するための汚水処理施設の整備が著しく立ち遅れているために、農業の生産環境と農村の生活環境の両面に問題を引き起こしており、公共用水域の水質悪化の要因ともなってきた。このような状況を背景として、農林水産省において農業用排水の水質保全と農村の生活環境の改善を重点施策のひとつとして位置づけ、農業用排水の水質保全と農村の生活環境の改善を目的とした農業集落排水施設の整備が事業制度として創設され、積極的な推進がなされている（中野拓治，1993）。

農業集落排水施設は、昭和 48（1973）年に農村総合整備モデル事業の一工種として整備が始められて以来、生活と生産の場が一体となっている農村地域の特質等を踏まえ、通常の合併浄化槽や下水道の整備における流入汚水量とは異なった標準的な計画・設計諸元が用いられている（社）農業土木学会編，2000）。管路網の破損を原因とした降雨時の施設容量を超えるような流入水量は、施設の運用や周辺的环境にも悪影響を与える大きな問題となっており、農業集落排水施設の円滑な維持管理の実施や円滑な改築に当たっては、供用施設や改築対象施設における流入水量の実態とその変動特性を適切に把握することが必要である（中野拓治，2016）。都市地域における生活排水処理施設の流入水は、降水の日流入水量への影響に関する調査報告は多くみられる一方で、農業集落排水施設の流入水量については供用人口、水道使用量、降雨に伴う不明水、管路延長など影響要因に関する事例調査研究はあるものの（有田，1989）、農業集落排水施設の流入水量に関する定量的に研究されている文献は極めて少な

いのが現状である（李ら，2015）。

農業集落排水施設には，活性汚泥法の一種である連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式が広く採用されており（中野，2001），処理性能の現状と影響要因の把握を通じて，効率的な汚水処理プロセスと維持管理について調査・検討することが重要である（中野，1997；斎藤，1997）。農業集落排水施設の円滑な維持管理の実施や円滑な改築に当たっては，環境問題への意識の高まりに加えて，設置主体である地方自治体の財政状況等から，高度な水質をより経済的に確保することが求められているものの，活性汚泥法の一種である連続流入間欠ばっ気方式の農業集落排水施設について，BOD 除去性能と影響要因に関する先行研究はなされているが（中野・安元，2013），当該方式の農業集落排水施設の運転効率化に関する調査研究例はない。

本研究は，このような背景から，稼働中の農業集落排水施設から得られた実測データについて統計処理等を通じて，農業集落排水施設における流入水量の変動特性と変動要因を把握した。また，連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式処理施設における BOD 除去性能の影響因子，及び運転効率化に向けた運転管理方法について考察することで，農業集落排水施設における流入動態と運転管理の適正化を試みたものである。

1.2 本研究の構成

本研究は，全 5 章で構成されており，論文構成は，次に示すとおりである。

第 1 章「序論」においては，本研究の目的と意義について述べるとともに，研究の構成を紹介した。また，農業集落排水施設整備事業の概要とこれまでの事業実施状況を紹介するとともに，農業集落排水処理技術の現状と課題について述べた。

第 2 章「農業集落排水施設流入汚水量の実態と影響要因」においては，農業集落排水施設から得られた実測データに基づき，農業集落排水施設の流入汚水量の実態把握と変動要因の検討を通じて，設計諸元の定量化と設定について考察した。農業集落排水施設の日流入汚水量と処理区の土地利用・立地条件との関係等を検証するとともに，水道水量と降水量を説明変数とする重回帰推定式

からの日流入汚水量の定式化を試みた。時間流入汚水量の日間変動に関して、管路延長、供用率、流入人口比率等の関与を検証するとともに、時間流入汚水量の変動指標の一つであるピーク係数や農業集落排水施設時間最大流入汚水量の出現時間について管路延長との相関関係の確認等を通じて、農業集落排水施設における計画流入汚水量の考え方を検討した。

第3章「状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出」においては、2章で得られた知見を踏まえ、農業集落排水施設流入水について農業集落排水施設から得られた実測データに基づき、状態空間モデルの適用を通じて日水量負荷変動の把握と変動特性の抽出を試み、日水量負荷の変動要因について考察した。日流入水量はトレンド成分、季節変動成分、週間変動成分、及び降雨による変動成分に分離するとともに、状態空間モデル解析により日流入水量の有する周期的な変動特性や観測データと対応した特徴を抽出した。供用人口に対応して変動する水道使用量、降水量、流入人口動態、お盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動が日水量負荷変動に関与していることの解明を試みた。状態空間モデル解析による農業集落排水施設の日流入水量の変動特性の定量的な把握について検討した。

第4章「連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設におけるばっ気槽管理とBOD除去性能」においては、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設のばっ気槽管理とBOD除去性能について、効率的な処理性能を確保するためのばっ気条件の設定方法を明らかにすることを目的として、BOD除去性能の確保に必要なばっ気槽ORPの管理範囲を明らかにするとともに、ばっ気装置散気方式、ばっ気強度、ばっ気時間等の設計・運転操作条件とDO挙動特性を考察した。総括酸素移動容量係数(K_{La})とBOD除去速度恒数について、ばっ気槽の活性汚泥粘度やばっ気強度・ばっ気時間、水温、MLSSを説明変数による重回帰分析を通じて定式化を行った。連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式のBOD除去浄化機構の解明を通じて、ばっ気装置散気方式に対応したばっ気強度とばっ気時間の組み合わせにより、ばっ気空気量を低くできる運転管理条件の設定についても試みた。

第5章「結論」では、本研究を通じて得られた成果を総括し、要約した。

1.3 農業集落排水施設整備の現状と課題

1.3.1 農業集落排水施設整備の目的と特質

農業集落排水施設整備は、「農業用排水の水質保全，農業用排水施設の機能維持又は農村生活環境の改善を図り，併せて公共用水域の水質保全に寄与するため，農業集落におけるし尿，生活雑排水等の汚水，汚泥又は雨水を処理する施設を整備し，もって生産性の高い農業の実現と活力ある農村社会の形成に資する」ことを目的として，農業集落排水事業をはじめとする農村総合整備事業により実施されている（農村水質保全研究会，1990）．具体的には，**Table 1.1** に示すように農業集落におけるし尿，生活雑排水等の汚水を処理するための汚水処理施設や管路施設，雨水を処理するための雨水排水施設，発生汚泥を処理するためのコンポスト化施設等を整備するものとなっている（農林水産省構造改善局整備課監修，1993）．農業集落排水施設は，生活排水を処理するという点では，他の汚水処理施設と同様の機能を有しているものの，その役割は単に生活排水を処理するというだけでなく，農業集落から排出される汚水の浄化を通じて，①農業用水の水質保全による農業生産条件の安定化，②水質面での土地条件の優劣の解消による農地流動化の促進への寄与，③農業の担い手及び地域を支える多様な農業関係者等の定住条件の整備，④整備された施設の共同管理を通じた農村コミュニティの維持強化など，農村における構造政策を推進する上で不可欠な条件整備を図ることを目指している（中野，1995）．

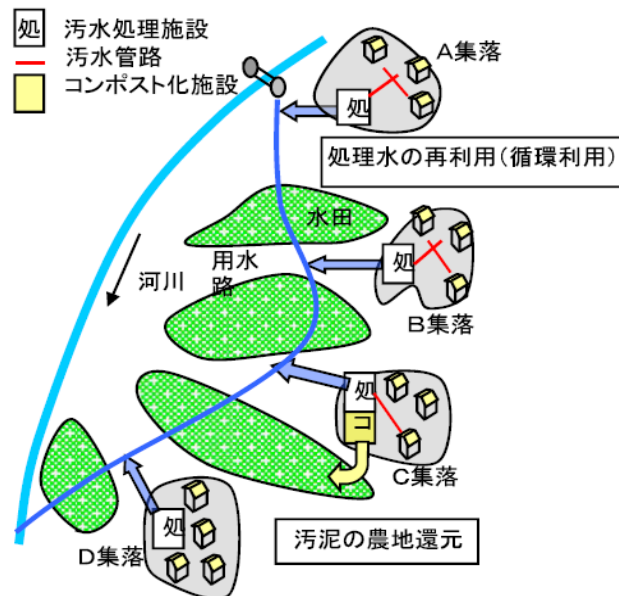
農村地域は都市部と異なり，農地が面的に広がっており，小さな集落が散在し人口密度が小さいこと，農地から集落にまたがり用排水路が網の目のように張り巡らされていること，水路やその岸辺には多くの動植物が棲息していること等の特徴を有している．また，従来，農村地域においては集落からの排水は自然浄化機能を活用し地域用水や農業用水として再利用されてきた．農村における汚水処理施設の整備に当たっては，農村地域が従来から有している水循環系や自然環境を保全しつつ，その自然循環システムを有効に活用した環境に優しい生活排水処理システムの構築が重要であると考えられることから，農業集落排水施設では **Fig.1.1** に示すように数集落を単位として汚水処理を行う小規模分散処理システムを採用することにより，農村地域に適した合理的で効率的

な処理方式となるように努めている（谷山ら，2000）。

Table 1.1 農業集落排水施設整備の内容
Project outline of rural sewerage facility

項目	内容
目的	農業集落におけるし尿、生活雑排水等の汚水又は雨水（分流）を処理する施設の整備又は改築を行い、農業用排水の水質保全、農業用排水施設の機能維持又は農村生活環境の改善を図り、併せて公共用水域の水質保全に寄与
整備対象地域	農業振興地域の整備に関する法律に基づく農業振興地域（これと一体的に整備することを相当とする地域を含む）内の農業集落
処理対象汚水	し尿、生活雑排水、雨水（分流）等（重金属等の有害物質を含む工場排水等は対象外）
処理対象人口	原則として、おおむね 1,000 人程度に相当する規模以下を単位（1,000 人を超える場合には、所要の協議を経て実施可）
補助対象	受益戸数がおおむね 20 戸（北海道・離島・沖縄・奄美にあつては 10 戸）以上。排水路末端の受益戸数は 2 戸以上。
事業主体	市町村、都道府県等
処理方式	分流式（汚水と雨水を別々に集水処理する方式）
処理水質	原則として、BOD20mg/L、SS50mg/L 以下（県条例等による上乗せ排水基準等がある場合はこれを遵守）

小規模分散方式



出典：今後の汚水処理のあり方に関する検討会第1回資料 P.3（農林水産省 2010）

Fig.1.1 農業集落排水施設整備に採用されている小規模分散処理システム
Small-scale distributed processing system adopted in rural sewerage facility development

1.3.2 農業集落排水施設整備事業の実施状況

農業集落排水施設の整備は、**Fig.1.2**に示すように平成28年度（2016年）までに実施された地区数は約5,356地区にのぼっている。そのうち、施設更新期を迎えた地区は1092地区にのぼっており、設置後20年を超え改築更新が必要と考えられる施設は毎年約300地区増加すると予測され、老朽施設への対応が急務となっている（）。農業集落排水施設整備事業費は、農業集落排水事業が単独で実施できるようになった昭和58年度（1983年）には38億円であったものが、平成23年度（2011年）には、約400倍の1.5兆円余りに達している。汚水処理施設と管路施設などを合わせた総事業費は約5.3兆円となっており、平成28年度（2016年）までの実施地区における処理対象人口は約335万人、汚水処理人口普及率は61.8%（平成8年度末）から90.4%（平成28年度末）まで増加している。

これを地方別にみると、**Fig.1.3**に示すように関東、中国四国、近畿の都市

近郊地域及び北陸で比較的实施地区数が多く，沖縄，九州，北海道の日本中心から離れている地方での取り組みが遅れている．農業集落排水事業として平成23年度（2011年）までに実施された5,243処理区について，その関係集落数は約1.7万集落に達している．計画戸数と計画人口はそれぞれ約116.4万戸，511万人であり，これを1処理区当たり平均すると集落数で3.3集落，計画戸数で212戸，計画人口で761人となっている．1処理区当たりの平均総事業費は0.01～71.3（平均9.76）億円であり，事業費の内訳をみると，**Fig.1.4**に示すように汚水処理施設の整備に関する費用が平均的に全体事業費の28%，管路施設に関する費用が平均的に57%，その他が平均16%となっている．

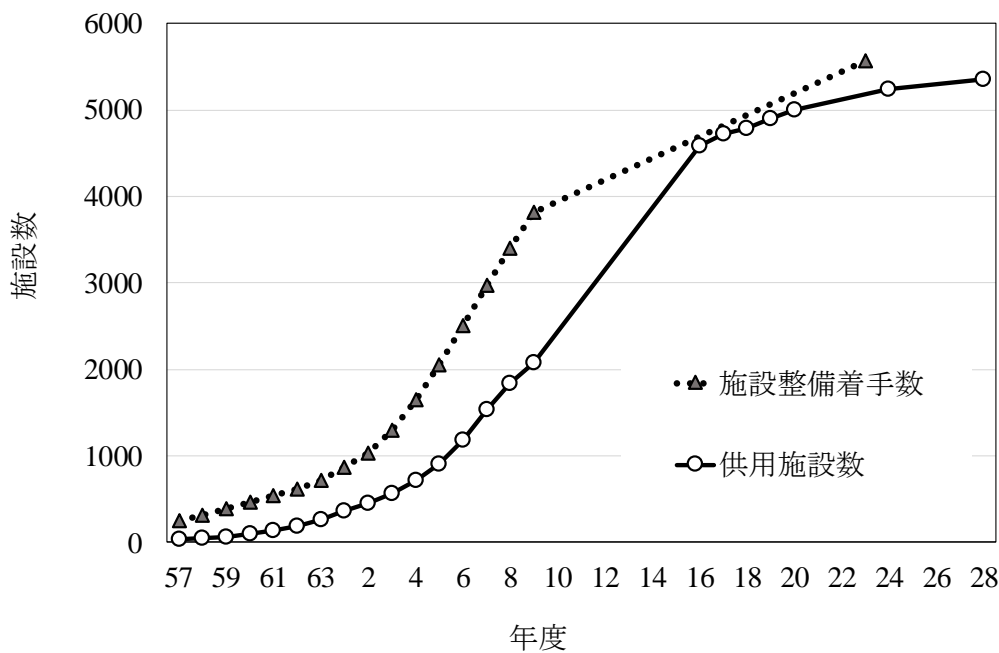


Fig.1.2 農業集落排水施設の整備状況

Development of rural sewerage facilities

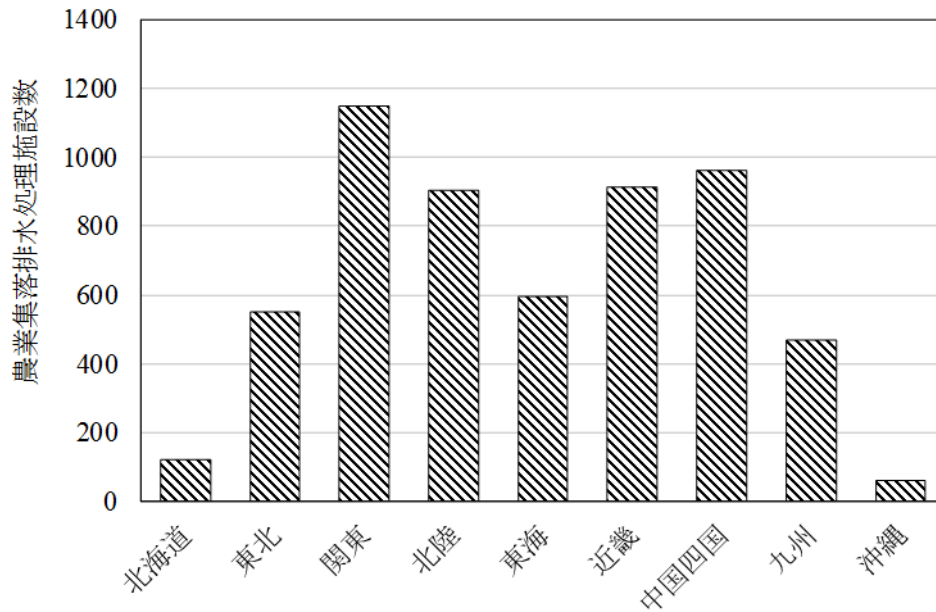


Fig.1.3 農業集落排水施設整備の地方別実施状況

Implementation conditions of rural sewerage facilities classified by region

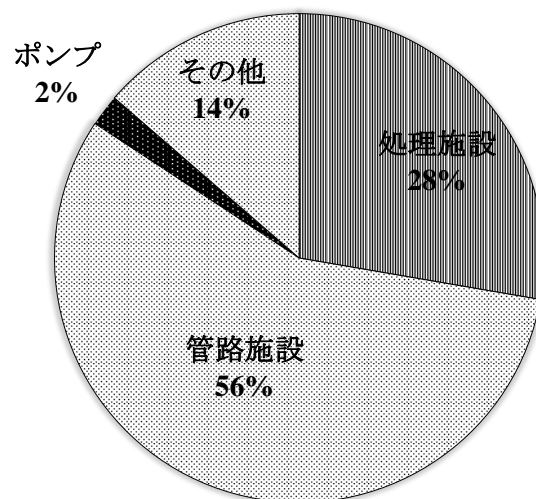


Fig.1.4 農業集落排水施設整備費用の内訳

The major breakdown of rural sewerage facility expenses

1.3.3 農業集落排水施設の処理方式

農業集落排水施設は、事業の特質でも述べたように小規模分散処理システムを採用していることから、大規模集中処理を基本とした公共下水等で活用されている汚水処理技術を農業集落排水施設に適用することは困難であった。また、昭和58年（1983年）に浄化槽法が制定され、農業集落排水施設は同法の適用を受けることとなり、その構造について、し尿浄化槽構造基準（告示構造）の規定に従うこととなったが、告示構造は個々の建築物に付帯する浄化槽を念頭に置いているため、これらの告示構造をそのまま農業集落排水施設に適用できなかった（（社）日本集落排水協会，1997）。このため、農業集落排水施設の処理水質が浄化槽法で求めている性能を確保するとともに、農業集落排水施設の特質を踏まえ、農村に適した農業集落排水施設の建設と適切な維持管理を図るための技術開発と調査研究体制の整備が不可欠となった。このような社会的な要請に応え、昭和58年（1983年）に（社）日本農業集落排水協会（現・（一般社団法人）地域環境資源センター）（以下、協会という）が農業集落排水事業を円滑に推進するための技術開発と調査研究を一元的に行うことを目的として設立された（農村整備事業の歴史研究委員会編，1999）。その後、協会が中心となって行政機関、大学等の研究機関との連携で一連の農村型の汚水処理技術が開発されてきた。協会型の汚水処理システムの主な処理方式には、**Table 1.2**に示すようなものが挙げられるが、その特徴と概要は次のとおりである（社）地域環境資源センター，2018）。

農業集落排水事業が制度化されてまず開発されたのが生物膜法による方式である。この方式は運転操作が少なく、バルキングなどの固液分離障害の心配がないことなどから、流入負荷変動を受けやすい集落排水施設においても維持管理が容易であるとともに、汚泥の発生量が全体的に少なく、スクリーン等の前処理施設を完備して汚泥の農地還元にも配慮しているのが特徴となっている（農業集落排水事業諸基準等作成全国検討委員会，1996）。生物膜法は生物反応槽に充填するろ材等にスケールメリットが働きにくく、計画人口が1,000人程度以上の大規模な農業集落排水施設では相対的に割高になることや、霞ヶ浦などの閉鎖水域で厳しい水質規制がなされている場合に窒素除去性能を高めるには専門的な管理が求められ、生物膜法による脱窒処理では限界があるこ

Table 1.2 協会型汚水処理システムの概要

Performance of wastewater treatment processes from JARUS

名称と処理方式			処理性能 (mg · L ⁻¹)				
			BOD	COD	SS	T-N	T-P
生 物 膜 法	S 型	沈殿分離と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	—	—
	I 型	沈殿分離と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	—	—
	II 型	脱窒を考慮した嫌気ろ床と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	20	—
	III 型	流量調整を図り嫌気ろ床と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	—	—
	IV 型	流量調整を図り脱窒を考慮した嫌気ろ床と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	20	—
V 型	嫌気ろ床と接触ばっ気を組み合わせた方式	20	—	50	—	—	
活 性 汚 泥 法	X I 型	回分式活性汚泥方式	20	—	50	—	—
	X II 型	脱窒を考慮した回分式活性汚泥方式	20	—	50	15	—
	X II _G 型	脱窒，脱リン，COD 除去を考慮した回分式活性汚泥方式	10	15	15	15	3
	X III 型	DO 制御を図り高度な脱窒，脱リン，COD 除去を考慮した回分式活性汚泥方式	10	15	15	10	1
	X IV 型	連続流入間欠ばっ気方式	10	15	15	10	3
	膜分離活性汚泥型	間欠流入間欠ばっ気方式	5	10	5	10	1
	協会仕様	膜分離活性汚泥方式	20	—	50	20	—
	OD 型	オキシデーションディッチ	—	—	—	—	—

とから、新たな処理方式の開発が必要となった。このような要請に対応して、回分式活性汚泥方式、連続流入間欠ばっ気方式、浸漬型膜分離活性汚泥方式、オキシデーションディッチ方式等が開発された。

年度別に処理方式の推移をみると、昭和 63 年度（1988 年）には接触ばっ気方式と回分式活性汚泥方式がそれぞれ全体の 75.2% 及び 14.3% であったのに対して、平成 23 年度（2011 年）までに処理方式が決定されている 5,243 処理施設について、汚水処理方式をみると **Fig.1.5** に示すように接触ばっ気方式は 2,120 処理施設と全体の約 4 割であり、また、回分式活性汚泥方式 801 処理施設（全体の 14%）、連続流入間欠ばっ気方式 686 処理施設（全体の 12%）、オキシデーションディッチ方式 303 処理施設（全体の 5%）、膜分離活性汚泥法方式 116 処理施設（全体の 2%）などとなっている。このように、農業集落排水施設における処理方式は、回分式活性汚泥方式や連続流入間欠ばっ気方式等の活性汚泥法が増加し、接触ばっ気方式等の生物膜法を採用する処理区の割合が減少する傾向を示している（**Fig.1.6**）

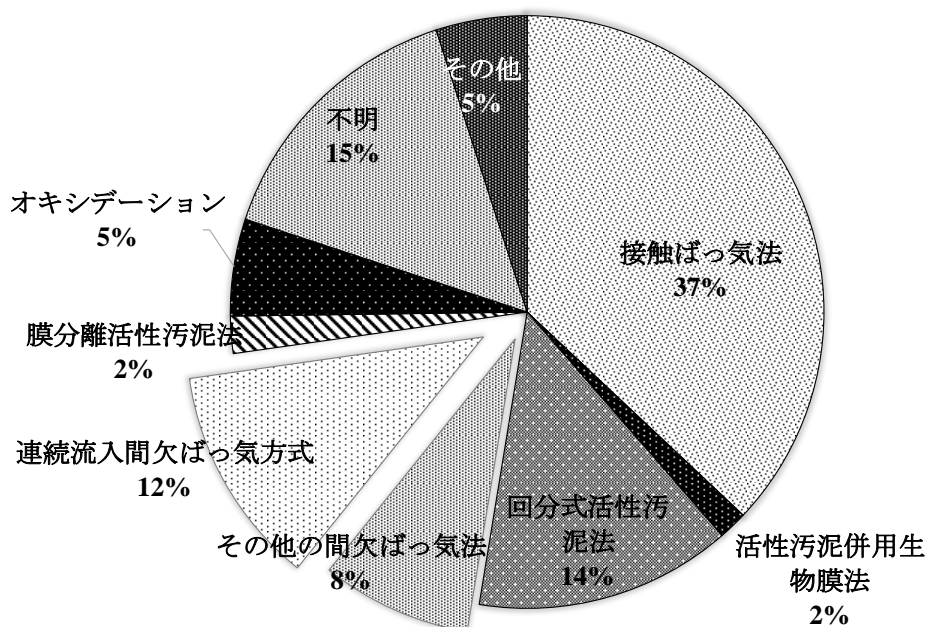


Fig.1.5 2011 年農業集落排水施設処理方式の内訳

Treatment processes with percentage in 2011 for rural wastewater treatment facilities

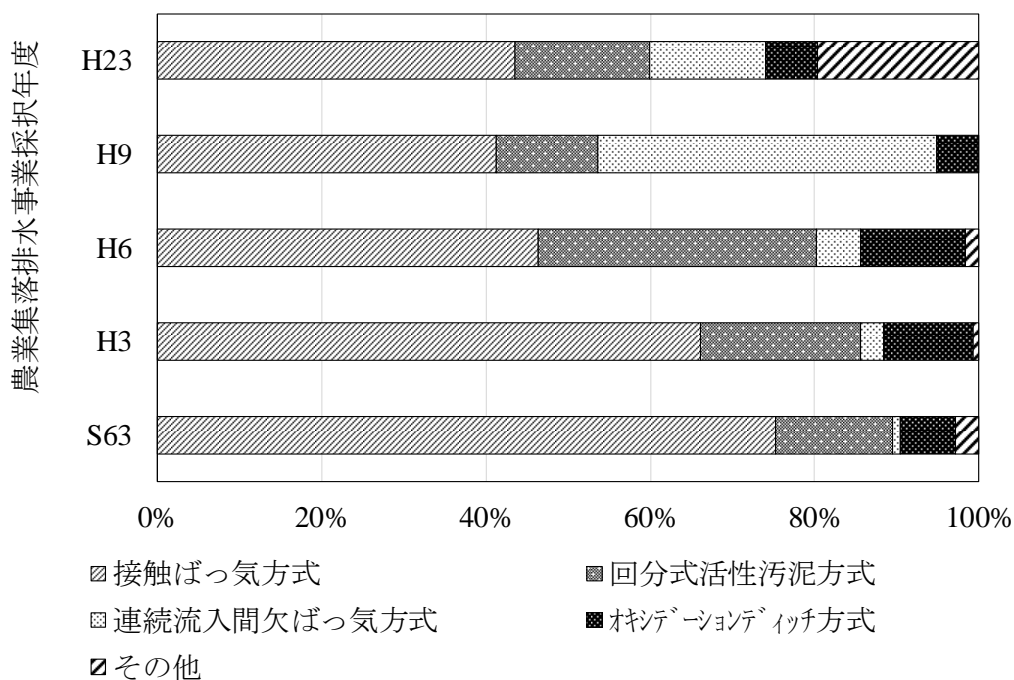


Fig.1.6 農業集落排水施設における処理方式の推移

Percentage variation of treatment processes for rural sewerage facilities

1.3.4 農業集落排水処理技術の課題

農業集落排水施設の適切な整備と整備施設の円滑な維持管理を進めるためには、以下に示すような技術的な課題の解決に向けた取り組みを行うことが重要である。

(1) 低コスト化技術の開発と適用

環境問題への意識の高まりに加えて、閉鎖性水域での富栄養化防止対策や上乘せ規制の強化等から、高度な水処理への社会的要請はますます強くなっており、高度な水処理をより経済的に確保する技術開発とその適用が求められている。農業集落排水事業の展開によって、中山間地域や散居集落といった地形的、財政的に条件の厳しい地域での事業実施、水質向上のため高度処理技術の拡大、汚泥処理費用の増大などにより事業費や維持管理費の高騰が想定されることから、なお一層のコスト低減のための技術開発が必要とされている。

(2) 維持管理技術の構築

農業集落排水施設は受け身の立場にあり、公共下水道とほぼ同じであるが、供用人口が概ね 1,000 人程度と公共下水道の処理施設に比較して小規模である

ことから、流入汚水量の変動が大きいことも反映して、小さなトラブルが連続的に生じることもある。これらのトラブルを軽度なうちに解消しておかないと重大な事態に繋がる恐れがある。一方、農業集落排水施設に限らず公共事業全般の考え方として、整備や改築に対しては国や都道府県からの補助があるが、維持管理に関しては市町村と受益者が負担している。地方交付税の算定において農業集落排水施設の維持管理もその対象とされているが、公共下水道も含め雨水公費、汚水私費の原則が確立されていることから、必要額の全てが措置されるわけではない（中野，1993）。このようなことから、農業集落排水施設整備後の維持管理が適正に行われることにより、①施設本来の目的を果たすことができるとともに、②維持管理経費の低減等適が図られるため、維持管理技術の確立が重要である。

（3）地域資源循環システム技術の構築

農業集落排水施設は、汚水処理施設の建設で終わるものではなく、処理水や汚泥の再生利用を視野に入れた整備を行うことが重要である。大量に集中して汚泥や処理水の発生する下水道においてはその処理の壁に直面しているが、農村地域では、農林業活動の展開を通じて、汚泥や処理水を有効に還元利用できる可能性を有していることから、その特徴を積極的に生かした農業集落排水施設の整備を図ることが必要である。農業集落排水施設は原則として工業排水等の有害物質を含むおそれのある汚水を受け入れていないため、処理水と発生汚泥を農林地等に還元利用することを通じて農村地域の資源循環システムとして構築することが大切であると考えられる。

第 2 章 農業集落排水施設流入汚水量の実態と影響要因

2.1 概説

農業集落排水施設は、1973年に農村総合整備モデル事業の一工種として整備が始められて以来（農村整備事業の歴史研究委員会，1999），2015年度までに5,356地区の農業集落排水施設が供用を開始しており，既存施設の維持管理や施設改築が大きな課題となっている（中野，2016）．農業集落排水施設の流入汚水量は，農村地域の特質と計画目標年次（10年後）を踏まえ，**Table 2.1**に示す値を設計諸元としている（農業集落排水事業諸基準等作成全国検討委員会，1996）．この設計諸元は，農業集落排水施設整備の単独事業化（1984年）を契機として，農業集落排水施設から得られたデータに基づき，し尿浄化槽構造基準を参考に設定されたものである（農業土木技術研究会，1997）．

農業集落排水施設の日流入汚水量（田中，1984；安田，1988；村山，1988；谷山ら，1989；高橋・西口，1987）や水量特質（中野ら，1999，2016b）に係る報告はなされているものの，流入汚水量の定量的な評価に関連して，単独事業化当初に全国一律で設定された設計諸元がそのまま用いられているのが現状である．一方，流入汚水量と計画汚水量との間に大きな乖離が生じたために，生物反応槽（ばっ気槽等）を設計必要槽数から減らして運転するケースやポンプ施設・生物反応槽の許容容量を超えた流入汚水量によって運転管理に支障をきたすなど水質処理性能の確保に課題を抱える施設が存在している（中野ら，2016a；李・中野，2016；李ら，2017b）．さらに，近年の地球温暖化現象に伴う降雨状況変化によって，農業集落排水施設の運転管理にも影響を与えている可能性も指摘されている（熱帯・亜熱帯地域水環境研究委員会，2017）．

このため，農業集落排水施設の円滑な維持管理や改築に際しては，供用施設や改築対象施設の流入汚水量の実態と変動特性を適切に把握することが重要になっており，流入汚水量の実態と変動要因を踏まえた定量的な評価・検討が求められている（李ら，2017a）．そこで本研究では，供用施設の実測データに基づき，農業集落排水施設の流入汚水量の実態把握と変動要因の検討を通じて，設計諸元の定量化と設定について考察した．

Table 2.1 農業集落排水施設流入汚水量に関する設計諸元
 Design units of sewerage flow rates on rural sewerage facilities in Japan

項目	設計基準値 (L・人 ⁻¹ ・d ⁻¹)
日最大汚水量	300
不明水量	30
日平均汚水量	270

項目	算定式
日最大汚水量	し尿：50 L・人 ⁻¹ ・d ⁻¹ 生活雑排水：250 L・人 ⁻¹ ・d ⁻¹
不明水量	日最大汚水量の10%の水量
日平均汚水量	日最大汚水量に80%を乗じて不明水量を加算

項目	施設設計への適用
日最大汚水量	ポンプの容量設定
不明水量	—
日平均汚水量	生物反応槽・流量調整槽の容量設定

2.2 研究方法

2.2.1 調査施設と調査期間

農業集落排水施設では、ほとんどの施設で自然流下方式の管路が採用されている。このため、著者らが調査した R1 - R6 施設に加え、日本農業集落排水協会（現・地域環境資源センター）によって調査された R7 - R20 施設を含めた自然流下方式の 20 施設を選定した（**Table 2.2**）。

調査施設の選定に当たっては、処理区内で地下水の利用が確認された施設は除外した。調査施設における流入汚水量の観測期間は、1 年間（ただし、R1 の観測期間は 2007 年と 2014 年の 2 ヶ年間）であり、1 日 24 時間の流入汚水量について年間 365 日（ただし、1996 年は 366 日）を通じて、1 時間毎に計測した観測データを用いた（**Table 2.3**）。

2.2.2 検討手法

日流入汚水量は、調査施設の流入汚水量計測機器で観測・記録された 24 時間の時間流入汚水量を合算して求めた。時間流入汚水量は、年間の実測値を平均して調査施設における時間水量を算定した。R1 施設、R2 施設と R3 施設、R4 施設と R5 施設、R6 施設の時間降水量、月別水道使用量、供用人口・流入人口、及び管路延長は、それぞれ上富田町上下水道課、恩納村上下水道課、宜野座村上下水道課、金武町上下水道課の提供データを用いた。R7～R20 施設の日降水量、月別水道使用量、供用人口・流入人口、及び管路延長は、日本農業集落排水協会の調査データを使用した（日本農業集落排水協会、1998a）。

R1 施設、R2 施設、R3 施設、R4 施設、R5 施設、及び R6 施設の土地利用と立地条件は、流入汚水量の調査時点と対応したデータとして基本設計業務報告書のデータ（日本農業集落排水協会、1997；地域環境資源センター、2006a、2008、2004、2006b、2007）を用いるとともに、R7～R20 の各施設の土地利用と立地条件には農業集落排水施設整備報告書の記載情報（日本農業集落排水協会、1998b）を検討に活用した。これらのデータに分散分析や重回帰分析などの統計解析手法を適用して、設計諸元に用いられる流入汚水量の算定や変動要因を解析した。実測データの分散分析や重回帰分析には、統計解析アドインソ

フトエクセル統計 2015 を使用した。

Table 2.2 調査施設

Observed rural sewerage facilities

施設名	都道府縣市町村	処理区面積 (ha)	管路延長 (km)
R1	和歌山県上富田町	27.3	9.8
R2	沖縄県恩納村	76.0	18.9
R3	沖縄県恩納村	61.3	6.3
R4	沖縄県宜野座村	39.0	14.5
R5	沖縄県宜野座村	83.9	12.1
R6	沖縄県金武町	70.4	16.2
R7	秋田県上小阿仁村	5.4	1.6
R8	秋田県秋田市	22.1	1.3
R9	山形県庄内町	7.6	3.6
R10	山形県鶴岡市	16.7	15.3
R11	岩手県奥州市	50.4	5.1
R12	岩手県奥州市	24.5	12.5
R13	岩手県北上市	52.2	6.2
R14	長野県高山村	31.9	4.8
R15	石川県能美市	18.1	19.1
R16	兵庫県養父市	45.2	1.3
R17	鳥取県鳥取市	4.8	8.2
R18	愛媛県今治市	26.2	5.8
R19	佐賀県鳥栖市	20.3	9.4
R20	宮崎県日南市	34.3	16.2

施設名	計画人口 (人)	供用人口 (人)	流入人口 (人)
R1	949	386 (2007年) 581 (2014年)	62 (2007年) 83 (2014年)
R2	2,580	1,552	279
R3	500	335	102
R4	1,940	1,679	682
R5	3,000	1,759	686
R6	1,750	565	89
R7	140	140	5
R8	670	643	228
R9	420	365	117
R10	510	485	128
R11	1,230	933	246
R12	930	771	186
R13	1,830	1,025	345
R14	1,220	956	223
R15	530	492	173
R16	440	366	65
R17	150	150	37
R18	604	247	23
R19	550	418	191
R20	980	735	164

Table 2.3 調査期間

Investigation period

調査期間	施設名
1996.1.1 ~12.31	R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13
1997.1.1 ~12.31	R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20
2007.1.1 ~12.31	R1(2007)*
2014.1.1 ~12.31	R1(2014) *, R2, R4
2015.1.1 ~12.31	R3, R5, R6

※注：R1(2007)と R1(2014)は、それぞれ R1 施設の 2007 年と 2014 年における観測データであることを示す。

2.3 結果と考察

2.3.1 日流入汚水量

2.3.1.1 日流入汚水量と設計諸元の関係

年間 365 日（ただし，1996 年は 366 日）の日流入汚水量について，調査施設毎（ただし，R1 施設では 2007 年と 2014 年の 1 年毎）に最大，平均，及び最小値を算定して，供用人口との比例関係に基づく次の回帰式を求めた（**Fig.2.1**）。

$$F_{max} = 0.479U \quad (2.1)$$

$$F_{ave} = 0.240U \quad (2.2)$$

$$F_{min} = 0.169U \quad (2.3)$$

ここで， F_{max} ：日最大流入汚水量（ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ）， F_{ave} ：日平均流入汚水量（ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ）， F_{min} ：日最小流入汚水量（ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ）， U ：供用人口（人）。

日流入汚水量と供用人口の間には良好な相関（最大：0.78，平均：0.90，最小：0.86 の決定係数）が存在しており，日流入汚水量の原単位への換算は可能と判断されたことから，供用人口で除して一人当たりの日最大，日平均，及び日最小流入汚水量（以下，日最大汚水量，日平均汚水量，及び日最小水量という）を算定した。調査施設の日最大汚水量，日平均汚水量，及び日最小汚水量は，それぞれ $268.2 \sim 813.7 \text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ （平均： $476.6 \text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）， 167.8

～379.8L・人⁻¹・d⁻¹（平均：260.9L・人⁻¹・d⁻¹），87.8～267.9L・人⁻¹・d⁻¹（平均：188.6L・人⁻¹・d⁻¹）と広い範囲に分布している（**Fig.2.2**）。

調査施設の日最大汚水量と日平均汚水量を評価するため、し尿浄化槽等の性能評価等に用いられる非超過確率75%値の算定と母平均の区間推定を行った。日最大汚水量と日平均汚水量は、それぞれ対数正規分布、正規分布に近い分布となっており、ヘーズンプロットを用いて非超過確率75%値を算定した。日最大汚水量の非超過確率75%値は、**Fig.2.3**に示すように日最大汚水量の設計基準値（300L・人⁻¹・d⁻¹）の約1.9倍の567.6L・人⁻¹・d⁻¹である。日最大汚水量の母平均の区間推定値（信頼水準0.99）は、377.3～576.0L・人⁻¹・d⁻¹であり、上限値は設計基準値の1.9倍程度の値となっている。一方、日平均汚水量の非超過確率75%値は、298.2L・人⁻¹・d⁻¹であり、日平均汚水量の設計基準値（270L・人⁻¹・d⁻¹）に比べて1割程度大きい値が得られた。日平均汚水量の平均値は、設計基準値（270L・人⁻¹・d⁻¹）の97%に相当する260.9L・人⁻¹・d⁻¹であり、母平均の区間推定値（信頼水準0.99）として227.1～294.6L・人⁻¹・d⁻¹の値が得られた。

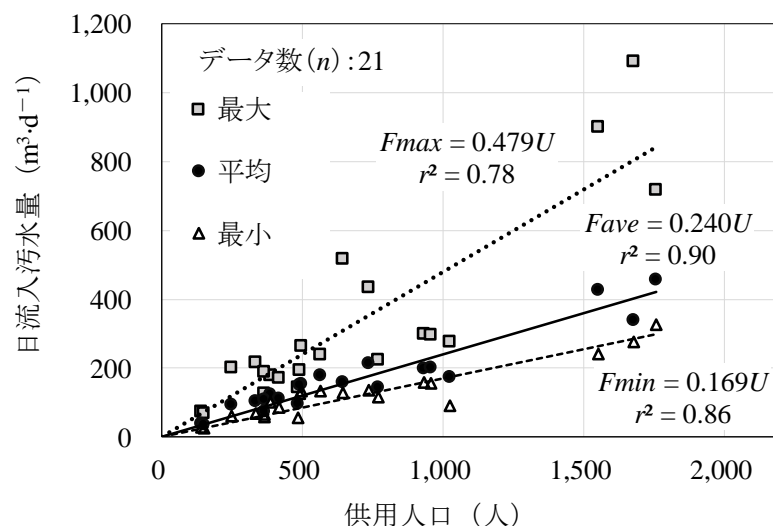


Fig.2.1 調査施設の日流入汚水量と供用人口の関係

Relation between daily flow rates and number of users on observed rural sewerage facilities

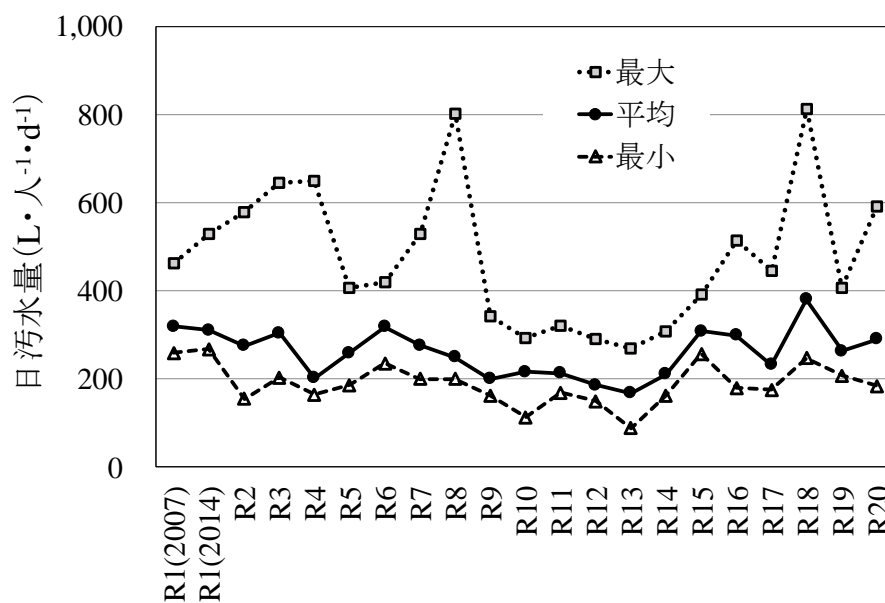


Fig.2.2 調査施設の日最大汚水量，日平均汚水量，及び日最小水量

Daily flow rates (maximum, mean, minimum) on observed rural sewerage facilities

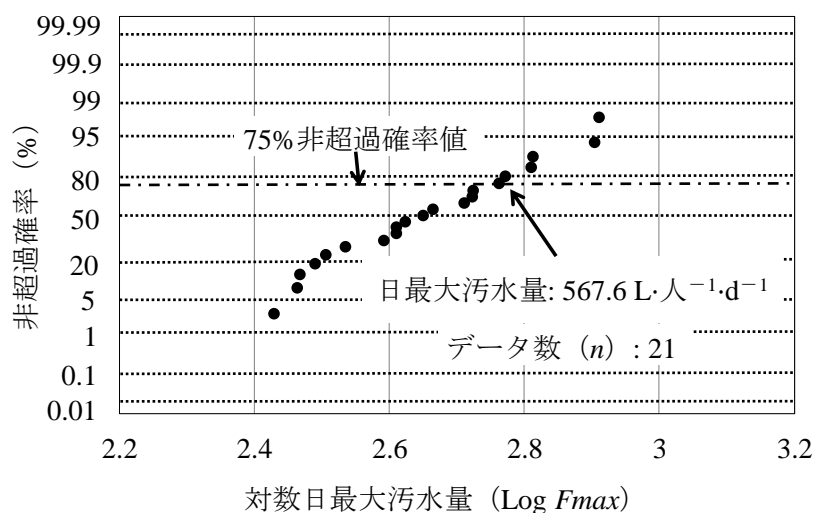


Fig.2.3 調査施設における日最大汚水量分布のあてはめ

Evaluation of probability distribution of maximum daily flow rates on observed rural sewerage facilities

2.3.1.2 日平均汚水量の変動要因

日平均汚水量は、生物反応槽や流量調整槽の容量設定に用いられるなど、重要な設計基準値である（編集代表 谷山，2000）。既往研究から日平均汚水量には生活用水や降雨が影響しており（中野ら，2018），2.3.1.1で述べたように調査施設の日平均汚水量は広い範囲に分布していることから、日平均汚水量の変動要因を検討した（中野ら，2015；李ら，2016）。調査施設の年間365日（ただし，1996年は366日。また，R1施設では2007年と2014年）の日流入汚水量を用いて、日降雨による影響を除くため、無降水日の月別一人当たり日流入汚水量（以下，無降水日水量という）と月別一人当たり日水道使用量（以下，日水道水量という）の関係を検証した。両者の間には正の相関（相関係数：0.80（t検定の1%有意水準で有意））が存在するものの、無降水日水量は日水道水量が $200\text{L}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 近傍で最大 $200\text{L}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 程度の差異を示すなど大きなバラツキを生じている（**Fig.2.4**）。

一方、調査施設処理区の土地利用は、**Fig.2.5**に示すように①水田主体（水田が処理区面積の60%以上存在）、②畑主体（畑が処理区面積の60%以上存在）、③樹園地主体（樹園地が処理区面積の60%以上存在）、④水田・畑混在（水田と畑がそれぞれ処理区面積の30~60%存在）、⑤畑・樹園地混在（畑と樹園地が処理区面積の60%程度存在）の5つのグループに分類できる。また、調査施設の立地条件をみると、①河川沿い・沢・大河川流域等で低平地エリア、②平地・平野エリア、③中山間エリア、④海岸沿いエリア、及び⑤傾斜地で中心集落エリアの5つのグループに区分できる。調査施設の土地利用・立地条件から、調査施設はタイプⅠ（土地利用が水田主体であり、河川沿い・沢・大河川流域等で低平地エリアに設置）、タイプⅡ（土地利用が水田と畑が混在しており、平地・平野エリアに設置）、タイプⅢ（土地利用が畑・果樹主体であり、中山間エリア、海岸沿いエリア、傾斜地中心集落エリア等に設置）の3タイプに大別できる（**Table 2.4**）。

日水道水量と無降水日水量の相関係数は、タイプⅠ（6施設）、タイプⅡ（8施設）、及びタイプⅢ（6施設）で、それぞれ 0.93、0.98、0.94 と強い相関が存在している。タイプⅠの日水道水量に対する無降水日水量は、3タイプの中で最も高い値を示しており、日水道水量に伴う無降水日水量の上昇割合も大きくなる傾向が認められる。タイプⅡの無降水日水量（平均：255.2L・人⁻¹・d⁻¹）は、日水道水量の値に関わらず水道水量（平均：222.8L・人⁻¹・d⁻¹）に比較して 30L・人⁻¹・d⁻¹程度高い値を示している。タイプⅢの無降水日水量は日水道水量を下回っており、他の2タイプとは異なる挙動を示している。

そこで、各タイプの無降水日水量と日水道水量について、4月～10月を灌漑期、11月～3月を非灌漑期として比較検証した（Fig.2.6）。タイプⅠでは灌漑期の無降水日水量（平均：250.7L・人⁻¹・d⁻¹）は、非灌漑期（平均：224.6L・人⁻¹・d⁻¹）に比較して 26.1L・人⁻¹・d⁻¹高い値を示しており、両者の水量には t 検定の有意水準 95%で統計的な差異が認められる。タイプⅠの日水道水量は、灌漑期と非灌漑期、それぞれ 160.0 L・人⁻¹・d⁻¹、149.3L・人⁻¹・d⁻¹であり、両者の日水道水量には t 検定の有意水準 95%で有意な水量差は存在しない。無降水日水量には灌漑期と非灌漑期で水道使用量以外の水量変化要因が関与しており、タイプⅠは土地利用が水田主体で、河川沿い・沢・大河川流域等の地

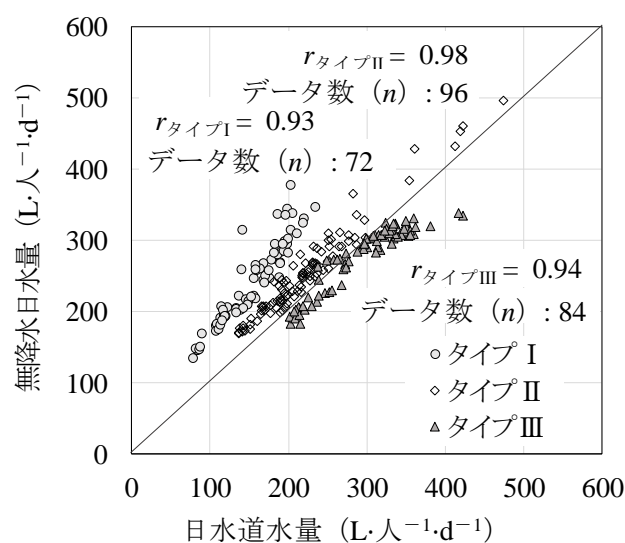


Fig.2.4 調査施設の日水道水量と無降水日水量の関係

Relation between monthly mean daily flow rates in non-precipitation day and monthly mean daily drinking water on observed rural sewerage facilities

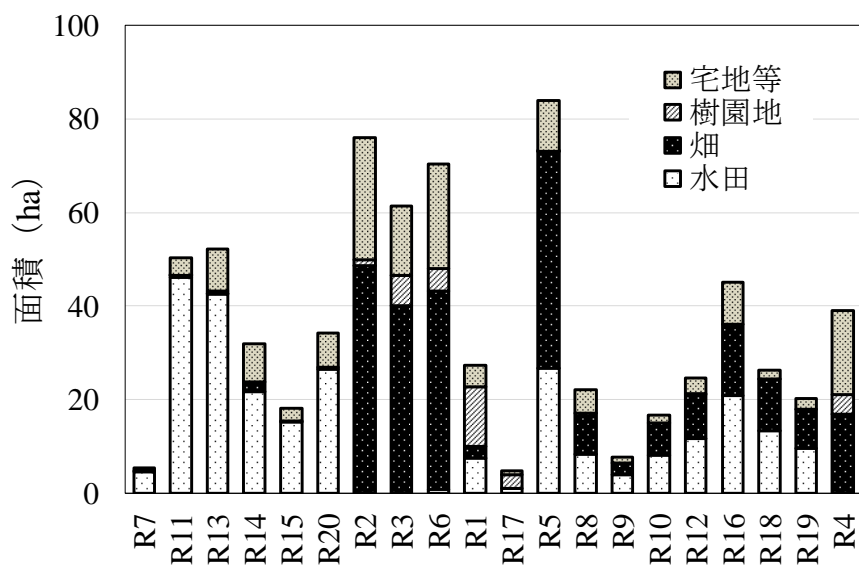
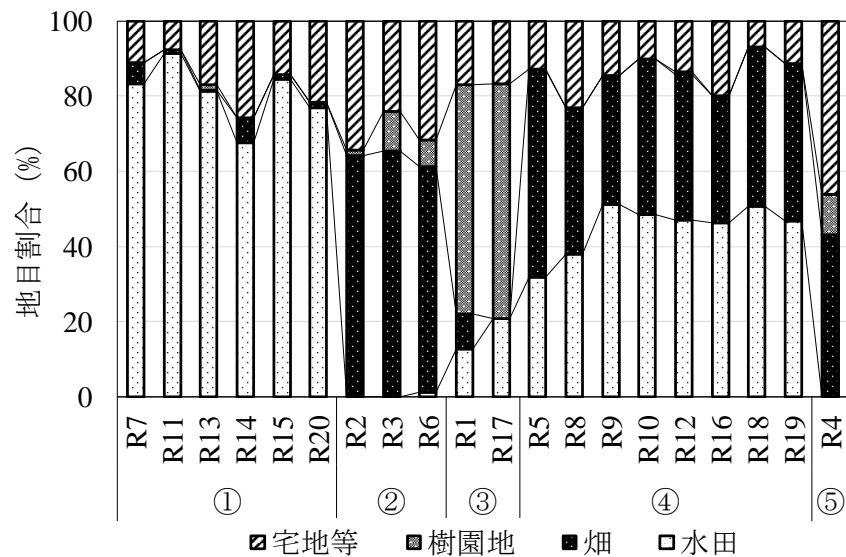


Fig.2.5 調査施設処理区の土地利用状況

Land use on project area of observed rural sewerage facilities

Table 2.4 調査施設処理区タイプの分類

Classification on project area of observed rural sewerage facilities

タイプ	施設名	土地利用	立地条件	
I	R7	①	①	
	土地利用が水田主体であ	R11	①	①
	り，河川沿い・沢・大河川	R13	①	①
		R14	①	①
	流域等で低平地エリア	R15	①	①
		R20	①	①
II	R5	④	②	
	土地利用が水田と畑が混	R8	④	②
	在しており，平地・平野エ	R9	④	②
		R10	④	②
	リア	R12	④	②
		R16	④	②
III	R1	③	③	
	土地利用が畑・樹園地主	R2	②	④
	体であり，中山間エリア，	R3	②	③
	海岸沿いエリア，傾斜地	R4	⑤	⑤
		R6	②	③
	中心集落エリア等	R17	③	④

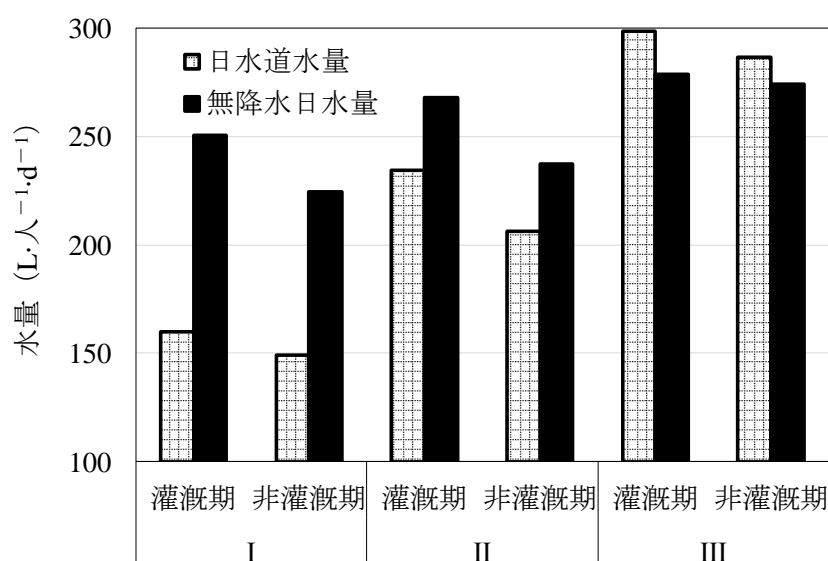


Fig.2.6 灌漑期と非灌漑期の日水道水量と無降水日水量の関係

Relation between daily drinking water and non-precipitation day daily flow rates during irrigation period and non-irrigation period

下水位が高い低平地エリアであることを踏まえると、管路周辺の水田等からの不明水浸入が要因となって、無降水日汚水量が日水道水量を上回り、他のタイプに比較して大きな値を示すものと推察される。

タイプⅢにおける灌漑期の日水道水量（平均：298.5L・人⁻¹・d⁻¹）は、非灌漑期（平均：286.5L・人⁻¹・d⁻¹）に比較して12.0L・人⁻¹・d⁻¹高い値を示すものの、両者にt検定の有意水準95%で有意な水量差は認められない。タイプⅢの無降水日水量についても、灌漑期（平均：278.7L・人⁻¹・d⁻¹）と非灌漑期（平均：274.2L・人⁻¹・d⁻¹）の水量にt検定の有意水準95%で有意な差異は存在しない。タイプⅢにあっては、土地利用が畑・樹園地主体で、中山間エリア、海岸沿いエリア、傾斜地中心集落エリア等であるため、灌漑期と非灌漑期での水量差は生じておらず、管路周辺からの不明水の浸入が少ないことが要因となって、無降水日水量が日水道水量を下回るような状況が生じたものと推察される。

一方、タイプⅡでは灌漑期の日水道水量（平均：234.4L・人⁻¹・d⁻¹）は、非灌漑期（平均：206.5L・人⁻¹・d⁻¹）に比べて27.9L・人⁻¹・d⁻¹高い値が得られており、両者にはt検定の有意水準95%で有意な水量差が存在している。タ

タイプⅡの無降水日水量についても、灌漑期（平均：268.0L・人⁻¹・d⁻¹）と非灌漑期（平均：237.4L・人⁻¹・d⁻¹）に t 検定の有意水準 95% で有意な水量差を生じている。タイプⅡにおいては、無降水日水量と日水道水量ともに灌漑期と非灌漑期での水量差が生じており、水田と畑が混在する平地・平野エリアであるため、無降水日水量と日水道水量はタイプⅠとⅢの中間的な挙動となったものと考えられる。このように、処理区内の宅内や流入施設から排出された排水が管路を経て農業集落排水施設に流入する過程において、土地利用や立地条件が不明水の管路への浸入量に影響した結果、無降水日水量と日水道水量の挙動に変化を与えているものと考えられる。

降水量 0.5mm 以上の降雨があった日を降水日として、調査施設における年間 365 日（ただし、1996 年は 366 日。また、R1 施設では 2007 年と 2014 年）の日流入汚水量を対象に、降水日の月別一人当たり日流入汚水量（以下、降水日水量という）と日降水量の関係を検討した（**Fig.2.7**）。タイプⅠの降水日水量は、日降水量に対応して増加しており、無降水日水量（平均：238.7L・人⁻¹・d⁻¹）と日降水量 30~40mm の降水日水量（平均：291.7L・人⁻¹・d⁻¹）の間には t 検定の有意水準 95% で統計的に有意な水量差が生じていることから、日降水量が 30mm を超えると降水日水量に影響を与えることが確認された。なお、タイプⅢの日降水量 300~400mm の降水日水量が不自然に低下している。この点は水量測定に何等かの不具合が生じたと考えられるが原因は不明である。タイプⅠでは日降水量 30mm 未満の発生頻度が **Fig.2.8** に図示したように全降水日数の 9 割を超えることも相まって、**Fig.2.9** に示すように無降水日と全降水日の平均水量には差異は認められない一方で、降水量 30mm 以上の降水日水量は無降水日水量に比較して 25% 増となっている。タイプⅠの土地利用は水田主体の低平地エリアであり、降水量が 30mm 以上の場合には管路周辺からの不明水の浸入によって、降水日水量が降水量に対応して増加したものと考えられる。

タイプⅡとタイプⅢの降水日水量は、**Fig.2.7** に図示したように日降水量が 300~400mm を除いて、その増加率はタイプⅠに比べて小さかった。タイプⅡとタイプⅢにおいて、無降水日水量（それぞれの平均：260.4L・人⁻¹・d⁻¹、281.6L・人⁻¹・d⁻¹）と日降水量 40~50mm、50~100mm に対応した降水日水量を対象に t 検定を行ったところ、有意水準 95% で日降水量が 50mm を超えると降水日

水量に影響していることが確認された。タイプⅡとタイプⅢは、タイプⅠと比較して降水日水量に影響を与える日降水量は増加している。

日降水量が 50mm 以上の場合の降水日水量は、タイプⅡとタイプⅢで、無降水日水量に比べてそれぞれ 18%、26%であり、タイプⅠの降水量 30mm 以上の降水日水量における無降水日水日降水量が 50mm 以上の場合の降水日水量は、タイプⅡとタイプⅢで、無降水日水量に比べてそれぞれ 18%、26%であり、タイプⅠの降水量 30mm 以上の降水日水量における無降水日水量の増加率と比較して、下回るか同程度の値を示している。タイプⅠの土地利用が水田主体で低平地であるのに対して、タイプⅡとタイプⅢの土地利用は水田・畑が混在又は、畑・樹園地主体であるため、このような土地利用・立地条件の相違が要因となって、降水に伴う不明水量に影響した結果、日降水量の降水日水量への応答に変化を生じたものと推察される。量の増加率と比較して、下回るか同程度の値を示している。タイプⅠの土地利用が水田主体で低平地であるのに対して、タイプⅡとタイプⅢの土地利用は水田・畑が混在又は、畑・樹園地主体であるため、このような土地利用・立地条件の相違が要因となって、降水に伴う不明水量に影響した結果、日降水量の降水日水量への応答に変化を生じたものと推察される。

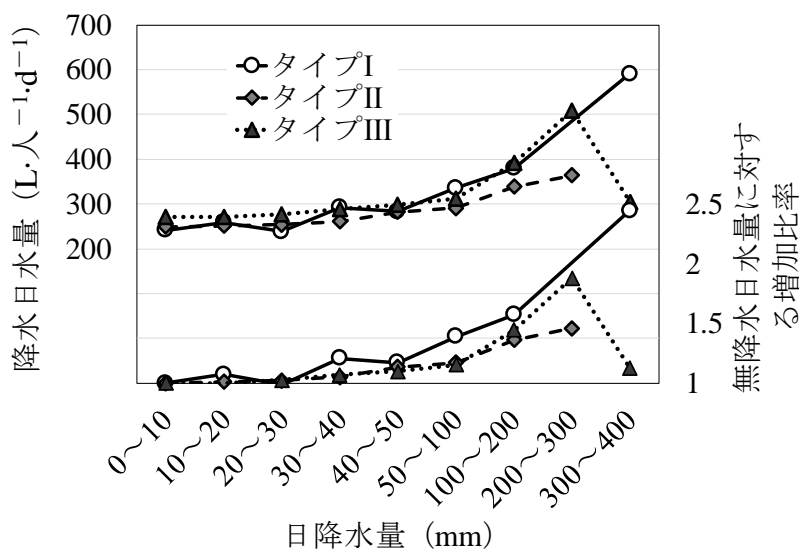


Fig.2.7 調査施設の降水日水量と日降水量の関係

Relation between precipitation and daily flow rates of precipitation day on 3 types of observed rural sewerage facilities

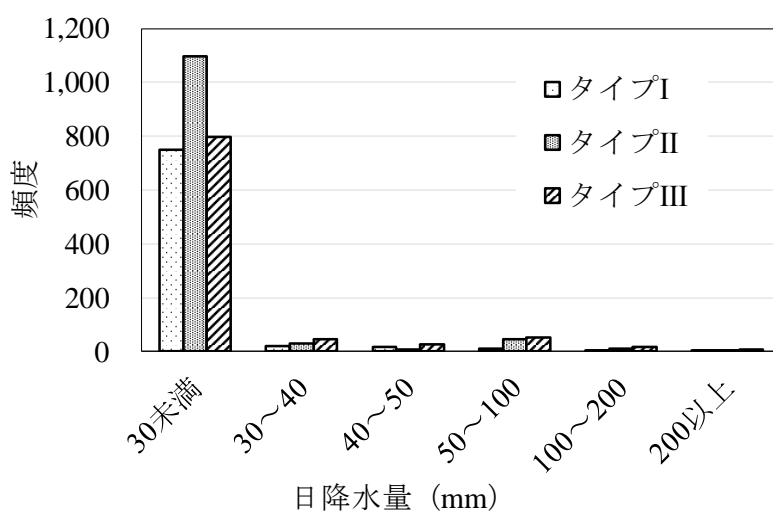


Fig.2.8 調査施設タイプ別の日降水量に対応した降水日の発生頻度

The frequency of precipitation day corresponding to daily precipitation on 3 types of observed rural sewerage facilities

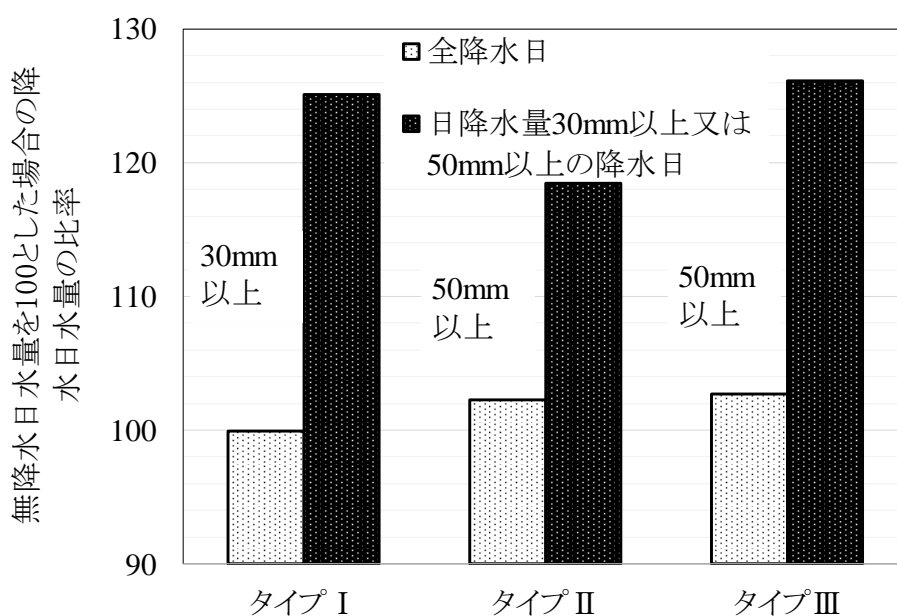


Fig.2.9 調査施設タイプ別の無降水日水量と降水日水量の関係

Relation between daily flow rates of all precipitation days and 30 mm or more precipitation days on 3 types of observed rural sewerage facilities

2.3.1.3 設計諸元設定の定量化と考え方

2.3.1.2で述べた日平均汚水量の影響要因を踏まえ、日平均汚水量の設計基準値の定量化と考え方について検討した。土地利用・立地条件によるタイプ別に、調査施設毎に月別一人当たり日平均水道水量（以下、月別日平均水道水量という）と一人当たり月別日平均降水量（以下、月別日平均降水量という）を説明変数に選択し、重回帰分析による月別一人当たり日平均汚水量（以下、月別日平均汚水量という）の定式化を試みた。月別日平均降水量には、無降雨で値が0となるデータが存在するため、加法式による重回帰式を用いたところ、タイプ別に次式が得られた。

タイプⅠ

$$Yd = 1.29Xd1 + 1.32Xd2 + 38.8 \quad (2.4)$$

タイプⅡ

$$Yd = 1.03Xd1 + 0.08Xd2 + 26.5 \quad (2.5)$$

タイプⅢ

$$Yd = 0.78Xd1 + 0.29Xd2 + 49.8 \quad (2.6)$$

ここで、 Yd ：月別日平均汚水量（ $L \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）， $Xd1$ ：月別日平均水道水量（ $L \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）， $Xd2$ ：月別日平均降水量（ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。

このときの自由度調整済重相関係数は、それぞれ0.95、0.98、0.94であり、実測値と計算値はよく一致している（**Fig.2.10**）。月別日平均汚水量は、供用施設の処理区を土地利用・立地条件タイプに分類することで、月別日平均水道水量と月別日平均降水量から高い精度で推定できることが確認された。日平均汚水量は、農業集落排水施設の整備対象地域や供用施設の処理区を土地利用・立地条件タイプに分類して、日平均水道水量と日平均降水量から算定できるものと考えられる。日最大汚水量に関しては、2.3.1.1の検討結果から調査施設によって観測値には大きな差異が生じているとともに、非超過確率75%値は日最大汚水量の設計基準値の概ね1.9倍の値が得られており、現行の設計基準値（ $300L \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）は過小な値となっている。供用施設の流入汚水量計測機器で観測・記録された実測値に基づいて、非超過確率75%値を求めることによって、施設改築における妥当な日最大汚水量の設計基準値を算定できるものと考えられる。

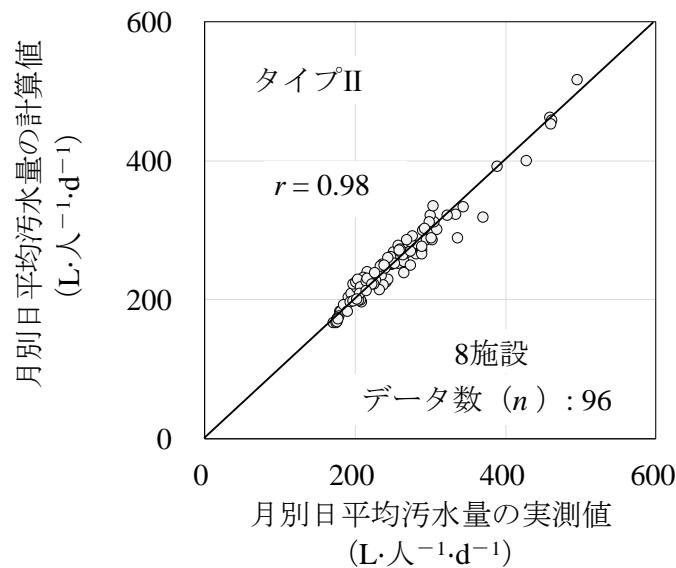


Fig.2.10 調査施設の月別日平均汚水量の実測値と計算値の関係

Relation between observed value and predicted value of daily flow rates on rural sewerage facilities of type II

2.3.2 時間流入汚水量

2.3.2.1 時間流入汚水量と設計諸元の関係

調査施設毎に年間 365 日（ただし，1996 年は 366 日．また，R1 施設では 2007 年と 2014 年）の時間流入汚水量を対象に供用人口で除して，一人当たり時間流入汚水量（以下，時間汚水量という）を算定した．調査施設の時間汚水量は，**Fig.2.11** に示すように 2 回の極大値と極小値が現れるような日周変動を生じている．時間汚水量は前夜 20 時頃のピーク以降から減少しており，夜明け前から午前中の時間帯に最初の極小値（以下，第 1 極小値という）が現れて，最初の極大値（以下，第 1 極大値という）は 6 時台から正午までの午前中に生じている．第 1 極大値と第 1 極小値は，それぞれ $12.0 \sim 36.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ （平均： $22.2 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）， $1.2 \sim 4.4 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ （平均： $2.5 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）の値を示している（**Fig.2.12**）．

時間汚水量の 2 回目の極小値（以下，第 2 極小値という）は午後から夕方の時間帯に生じており，18～23 時台の時間帯には 2 回目の極大値（以下，第 2 極大値という）が起こっている．第 2 極小値と第 2 極大値は，それぞれ $4.3 \sim 11.4 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ （平均： $7.6 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）， $11.2 \sim 30.9 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ （平均： 17.9 L ）

の値が得られた。時間最小汚水量は第 1 極小値であり，調査 20 施設のうち 18 施設で第 1 極大値が時間最大汚水量となっている。調査施設毎に時間汚水量の変動指標である時間最大汚水量とピーク係数（時間最大汚水量を時間平均汚水量で除した値）を求めたところ，それぞれ $12.9 \sim 36.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ （平均： $22.4 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）， $1.4 \sim 3.2$ （平均： 2.1 ）が得られ，いずれも広い範囲に分布している（**Fig.2.13**）。時間最大汚水量は対数正規分布に近い分布であり，母平均区間の推定値は信頼水準 0.99 において $18.8 \sim 25.9 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ と上限値は時間最大汚水量の設計基準値（ $32.5 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）の 8 割程度となっている。時間最大汚水量は対数正規分布に従うものと仮定して，ヘージンプロットによる非超過確率 75% 値を算定したところ，**Fig.2.14** に示すように時間最大汚水量の設計基準値の概ね 8 割の $25.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ が得られた。また，ピーク係数に関しては，その平均値が設計基準値（2.5）の概ね 8 割に相当する 2.1 であり，母平均区間推定値の上限値は信頼水準 0.99 において 2.4 となっている。

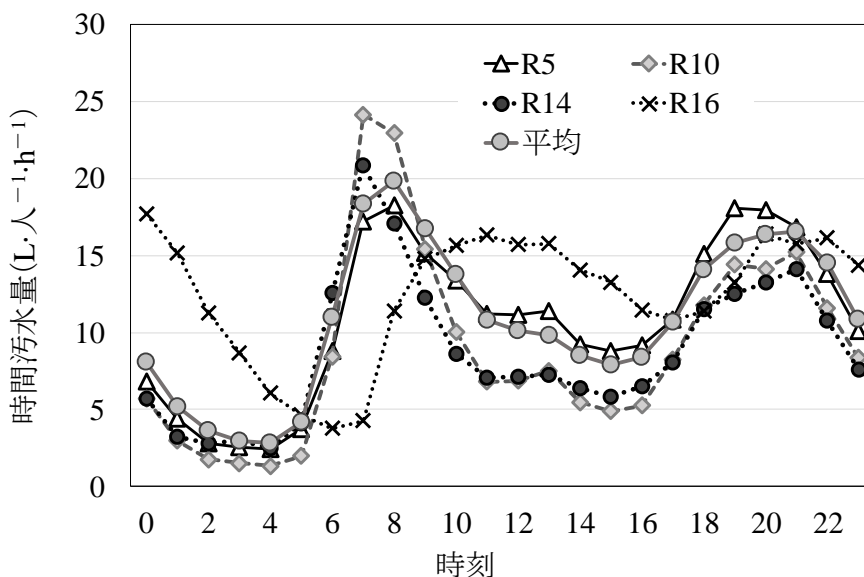


Fig.2.11 調査施設の時間汚水量の日周変動

Daily variation in hourly flow rates on observed rural sewerage facilities

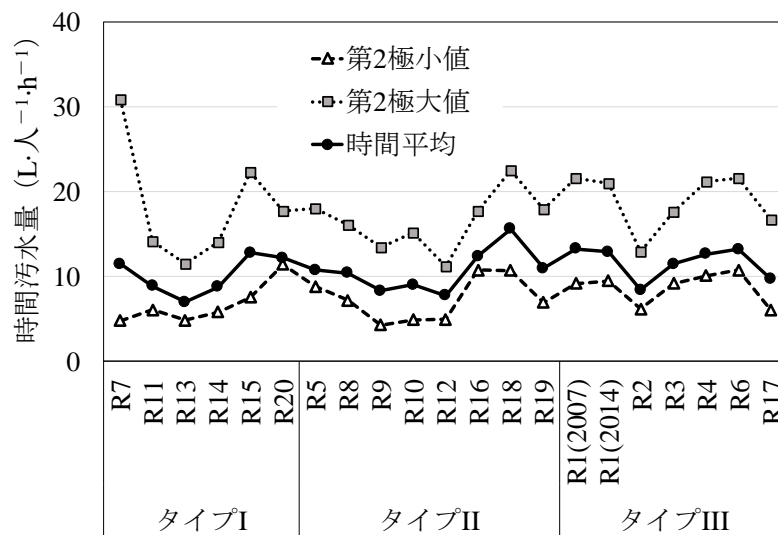
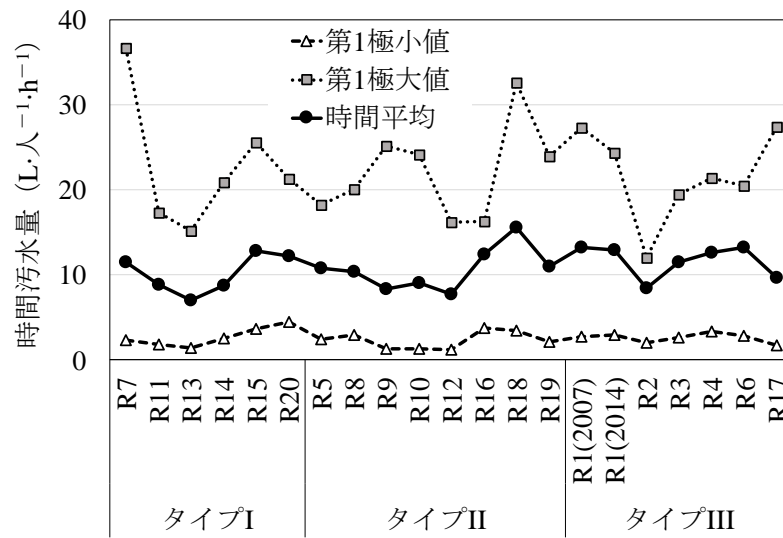


Fig.2.12 調査施設における時間汚水量

Hourly sewerage flow rates on 3 types of observed rural sewerage facilities

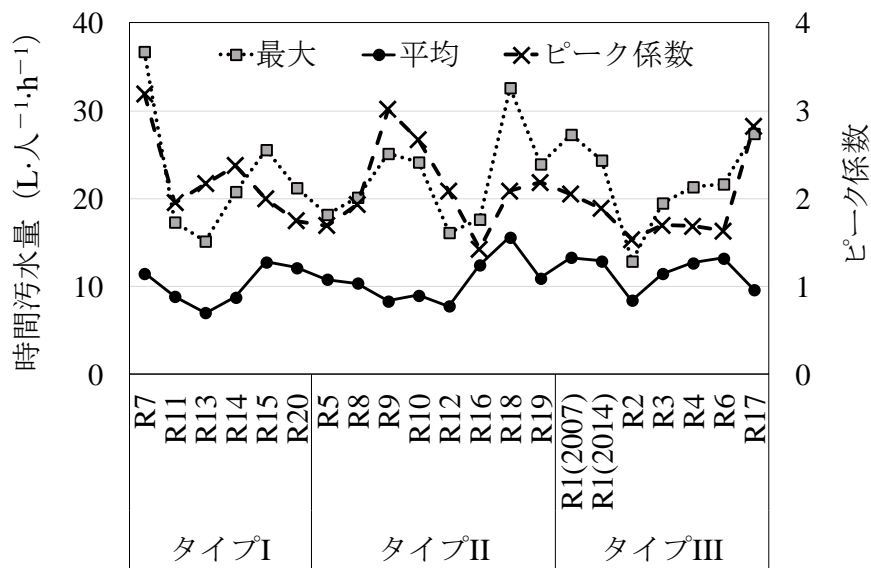


Fig.2.13 調査施設の時間最大汚水量とピーク係数

Maximum hourly flow rates and peak coefficient of sewerage on 3 types of observed rural sewerage facilities

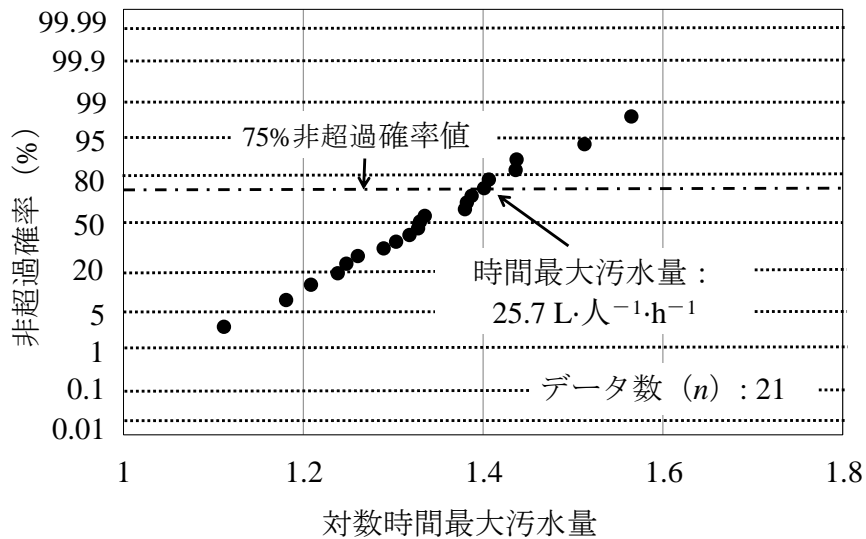


Fig.2.14 調査施設における対数時間最大汚水量分布のあてはめ

Evaluation of probability distribution of logarithmic maximum hourly flow rates on observed rural sewerage facilities

2.3.2.2 時間汚水量の変動要因

時間汚水量について、3タイプに区分したうえで日間変動を検討したところ、**Fig.2.15**に示のように第1、第2極大値と第2極小値はタイプⅠ、Ⅱ、Ⅲの順に高くなる傾向を示すものの、調査施設を3タイプとも極大値と極小値の発生時間帯にはほとんど差異を生じていない。R5施設、R10施設、R16施設は同じタイプⅡに属するものの、**Fig.2.11**に図示したようにR16施設の時間水量はR5施設やR10施設の日間変動とは明らかに異なった挙動を示している。その一方で、タイプⅡであるR10施設の時間水量はタイプⅠに分類されるR14施設の時間水量と類似した日間変動となっており、時間水量の日間変動は土地利用条件や立地条件による顕著な影響は確認されなかった。

そこで、既往研究でピーク係数には管路延長が関与することが確認されていることから（中野，1999），調査施設毎の時間水量日変動幅（時間最大汚水量から時間最小汚水量を差し引いた水量）と管路延長の関係を検討した。両者の相関係数として-0.682（t検定1%有意水準で有意）が得られ、時間汚水量の日間変動には管路延長が影響することが示唆された（**Fig.2.16**）。処理区の規模の指標の一つである処理区面積と時間水量日変動幅についても、両者の間には負の相関（相関係数：-0.689（t検定1%有意水準で有意））が存在しており、時間汚水量の日間変動は処理区面積の増加に伴って小さくなるものと考えられる。

一方、時間水量日変動幅と管路延長の間にはバラツキが認められることから、処理区内の社会生活活動の指標と考えられる流入人口率（流入人口を供用人口で除して100を乗じた値）に着目して、時間水量日変動幅との関係を検討した。両者の間には負の相関（相関係数：-0.522（t検定5%有意水準で有意））が存在しており、流時間水量日変動幅は流入人口率の増加に伴って小さくなっていることが確認された。なお、R16施設は、**Fig.2.16**に図示したように管路延長が長く、また、流入人口率が高いために、他の施設の日間変動とは異なった挙動を示すものと推察される。さらに、生活排水の処理施設への流入に関与する条件として供用率（供用人口を計画人口で除してを乗じた値）を選定して、R1施設を例に時間水量日変動幅との関係を検証したところ、**Fig.2.16**に図示したように供用率が増加すると時間水量日変動幅は低下しているといえる。

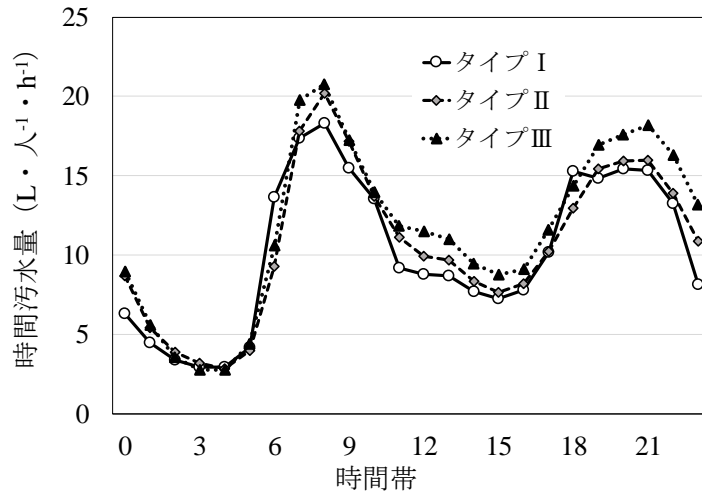


Fig.2.15 タイプ別の時間汚水量の日周変動

Daily variation of hourly flow rates on 3 types of observed rural sewerage facilities

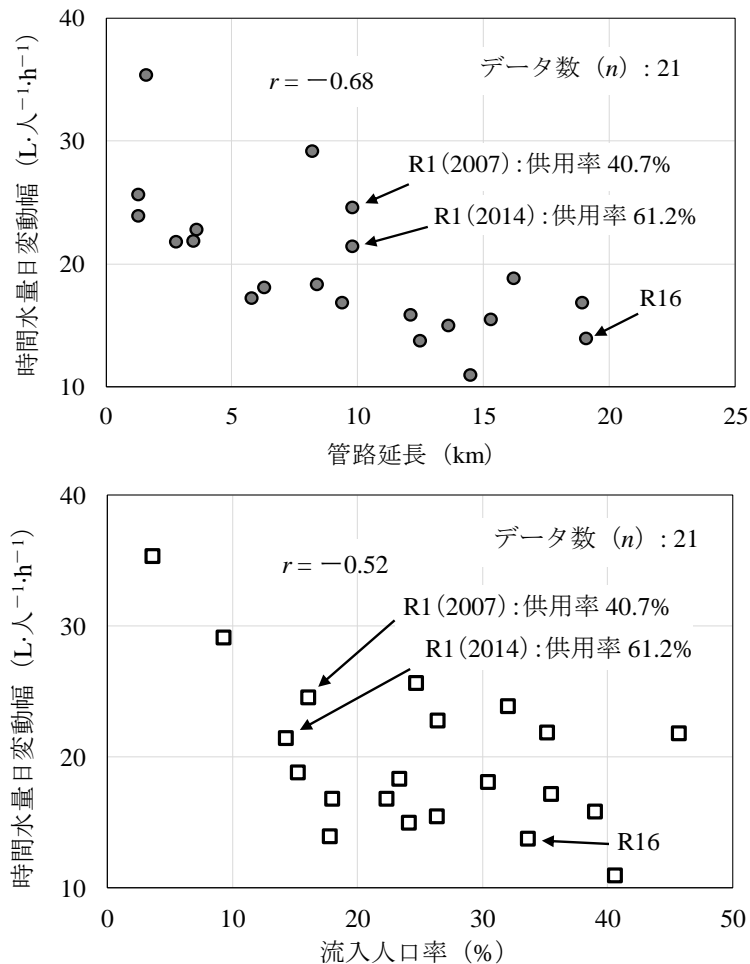


Fig.2.16 調査施設の管路延長と流入人口率に対する時間水量日変動幅の関係

Relation between daily variation in hourly flow rates of sewerage and extension of the sewage duct line or floating population rate on observed rural sewerage facilities

2.3.2.3 設計諸元設定の定量化と考え方

2.3.2.2 で述べた時間汚水量の影響要因を踏まえ、時間汚水量の設計基準値の定量化と考え方について検討した。調査施設毎に時間水量日変動幅について、処理区規模指標、処理施設流入条件指標、及び社会生活活動指標として管路延長、供用率、流入人口率を説明変数に選択し、重回帰分析による定式化を試みた。重回帰式には加法式と乗法式を用いて次式を求めた。

$$Yha = -0.81Xh1 - 0.07Xh2 - 0.25Xh3 + 38.8 \quad (2.7)$$

$$Yha = 88.52Xh1^{-0.22} \cdot Xh2^{-0.12} \cdot Xh3^{-0.20} \quad (2.8)$$

ここで、 Yha ：時間水量日変動幅 ($L \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)， $Xh1$ ：管路延長 (km)， $Xh2$ ：供用率 (%)， $Xh3$ ：流入人口率 (%)。

このときの自由度調整済重相関係数は、それぞれ 0.946，0.904 であり、**Fig.2.17** に示すとおり、時間水量日変動幅に係る実測値と計算値はよく一致している。また、ピーク係数は、前処理設備の諸元設定に用いられる時間最大汚水量を求めるための重要な設計基準値である（編集代表 谷山，2000）。このため、調査施設毎のピーク係数についても、同様に加法式と乗法式を用いてこれらの説明変数（管路延長、供用率、及び流入人口率）による重回帰分析を試みたところ、次式が得られた。

$$Pc = -0.065Xh1 - 0.004Xh2 - 0.008Xh3 + 3.17 \quad (2.9)$$

$$Pc = 0.85Xh1^{-0.21} \cdot Xh2^{-0.03} \cdot Xh3^{-0.06} \quad (2.10)$$

ここで、 Pc ：ピーク係数。

このときの自由度調整済重相関係数は、それぞれ 0.825，0.853 であり、ピーク係数の実測値と計算値に関しても 0.8 以上の相関値が得られており、管路延長、供用率、及び流入人口率から一定精度でピーク係数を推定できることが確認された（**Fig.2.18**）。農業集落排水施設の整備対象地域や供用施設の処理区の管路延長、供用率、及び流入人口率から、時間水量日変動幅やピーク係数を算定できるものと考えられる。処理区規模指標（管路延長や処理区面積）、処理施設流入条件指標（供用率）、社会生活活動指標（流入人口率）を考慮することで供用施設等の実態に即した妥当な時間汚水量の設計基準値を設定できるものと考えられる。

日降水量が $100\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ を超えると **Fig.2.7** に示すように日平均汚水量の増

加が顕著に現れる。 $100\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ を超えるような降雨イベントの発生頻度は少ないものの、降水に伴う多量の不明水浸入によって、ポンプ施設や前処理設備の容量不足を起して、供用施設の運転管理に支障をきたすことがある(李ら, 2017a)。降雨イベントに伴う不明水量の定量的な挙動を把握するため、 $100\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上の降雨イベントを対象に時間汚水量から無降水時の時間平均汚水量を差し引いて、時間降水量に対応する不明水量を推定した。

Fig.2.19 には R1 施設 (2014)、R2 施設、及び R4 施設において、それぞれ降水量が 142mm, 253mm, 231mm の場合の不明水量を示している。この 3 施設はタイプ III に属しているが、**Table 2.5** に示すように管路延長、供用率、流入人口率は異なっている。不明水量は降雨開始後数時間で処理施設に到達するとともに、降雨イベントが長くなると不明水の処理施設への流入が長時間にわたることが確認された。

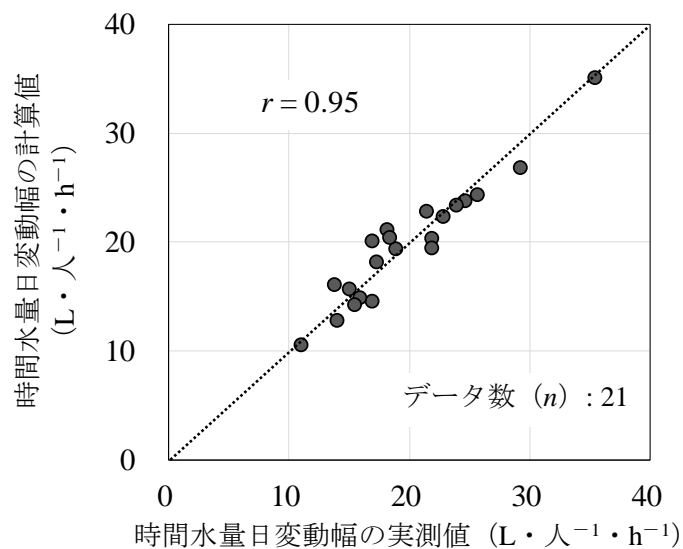


Fig.2.17 調査施設の時間水量日変動幅の実測値と計算値の関係

Relation between observed value and predicted value of daily fluctuation in hourly sewerage flow rates on observed rural sewerage facilities

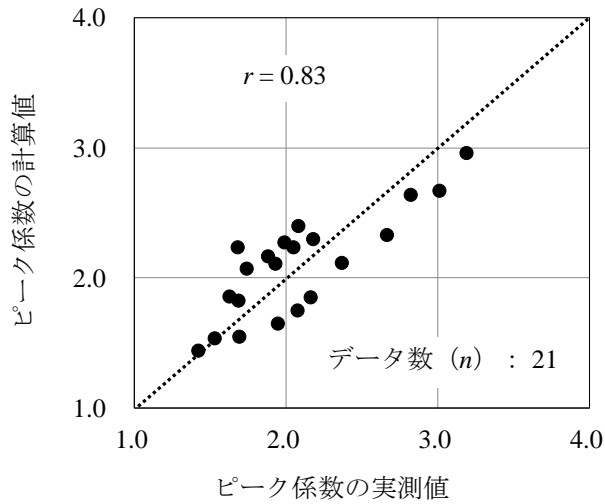


Fig.2.18 調査施設のピーク係数の実測値と計算値の関係

Relation between observed value and predicted value of peak coefficient on observed rural sewerage facilities

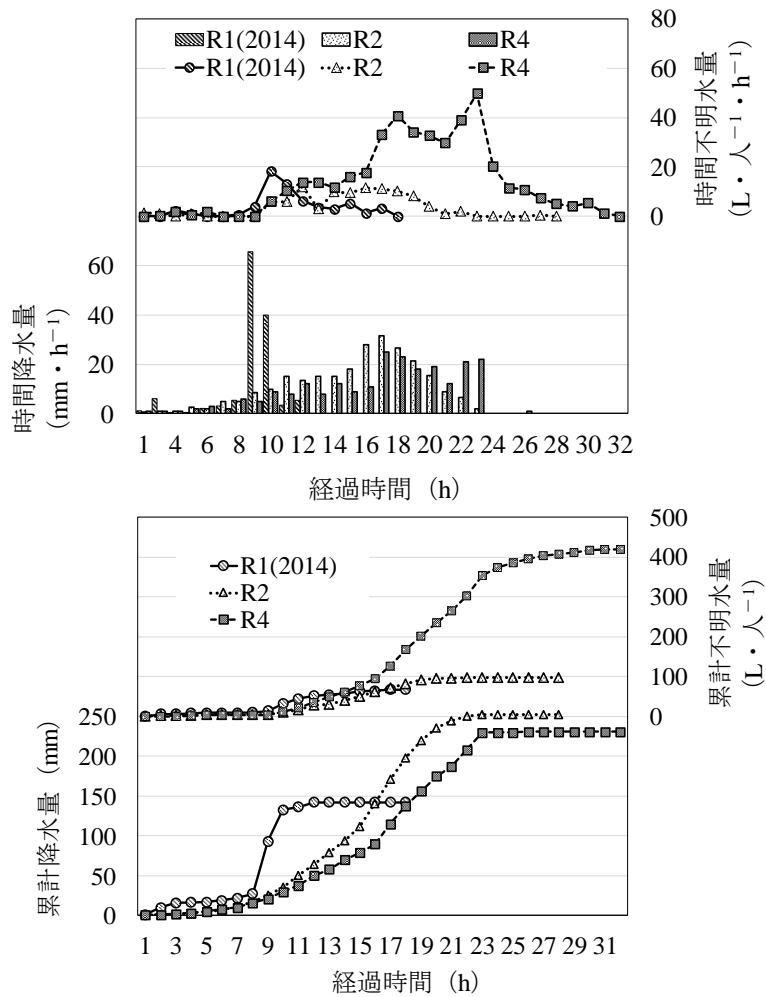


Fig.2.19 調査施設の降水量と不明水量の推移

Relation between precipitation and unidentified inflow on on observed rural sewerage facilities

Table 2.5 調査施設の管路延長，供用率，及び流入人口率

Duct line extension, utilization rate, floating population rate of on observed rural sewerage facilities

施設名	管路延長 (km)	供用率 (%)	流入人口率 (%)
R1(2014)	9.8	61.2	14.3
R2	18.9	60.2	18.0
R4	14.5	86.5	40.6

2.4 要約

本研究は，農業集落排水施設の流入汚水量の実態把握と変動要因の検討を通じて，設計諸元の定量化と設定について考察したものであり，得られた検討結果は以下のとおりである．

- (1) 日流入汚水量は， $87.8 \sim 813.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ （平均値： $261.1 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）の広い範囲に分布している．日最大汚水量の非超過確率 75% 値と母平均区間推定値（信頼水準 0.99）の上限は，それぞれ $567.6 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ， $576.0 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ であり，設計基準値（ $300 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）の約 1.9 倍を示しており，現行設計基準値は過小な値となっているものと考えられる．また，日平均汚水量の非超過確率 75% 値と母平均区間推定値（信頼水準 0.99）の上限は，それぞれ $298.2 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ， $294.6 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ が得られ，設計基準値（ $270 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）に比較して 1 割程度大きな値であることを確認できた．
- (2) 日平均汚水量には，処理区の土地利用条件（水田，畑，樹園地）と低平地，立地条件（低平地，平地・平野，中山間・海岸沿い・傾斜地等）が影響していることを確認できた．処理区の土地利用・立地条件を 3 タイプに分類して，月別日平均水道水量と月別日平均降水量を説明変数とす

る重回帰式から精度よく月別日平均汚水量が推定できることを明らかにした。

- (3) 時間流入汚水量は極大値には極小値がそれぞれ 2 回生じる変動を示しており，広い範囲（ $1.2 \sim 36.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）にまたがっている．時間最大汚水量は，対数正規分布特性を有し，非超過確率 75% 値（ $25.7 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）は設計基準値（ $32.5 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）の概ね 8 割となっている．ピーク係数の 75% 非超過確率値は設計基準値（2.5）の概ね 9 割の 2.4 であることが確認された．
- (4) 時間流入汚水量の日間変動には，処理区規模指標（管路延長，処理区面積），処理施設流入条件指標（供用率），及び社会生活活動指標（流入人口比率）が関与していることが確認された．これらを説明変数とする重回帰式から高い精度で時間水量日変動幅やピーク係数を推定できることを明らかにできた．
- (5) 日流入汚水量においては，農業集落排水施設の整備対象地域や供用施設の水道水量と日平均降水量に土地利用と立地条件を加味することで，日平均汚水量に係る設計基準値を設定できることが分かった．日最大汚水量は，実測値から非超過確率 75% 値を求めることで供用施設に即した妥当な設計基準値を設定できるものと考えられる．また，処理区規模指標（管路延長や処理区面積），処理施設流入条件指標（供用率），社会生活活動指標（流入人口率）を考慮することで供用施設等の実態に即した妥当な時間汚水量に係る設計基準値を設定できるものと考えられる．

第3章 状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出に関する研究

3.1 概説

農業集落排水施設の新規整備と併せて、既存施設の維持管理や更新期を迎えた施設の改築が大きな課題となっている。特に管路網の破損を原因とした降雨時の施設のキャパシティを超えた流入量の増大は、施設の運用や周辺環境にも悪影響を与える大きな問題となっており、円滑な農業集落排水施設の維持管理の実施や改築に当たっては、供用施設や改築対象施設における流入水量の実態とその変動特性を適切に把握することが求められる。農業集落排水施設の流入水量については、流入水量の日間変動（田中，1984；安田，1988；村山，1988；谷山ら，1989）や降水の日流入水量への影響（高橋・西口，1987）等が報告されているが、定量的に研究されている文献は極めて少ないのが現状である。また、筆者らの調査研究によって、農業集落排水施設の流入水量や変動特性には、供用人口、水道使用量、降雨に伴う不明水、管路延長等が関与することが確認されている（中野ら，1999）。

一方、農業集落排水施設の流入水量に係る時系列データに関しては、降雨や供用人口に対応するイベント的な成分やノイズ成分に分解したうえで、流入水量に係る変動要因やその特性を考察することが必要であるが、状態ベクトルを用いた統計モデルはこのための有効なツールとなりうる。河川の計画・管理分野においては、水位・流量に係る長期間の時系列変動データが存在しており、状態ベクトルを用いた統計モデルが観測で得られた実測データから河川流量の変動特性の把握や不確実性の評価等に適用されている（田中ら，2014；杉浦・田中，2014；キムら，2014）。

そこで、本報では、稼働中の農業集落排水施設から得られた実測データに基づき、農業集落排水施設流入水における既知の日水量負荷変動成分について、状態空間モデルを適用し、農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動の把握と変動特性の抽出を試み、日水量負荷の変動要因について考察した。

3.2 研究方法

3.2.1 調査施設

調査施設は、和歌山県上富田町 I 施設、沖縄県恩納村 K 施設と Y 施設、沖縄県宜野座村 O 施設と S 施設、及び沖縄県金武町 A 施設の 6 施設であり、施設処理区の管路には自然流下方式が採用されている (Table 3.1)。I 施設は状態空間モデルの適用による主な検討対象施設であるとともに、適用モデルに対する汎用性の検証等の解析には他の 5 施設の観測データを用いた。I 施設は 2003 年 7 月に供用を開始しており、解析対象期間は供用開始直後の 2003 年 8 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日 (11 年 5 ヶ月間) である。I 施設以外の 5 施設については、Y 施設と S 施設が 2014 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の 1 年間、また、A 施設、K 施設、及び O 施設に関しては 2015 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の 1 年間を解析対象期間とした。さらに、I 施設、K 施設と Y 施設、O 施設と S 施設、及び A 施設の処理区に係る時間降水量、水道使用量 (月別)、供用人口 (月別) に関しては、それぞれ上富田町上下水道課、恩納村上下水道課、宜野座村上下水道課、金武町上下水道課の所有する記録データを使用した。

Table 3.1 調査施設

Observed rural sewerage facilities

施設名	設置場所	計画人口 (人)	供用人口 (人)	管路延長 (m)
I	和歌山県上富田町	949	581	9,802
K	沖縄県恩納村	520	335	6,300
Y	沖縄県恩納村	2,580	1,552	18,923
O	沖縄県宜野座村	3,000	1,759	12,100
S	沖縄県宜野座村	1,940	1,679	14,500
A	沖縄県金武町	1,750	585	16,200

※供用人口は、2014 年 12 月時点の値である。

3.2.2 解析手法

農業集落排水施設の日水量負荷量には、人口の変動に伴って増減する長期的な非周期変動成分（以下、トレンド成分という）、季節的に変化する年間の周期パターン、曜日によって流量が増減する週間のパターン、降水によって増減するパターンなど、様々な時間スケールで様々な変動特性を持った変動の重ね合わせとして考えられる（中野ら，1999）。このような変動パターンからいくつかの成分に分解する手法としては、多重回帰分析，調和解析，スペクトル分解などの手法が挙げられるが，任意の時系列データに対応したパターン，又は，三角関数（sin/cos）のいずれかで分解することになる。一方，日水量負荷データに関しては，人口や降水量の時系列データといった任意の時系列変動を有するパターンと，年周期変動といった一定の周期性のあるパターン（必ずしも三角関数での表現が効率的ではない場合がある）のどちらも含んでおり，両方を同時に分解することは，多重回帰分析，調和解析，スペクトル分解のどの手法も適用することができない。

そこで，本研究では，農業集落排水施設の日水量負荷データの成分分解について，回帰パターンや周期的なパターンが分解可能であり，可読性も高い状態空間モデルによる解析を用いた（樋口，2011）。状態空間モデルは，解析者が時系列データのモデル式を自由に選択して，そのモデルを時系列データにフィットさせることで成分分解を行う解析手法である。

状態空間モデルにおいては，（3.1）式（ベクトルは紙面の都合で折り返して表記）のように「状態空間ベクトル」が定義される。

$$x_t = \begin{matrix} T[\mu_t & \mu_{t-1} & S_{1,t} & S_{1,t}^* & S_{2,t} & S_{2,t}^* \\ S_t & S_{t-1} & S_{t-2} & S_{t-3} & S_{t-4} & S_{t-5} & \gamma_{R,t}] \end{matrix} \quad (3.1)$$

ここで，添え字 t は時刻， μ_t ：時刻 t におけるトレンド成分の日水量， S_t ：時刻 t における季節成分の日水量， s_t ：時刻 t における週間成分の日水量， γ_R ：降水に対応する日水量成分を算出するモデルのパラメータ， T ：転置。

また，状態空間モデルは，（3.2）～（3.8）式に示すように，状態空間ベクトルを時刻ごとに更新するモデル（以下，システムモデルという）と状態ベクトルから観測値を得るモデル（以下，観測モデルという）から構成される。

【システムモデル】

$$x_t = F_t x_{t-1} + G_t v_t \quad (3.2)$$

$$F_t = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \omega_1 & \sin \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \omega_1 & \cos \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \omega_2 & \sin \omega_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \omega_2 & \cos \omega_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$v_t = {}^T [v_{\mu,t}, v_{st}] \quad (3.4)$$

$$G_t = {}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

【観測モデル】

$$y_t = H_t x_t + w_t \quad (3.6)$$

$$H_t = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ f_R(d_{3,t})] \quad (3.7)$$

$$w_t \sim N(0, \sigma^2) \quad (3.8)$$

ここで、 $v_{\mu,t}$ ：トレンド成分の誤差， $v_{s,t}$ ：日成分の誤差， v_t ：これらをまとめたベクトル， y_t ：観測値， f_R ：降水と流量の応答は既定関数， d_t ：時刻 t の降水量データ， σ ：観測誤差の分散， w_t ：観測誤差， $N(0, \sigma^2)$ ：平均値 0 ・分散 (σ) のガウス分布， j ：周期， ω_j は (3.9) 式のとおりである。

$$\omega_j = \frac{2\pi j}{365.25} \quad (3.9)$$

具体的な演算手法としては，状態空間ベクトルの初期値が所与の場合に，ひとつ前の時刻の状態空間ベクトル (x_{t-1}) から現在の時刻の状態空間ベクトル (x_t) に更新が行われる．観測モデルでは，得られた状態ベクトルを基に観測値が得られる様子を表記している．観測値が実際の値とよく整合するように状態空間モデルに含まれるパラメータを最尤推定により推定することで，状態空間モデルが完成する．一方，システムモデルでは，①トレンド成分，②季節変動成分，③週間変動成分，④降水に対応した回帰成分の4つの成分の重ね合わせとしてモデル表現している．

①トレンド成分

トレンド成分は，システムモデル中の上段の2つの連立方程式で表現されており，次式に示すようにトレンドとして抽出された値 (μ) と実際の値 (y) との誤差が小さく，かつ時間展開の中のデータの変化の傾きを最小化するようなモデルとして構築した．

$$\mu_t = 2\mu_{t-1} - \mu_{t-2} + v_{\mu,t} \quad (3.10)$$

$$y_t = \mu_t + N(0, \sigma^2) \quad (3.11)$$

②季節変動成分

季節変動成分は，システムモデル中の連立方程式の上から3つ目～上から6つ目の連立方程式で表現している．もともとのシステムモデルは，調和分解（三角関数を用いた直交分解）の形で表現されており，周期 T としては，(3.12)式に示すように1年周期（365.25日周期）と $1/2T$ 周期までを表現することとした．

$$S_t = \sum_{j=1}^2 \left(a_j(t) \cos\left(\frac{2\pi j t}{365.25}\right) + b_j(t) \cos\left(\frac{2\pi j t}{365.25}\right) \right) \quad (3.12)$$

ここで， $a_j(t)$ ， $b_j(t)$ ：時刻 t における各周波数帯 j の振動幅．ただし，数十年と

いう長期間の季節変動成分の抽出を行うため、季節変動の特徴も数十年前と現在では異なっている可能性があるため、 a_j 、 b_j は定数ではなく、時間の変数の形になっており、時間方向に変動していくことを許容するモデルとした。ただし、お盆や年末・年始に伴う変動成分は無視している。

(3.12)式は、モデルが周波数空間に分解された時系列データの総和であることをすぐさま理解できる形式で表現されているが、このモデルを状態空間モデルに自然に組み込むために、(3.13)式に変換をして、 a_j 、 b_j の2つのパラメータを有するものから、 S_j と S_j^* の2つの状態形式に変換（共役調和項の性質を利用して、 a_j 、 b_j というパラメータを計算することなしに、 S_t の情報のみから S_{t+1} を計算する一般的な方法）したものである。

$$\begin{bmatrix} S_{1,t+1} \\ S_{1,t+1}^* \\ S_{1,t+1} \\ S_{2,t+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1) & \sin(\omega_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\omega_1) & \cos(\omega_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_1) & \sin(\omega_1) \\ 0 & 0 & -\sin(\omega_1) & \cos(\omega_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{1,t} \\ S_{1,t}^* \\ S_{1,t} \\ S_{2,t}^* \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

③ 週間変動成分

週間変動成分は、システムモデル中の連立方程式の上から7つ目～下から2つ目の連立方程式で表現している。これらの連立方程式は、同じ曜日の流量が似ていること（すなわち差が0に近いこと）、なおかつ週パターンはあまり変化しないこと（すなわち移動平均的な評価として週間周期の合計が0に近いこと）の2つの視点を評価するようなモデル形式になっている。

時刻 t の週間変動成分は、1週間の状態空間ベクトルを用いると(3.14)式（6段ある連立方程式の最上段）から得ることができる。

$$S_t = -\sum_{l=1}^6 S_{t-l} + v_{s,t} \quad (3.14)$$

(3.14)式は、 $v_{s,t}$ の平均値が0であることを留意すると、週の合計が0に近いということに相違ない。6段ある連立方程式の最上段以下の5段分は、 t の更新に伴って、週間変動の値を1日ずつずらしているということがすぐに理解できる。この操作により、1週間分の値を状態空間ベクトルに記憶させておき、

順次必要な時に値を用いることができる。これらの操作が組み合わさって、同じ曜日の値の差が 0 に近いことをモデル化している。

④ 降水に対応した回帰成分

降水に対応した回帰成分（ここでは R_t とした）は、システムモデル中の連立方程式の最下段の方程式で表現している。降水による変動パターンは、システムモデル・観測モデルの両方を反映した形としての回帰成分は、次式として記述できる。

$$R_t = \gamma_R \cdot f_R(d_{3,t}) = \gamma_R \times (a_R d_{3,t} + b_R) \quad (3.15)$$

ここで、 a_R , b_R : 比例定数。回帰モデル ($f_R()$) は様々なものが想定できるが、ここでは線形関数として取り扱えることを前提にしてモデル化した。

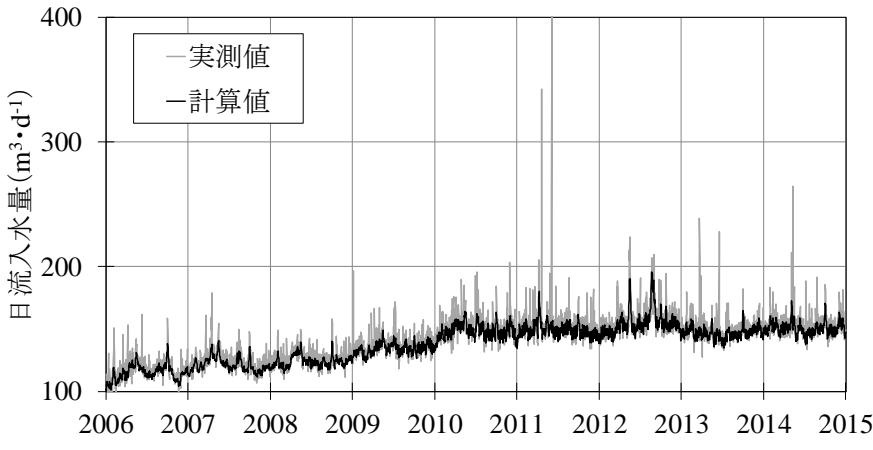
3.3 結果と考察

3.3.1 日流入水量の時系列的な変動特性と変動要因

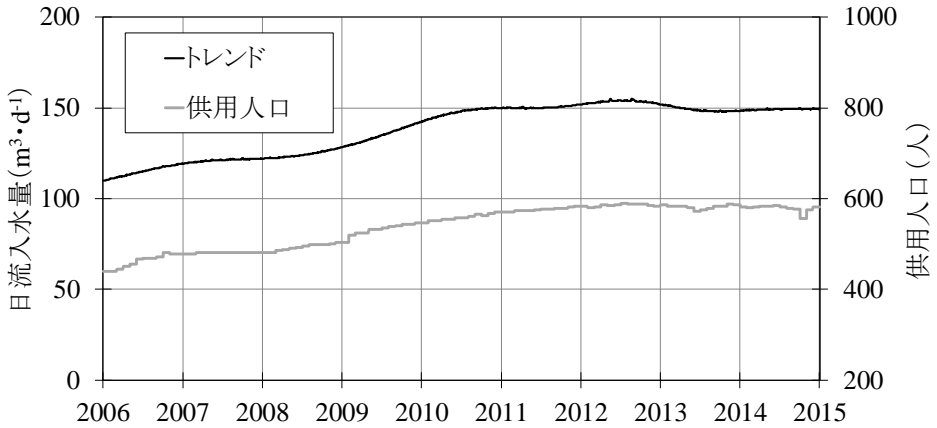
I 施設の日流入水量について、3.2.2 で構築した状態空間モデルを適用して、①トレンド成分 (**Fig.3.1(b)**)、②季節変動成分 (**Fig.3.1(c)**)、③週間変動成分 (**Fig.3.1(d)**)、④降水に対応した回帰成分 (**Fig.3.1(e)**) の四成分を抽出した (金, 2007)。**Fig.3.1(a)**には、実測データと状態空間モデルによって算定された計算値を示しているが、両者の相関係数として 0.843 の値が得られており、視覚的に判別できる変動特性をよく再現できている。一方、降雨イベントに伴う流入水の処理施設までの到達時間は降雨強度と降雨時間によって変化しており、降雨量の増加に従い影響時間も長くなることが確認されている (李・中野, 2016)。2 日間の連続降雨のような規模の大きい降雨イベントに伴う日流入水量については、先行降雨の影響により日単位で計算された流入水量の実測値と計算値に差異を生じているものと考えられる。

また、日流入水量の非周期性変動として抽出されたトレンド成分は、**Fig.3.1(b)**に示すように供用人口の変動とよく対応しており、トレンド成分と供用人口は直線回帰関係にあることが確認された (**Fig.3.2**)。このため、I 施

設の日流入水量について、日水道使用量と供用人口が月別データであることを踏まえ、月別平均値に整理したうえで経時変化を検討したところ、**Fig.3.3**に示すように月別日流入水量は月別供用人口と月別水道使用量に対応して増加している。月別日流入水量と月別日水道使用量は、両者とも月別供用人口と高い正の相関（月別日流入水量に係る相関係数：0.983，月別水道使用量日量に係る相関係数：0.957）を有しており、日流入水量と日水道使用量は供用人口の増加

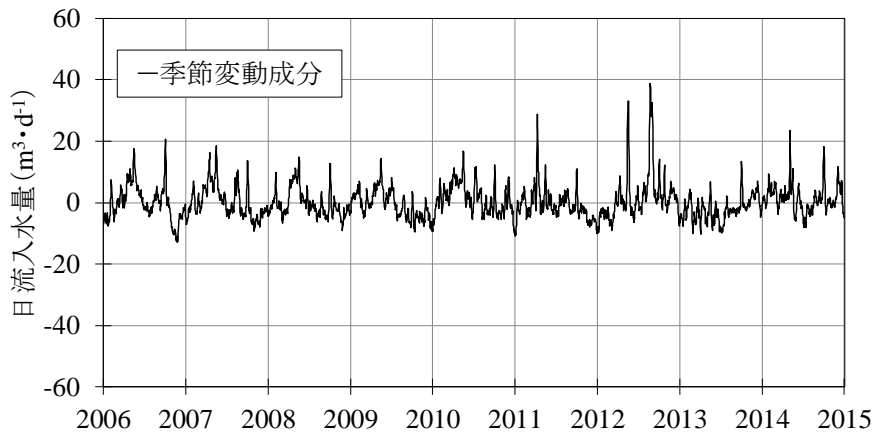


(a) 実測値と計算値の比較

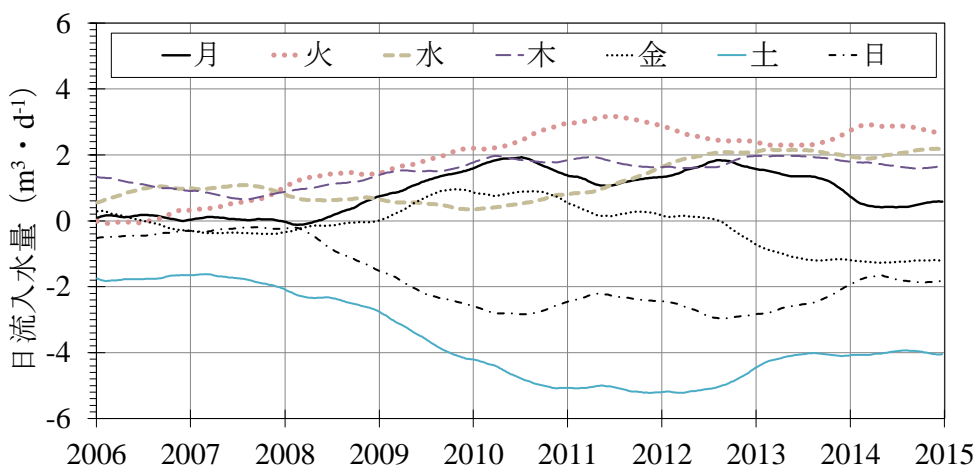


(b) トレンド成分と供用人口

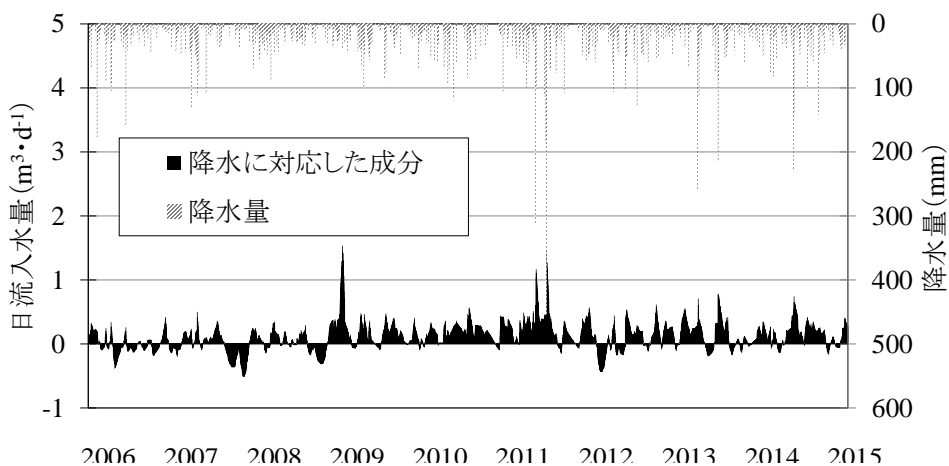
Fig.3.1(a)(b) I施設の状態空間モデルを用いて分離された日流入水量の時系列変動成分
 Time sequence variation components on mean daily inflow rate of wastewater
 obtained by executing state space model analysis on I observed rural sewerage
 facility



(c) 季節変動成分



(d) 週間変動成分



(e) 降水に対応した回帰成分と日降水量

Fig.3.1(c)~(e) I施設の状態空間モデルを用いて分離された日流入水量の時系列変動成分
 Time sequence variation components on mean daily inflow rate of wastewater
 obtained by executing state space model analysis on I observed rural sewerage
 facility

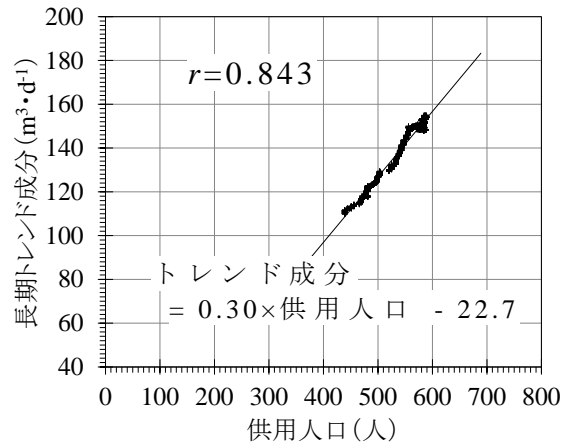


Fig.3.2 I施設におけるトレンド成分と供用人口の関係

Relation between trend components on daily inflow rate of wastewater and number of users on I observed rural sewerage facility

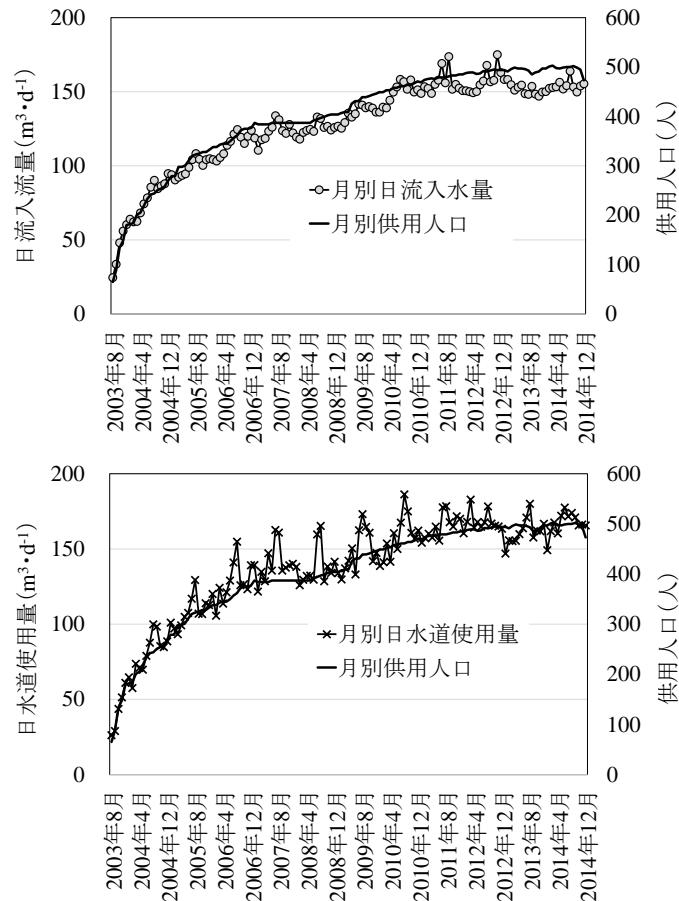


Fig.3.3 I施設の月別日流入水量，月別供用人口，及び月別日水道使用量の経時変化

Long-term observation data in daily inflow rate of month average wastewater, number of users and mean daily discharge amount of drinking water on I observed rural sewerage facility

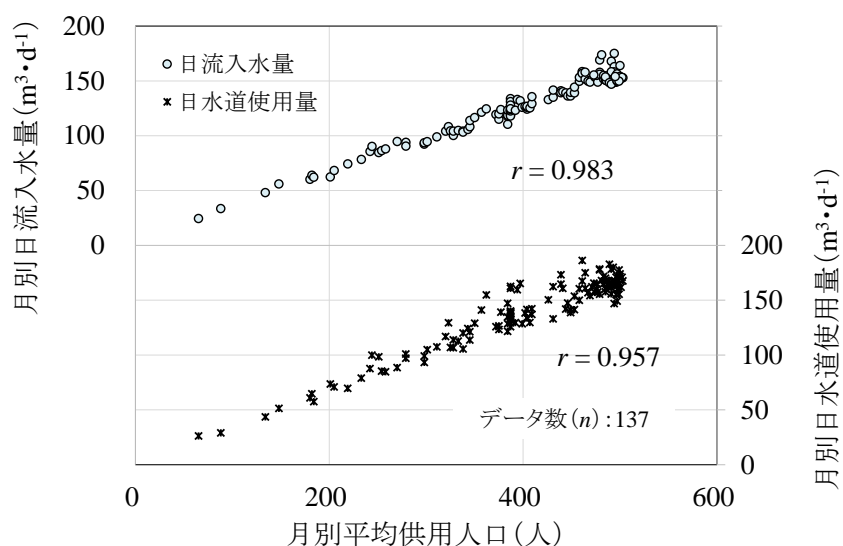


Fig.3.4 I 施設における月別供用人口と月別日流入水量・月別日水道使用量の関係

Relation between number of users and daily inflow rate of month average wastewater/mean daily discharge amount of drinking water on I observed rural sewerage facility

に伴って大きな値を示している。これらのことから、供用開始からの水量負荷の変動には、供用人口に伴って増加した水道使用量に対応して流入水量が増えた結果、I 施設の日流入水量のトレンド変化として現れたものと考えられる (**Fig.3.4**)。

一方、I 施設の日流入水量には **Fig.3.1(e)** に示すように降水量に対応して変化する不規則な変動成分が存在していることから、日降水量について日流入水量の関係を検証したところ、両者の間には正の相関（相関係数：0.467（1%有意水準に対応する F 値（6.64）に対して検定値は 268.33 であり、1%以下の水準で十分に有意））を有していることが確認された (**Fig.3.5**)。降水に伴う変動成分に関しては、降雨時に流量が増加する変動パターンは抽出できているが、2009 年には降雨の少ないタイミングで大きな流量が検出されるなど、推定精度には課題がある。この推定精度の課題は、**Fig.3.6** に示したとおり、降水量と日流入水量の関係は単純な線形の回帰式で表現できず、一定の閾値以上の降水に伴う流量増加を生じる特性があることから、状態空間モデルによる日流入水量の回帰値が実測値に比べて変動幅が過小に見積られることが挙げられる（負

の値がみられることも線形関数であることに起因)。降水と流量の対応関係には、時間遅れがあることも容易に想像でき、この視点を踏まえた解析を行うには日流量データよりも、時間流量データを用いた詳細な検討が望ましい。これは今後の課題であり、降水に対する流量変動の予測に向けては、時間流量データによる時間遅れを反映した解析が有効であることから、この状態空間モデルをより現実的なモデルにすることが考えられる。

以上を要約すると、I施設の日流入水量の時系列変動は、状態空間モデルによりトレンド成分、季節変動成分、週間変動成分、及び降水に対応した変動成分の四成分に分離され、実測値に比べて計算値（両者の相関係数：0.843）は変動幅が小さく見積もられているものの、視覚的に判別できる大まかな変動の特徴をよく再現できることが分かった。また、非周期性変動成分には（i）供用人口に連動して右肩上がりに増加するトレンドと（ii）降水に対応した流量増加が存在している。供用人口に連動するトレンド変化には処理区の水道使用量が関与している。農業集落排水施設流入水の日水量負荷には、供用人口に対応して流量変動する水道使用量とともに、降水量による変動要因が影響しているものと考えられる。

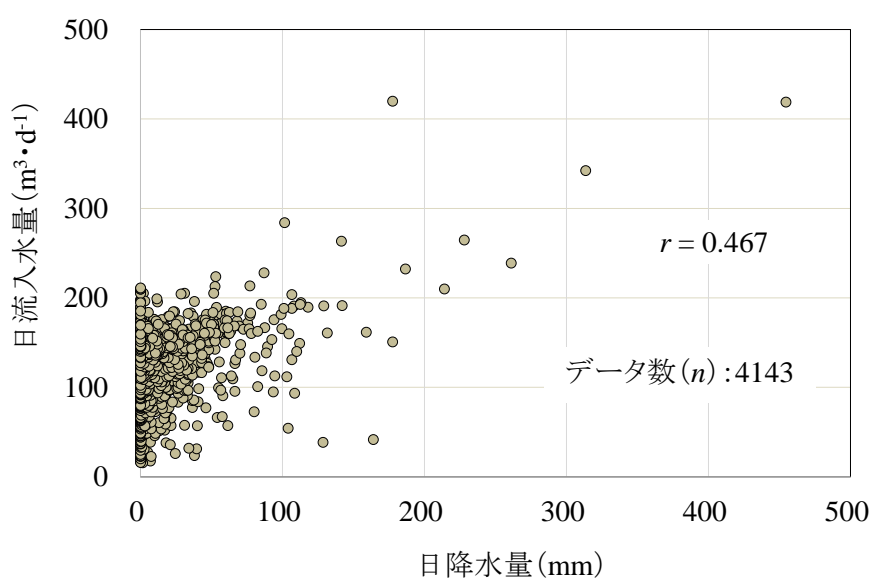


Fig.3.5 I施設の日流入水量と日降水量の関係

Relation between daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility and daily precipitation

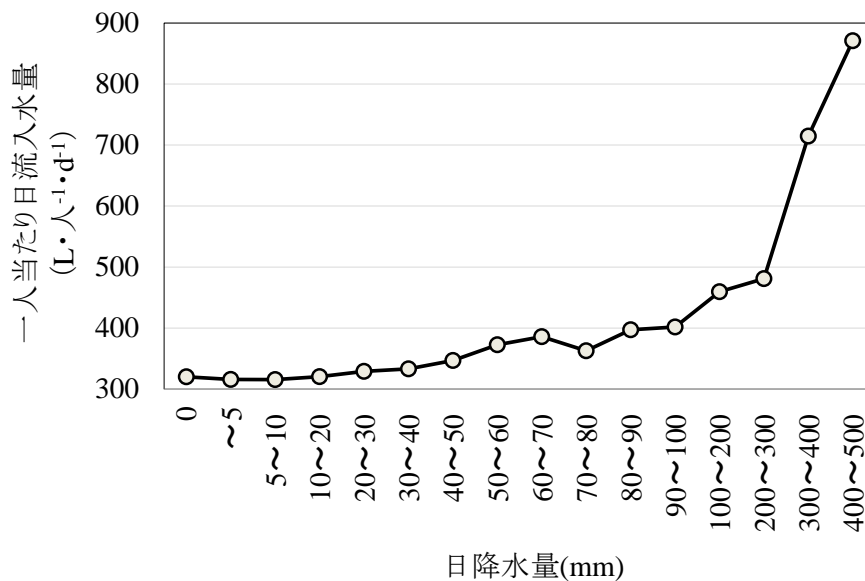


Fig.3.6 I施設の一人当たり日流入水量と日降水量の関係

Relation between mean daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility and daily precipitation

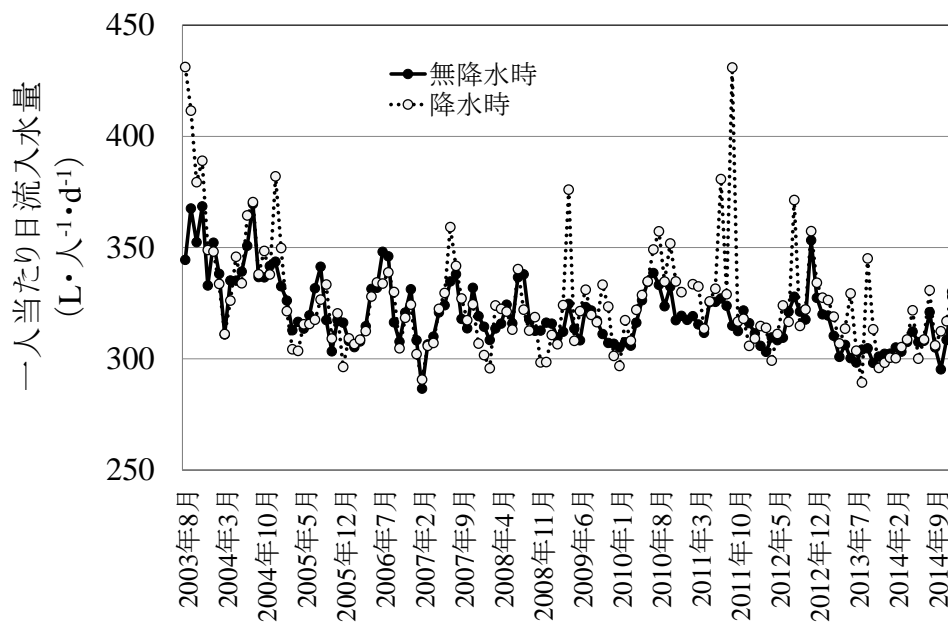
3.3.2 日流入水量の周期性を有する変動特性と変動要因

I施設の日流入水量には、**Fig.3.1(c)**と**Fig.3.1(d)**に示すように周期性を有する季節変動成分と週間変動成分が存在しており、月別日流入水量は夏季に高く、冬季に低くなるような周期変動が認められる(**Fig.3.3**)。そこで、月別日流入水量について、降雨が観測された日(以下、降水日という)と降雨が生じていない日(以下、無降水日という)に区分して月別供用人口で除して一人当たり月別日流入水量を求めたところ、両者とも夏季に高く、冬季に低くなるような年間変動パターンとなっている(**Fig.3.7(a)**)。また、一人当たり月別日流入水量は、**Fig.3.7(b)**に示すように供用開始直後(2003年)からの経過年数に従って夏季と冬季における流量変動幅は小さくなっており、2012年以後については顕著な季節的な周年変化は認められなくなっている。一人当たり月別日水道使用量についても、**Fig.3.7(c)**に示すように経過年数とともに夏季と冬季の流量変動幅が小さくなっており、処理区内の住民生活への季節変化に伴う日水道使用量の変動パターンの変化がI施設の日流入水量の季節変動に影響を与えていることが示唆された。

一方、週間変動成分に関しては、一人当たり日流入水量について、降水日と無降水日に区分して曜日別にその平均水量を求めたところ、**Fig.3.8** に示すように無降水日における一人当たり平均日流入水量は月曜日から金曜日の平日に高く、土・日曜日の週末に低くなるような週間変動パターンとなっており、土曜日に最小値を示している。週間変動パターンとして、休日に流入水量が減少する傾向が抽出されたが、これは処理区内に I 小学校等（流入人口：83 人）が存在することで休日の流入人口に影響することや、休日に住民（定住人口：498 人）が処理区外に出かけてしまうことが反映しているものと推察される。

さらに、状態空間モデルによるお盆や年末・年始に伴う変動成分の抽出は見送ったものの、I 施設の一人当たり日流入水量には、**Fig.3.9** に示すように年末・年始において 12 月 27 日から増加して 31 日に流量がピークに達した後、1 月 5 日まで低下するようなイベント的な変動が認められる。一人当たり日流入水量は、8 月 12 日～18 日の間で 8 月 14 日にピーク値を示すようなイベント的な変動が生じており、8 月のお盆と年末・年始の年 2 回の帰省等の要因による日流入水量負荷増加イベントが起こっていることが確認された。このため、今後、お盆・年末・年始のイベントに伴う流量変動についても、状態空間モデルによって抽出が図れるような手法を検討したいと考えている。

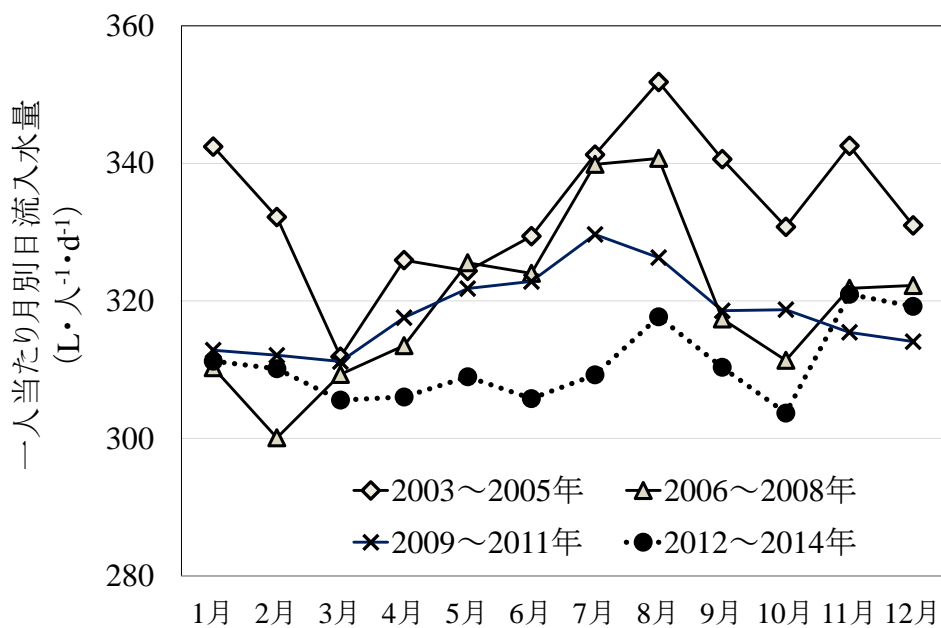
以上を要約すると、I 施設の日流入水量には (iii) 季節的な年周期変動、(iv) 7 日間の周期的な変動、(v) お盆や年末・年始の行事に伴う変動が存在しており、季節的な変動には水道使用量が影響しているとともに、農業集落排水施設流入水の日水量負荷には、処理区内の流入人口やお盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動が関与していることが示唆された。このため、お盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動に関しても、状態空間モデルによる抽出手法の検討が必要である。



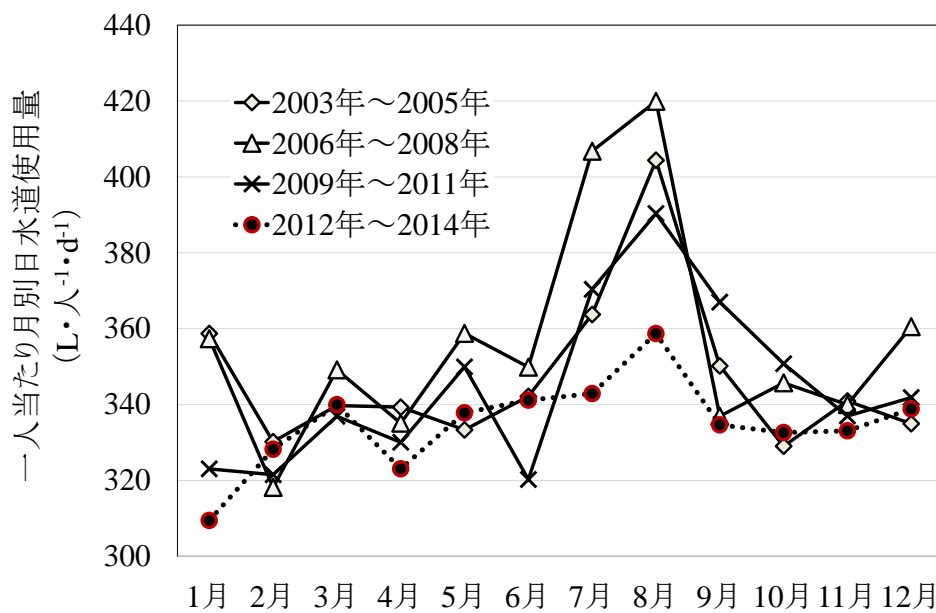
(a) 降水日と無降水日の一人当たり月別日流入水量の経年変化

Fig.3.7(a) I 施設の一人当たり月別日流入水量と一人当たり月別水道使用量の周年変動

Relation between annual variation in mean daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility and mean daily discharge amount of drinking water



(b) 一人当たり月別日流入水量の周年変化



(c) 一人当たり月別日水道使用量の周年変化

Fig.3.7(b)(c) I 施設の一人当たり月別日流入水量と一人当たり月別水道使用量の周年変動

Relation between annual variation in mean daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility and mean daily discharge amount of drinking water

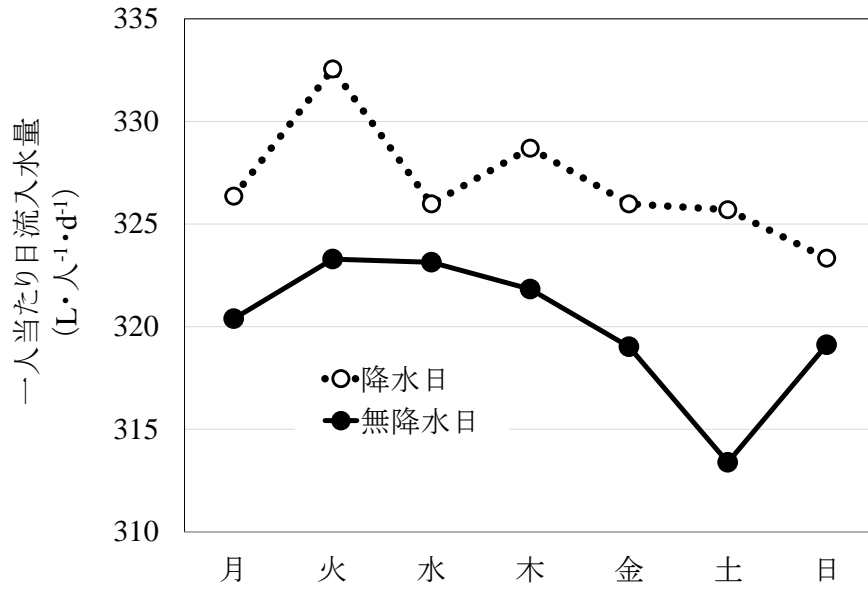


Fig.3.8 I施設における一人当たり日流入水量の週間変動

Weekly variation in daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility

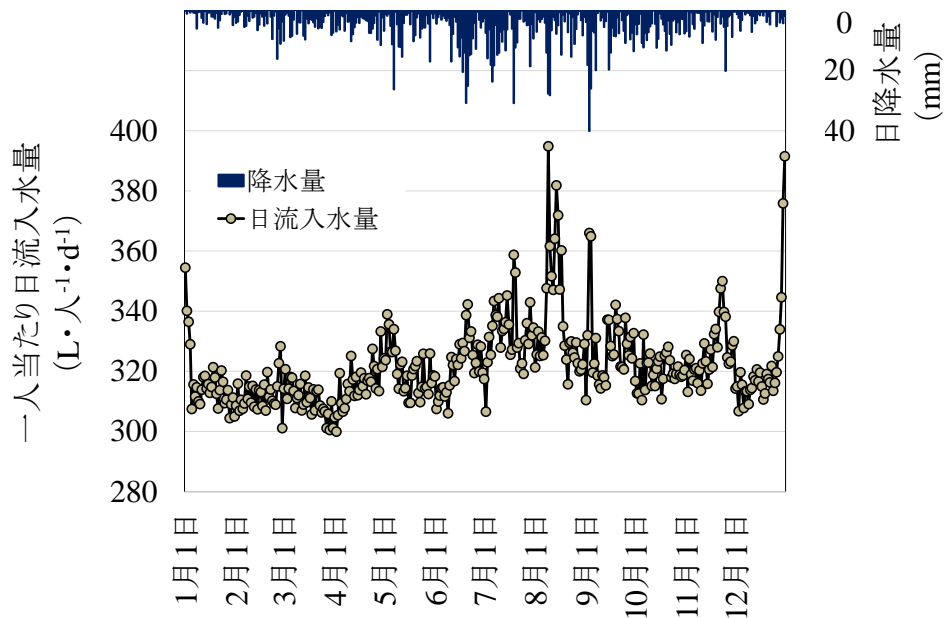


Fig.3.9 I施設の一人当たり日流入水量と日降水量の周年変動

Relation between annual variation in mean daily inflow rate of wastewater on I observed rural sewerage facility and daily amount of precipitation

3.3.3 適用モデルに対する汎用性の検証

日水量負荷データの状態空間モデルに対する汎用性を検証するため、A 施設、K 施設、O 施設、S 施設、及び Y 施設の 5 施設を対象に状態空間モデルを適用し、予測評価の再現性を検討した。具体的な時系列データの表示は例として O 施設の結果を例示した (**Fig.3.10**)。解析結果から、実測データの日流入水量が急激に上昇するタイミングの再現性には、降雨に対する応答特性が単純な線形モデルで表現されていることに起因して、時間遅れなどが表現されていない課題は残るものの、O 施設における実測値と計算値の相関係数として 0.594 (1%有意水準に対応する F 値 (6.71) に対して検定値は 197.6 であり、1%以下の水準で十分に有意) が得られており、冬季に比べ夏季に流量が多くなる傾向など、計算値は概ね実測値を追従できている。降雨イベントによる調査施設の日流入水量の応答として、例えば K 施設に比較して S 施設の日流入水量は降水量に対して大きな流量増加を示すなど供用中の解析対象施設から異なる傾向が抽出されている (**Fig.3.11**)。

また、日流入水量の週間変動に関しては、**Fig.3.12(a)**と **Fig.3.12(b)**に示すように異なる調査施設における流入水量も一定の精度で再現できていることが確認できており、週間変動としては施設ごとに異なる特徴が抽出されている。K 施設と S 施設は週末の土曜日と日曜日に流入水量が減少する傾向がみられる一方で、A 施設、O 施設、及び Y 施設は土曜日と日曜日に流入水量が増加する傾向を示している。K 施設と S 施設には処理区内に小学校が設けられおり、土曜日と日曜日に処理区内に学童が来ないため、休日の流入人口に影響していることが週間変動パターンに反映しているものと推察される。このような特徴は、状態空間モデルでも同様の特徴が抽出されており (**Fig.3.12(a)**)、この結果は、状態空間モデルが複数の異なる施設の特徴を抽出できる汎用性のある手法であることを示している。**Fig.3.12(b)**のグラフは、実際の流量のデータを降水日・無降水日に振り分けた後に、それぞれ平均値を算出する方法で得られているが、状態空間モデルは、降水量の大小による流量変動特性の効果を加味して同時に週間変動を抽出しており、作業自体も簡略化されている。

このように、状態空間モデルの適用を通じて、日流入水量の特徴を評価・把握できるパラメータが様々な変動要因別に抽出された状態で蓄積することが

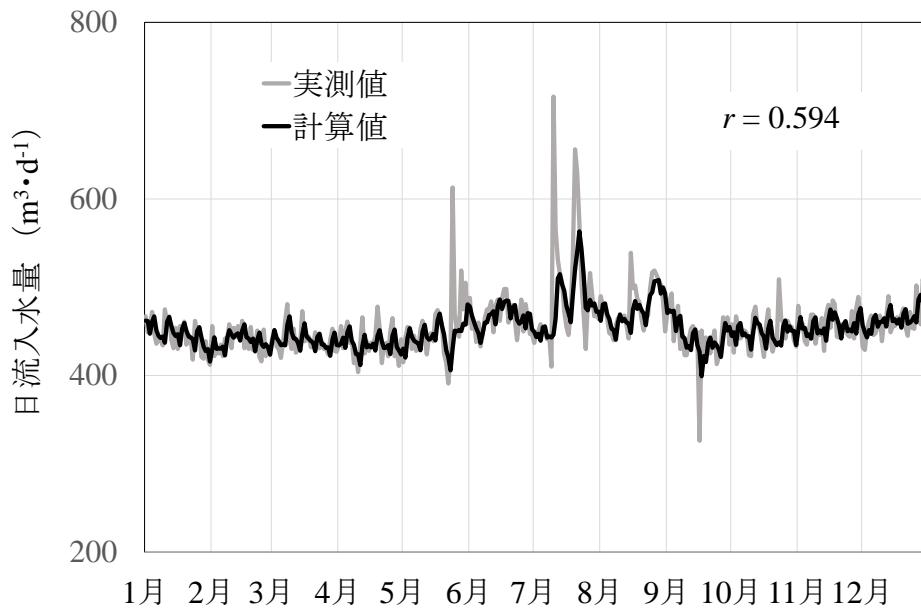


Fig.3.10 O施設における状態空間モデルの計算値の再現

Time sequences on mean daily inflow rate of wastewater obtained by executing state space model analysis on O observed rural sewerage facility

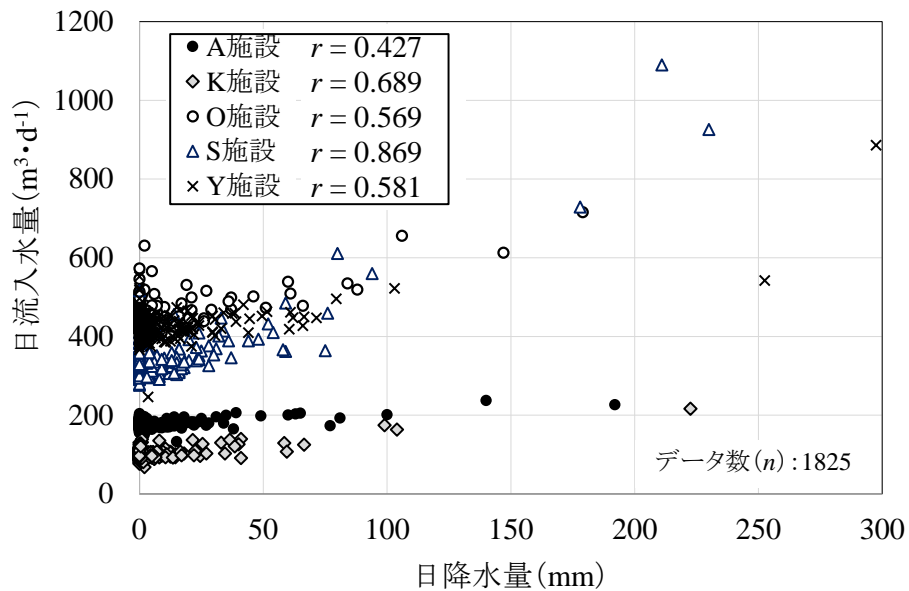
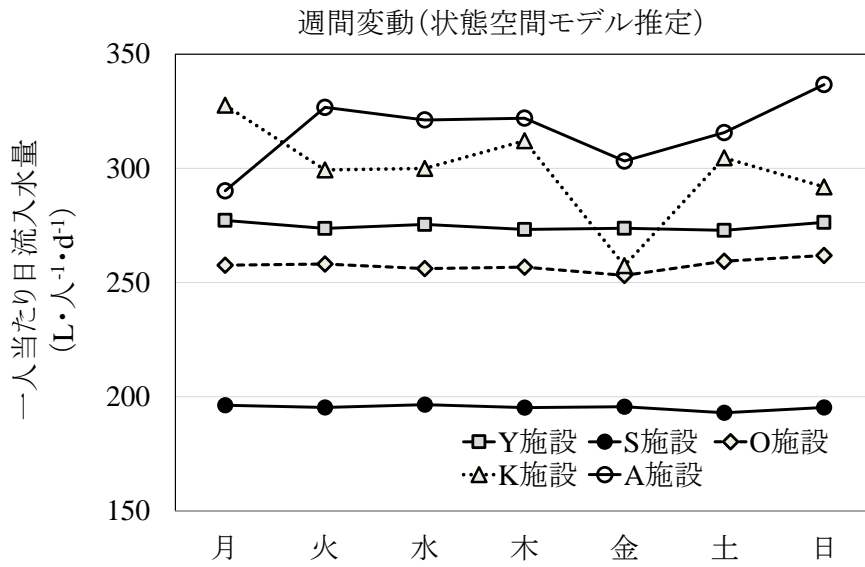
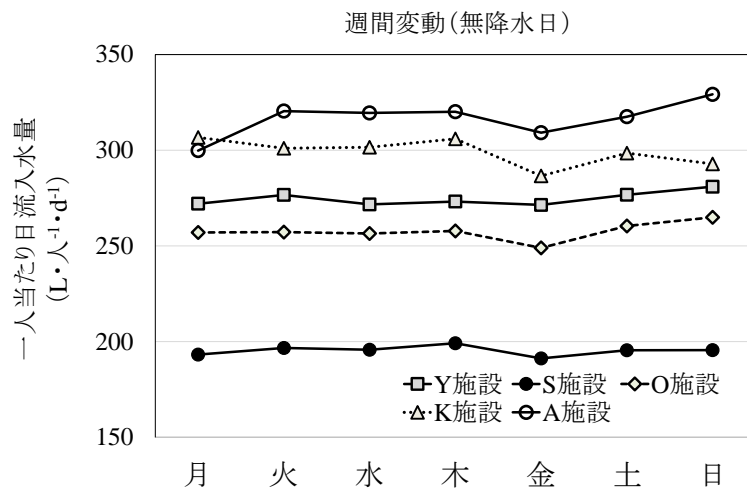


Fig.3.11 降雨イベントによる調査施設の日流入水量の応答特性

Responsiveness of daily inflow rate of wastewater to precipitation on observed rural sewerage facilities



(a) 各曜日における一人当たり月別日流入水量の計算値



(b) 各曜日における一人当たり月別日流入水量の実測値

Fig.3.12(a)(b) 調査施設における週間変動特性

Weekly variation in daily inflow rate of wastewater on observed rural sewerage facilities

できる．状態空間モデルの適用と解析データの蓄積に伴って，解析対象施設ごとに異なるパラメータに対して，供用人口，管路延長，排水面積，地形勾配や土地利用状況，降雨条件等から，全国に存在する稼働中の農業集落排水施設について，日流入水量の変動特性を一般化できることが期待される．

3.4 要約

本研究は，農業集落排水施設から得られた実測データに基づき，農業集落排水施設流入水における既知の日水量負荷変動成分について，状態空間モデルに組み込んだ上で，状態空間モデルの適用を通じて，日水量負荷変動の把握と変動特性の抽出を定量的に試みたものである．得られた検討結果は以下のとおりである．

- (1) 日流入水量の時系列変動は，状態空間モデルによりトレンド成分，季節変動成分，週間変動成分，及び降雨による変動成分の四成分に分離され，農業集落排水施設流入水の日水量負荷には，供用人口に対応して変動する水道使用量や降水量による変動要因が影響していることが示唆され，人口データやその将来の計画データを基に予測が可能であることが示された．
- (2) 日流入水量の季節的な変動には水道使用量が影響しているとともに，農業集落排水施設流入水の日水量負荷には，処理区内の流入人口やお盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動が関与することが示唆された．
- (3) 状態空間モデルの適用により，日流入水量の有する周期的な変動特性や観測データと対応した特性・特徴を抽出できることが確認できた．季節変動成分の解釈や降水に伴う変動成分予測精度に課題が残るものの，前述の(2)で述べた人間活動に伴う規則正しいパターンと自然変動パターンが分離され，降雨に対する予測精度が向上すれば，将来の気候変動などに対応した流入水量の予測結果が得られる．このような定量的な予測結果は，既存施設の維持管理に資する基本的な情報を得ることができる．

本研究で得られた検討結果が，今後，農業集落排水施設の適切な設計諸元の設定や管理手法の確立等に反映されることが期待される．

第 4 章 連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設におけるばっ気槽管理と BOD 除去性能

4.1 概説

農業集落排水施設には、活性汚泥法の一つである連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式が広く採用されており（中野，2001），活性汚泥法においては，Monod の一相説や Garrett と Sawyer の二相説を前提とした浄化理論が生物反応槽の設計・管理に活用されている（Monod，1949；Garrett and Sawyer，1952）．BOD 除去性能には，ばっ気槽におけるばっ気空気量が関与していると報告はなされているものの（中野，2006），ばっ気槽の散気方式やばっ気強度とばっ気時間による影響について，実際に稼動する施設のデータ等による調査研究事例がほとんどない．

その一方で，設計指針や維持管理マニュアルで設計管理諸元が定められているものの（日本農業集落排水協会，1997；地域環境資源センター，2016），ばっ気強度に関しては，ばっ気槽内の DO や ORP の値は示されているが，「十分な空気供給と攪拌能力を有する」等の定性的な規定となっており，個別の処理施設で具体的にばっ気条件をどのように設定すべきかは明らかでない．このため，処理性能が法令で規制されていること等から，現場の管理技術者の判断で処理水質の確保を重視し過ぎるあまり，過ばっ気な設定でのばっ気槽の運転操作がなされ，主要な維持管理費の電気使用料金の負担に悩まされている供用施設が存在している（李ら，2015）．ばっ気槽の過ばっ気を回避しつつ，経済的に所要の処理性能を確保できるようなばっ気槽の運転管理手法が重要となっている（中野ら，2017）．

そこで，本研究では，効率的な処理性能を確保するためのばっ気条件の設定方法を明らかにすることを目的として，連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式施設のばっ気槽管理と BOD 除去性能について考察した．

4.2 研究方法

4.2.1 調査施設と調査期間

調査は、日本農業集落排水協会 X IV 型システム（連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式）を採用している 4 施設（和歌山県上富田町の A1 施設と A2 施設，沖縄県宜野座村の A3 施設と金武町の A4 施設）で実施した．著者らが調査した A1～A4 施設に加え，**Table 4.1** に示す日本農業集落排水協会（現・地域環境資源センター）によって調査された B1～B3 施設を含めた 7 施設の調査観測データを検討に用いた（日本農業集落排水協会，1998a；日本農業集落排水協会，1998b）．

調査施設の処理フローは，**Fig. 4.1** に示すとおりであり，ばっ気工程と攪拌工程を 1 サイクルとしてばっ気槽の運転操作が行われている（日本農業集落排水協会，1997）．ばっ気槽の標準的な室数は，日本農業集落排水協会 X IV₉₆ 型設計指針（以下，設計指針という）において処理人口 101～700 人でばっ気槽が 1 室（1 室構造），また，処理人口 501～3,000 人ではばっ気槽が 2 室（2 室構造）と規定されており，調査施設のばっ気槽室数は設計指針の考え方に従って設けられている．なお，A3 施設は，日本農業集落排水協会 III 型システム（嫌気ろ床接触ばっ気方式）の改築施設であり，嫌気ろ床槽 1 室と接触ばっ気槽 2 室をばっ気槽として活用したため，ばっ気槽が 3 室（3 室構造）となっている（日本農業集落排水協会，1997）．調査施設の設計管理諸元は，**Table 4.2** に示す数値が設計指針と農業集落排水処理施設維持管理マニュアル JARUS-X IV 型編（以下，維持管理マニュアルという）に規定されている．また，調査期間と調査観測実施日（調査頻度）は，**Table 4.3** に示すとおりである．

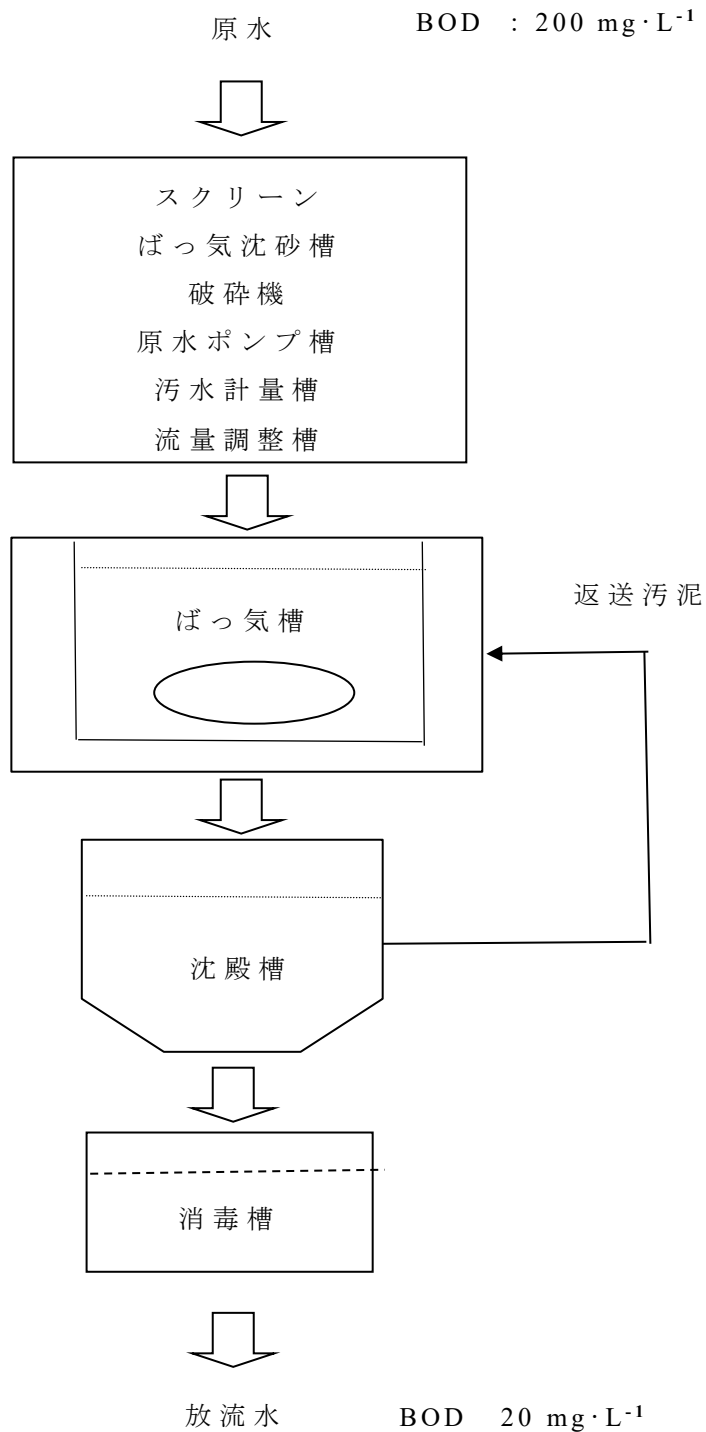


Fig. 4.1 調査施設（日本農業集落排水協会XIV型システム）における処理フロー
Flow diagram of observed rural sewerage facilities (XIV type)

Table 4.1 調査施設

Observed rural sewerage facilities

施設名	設置場所	供用人口（人）*	ばっ気槽室数
A1	和歌山県上富田町	581	1
A2	和歌山県上富田町	671	2
A3	沖縄県宜野座村	1,691	3
A4	沖縄県金武町	565	1
B1	富山県魚津市	276	1
B2	滋賀県長浜市	145	1
B3	滋賀県高島市	431	2

注) *記載数値は，調査時点における供用人口

Table 4.2 調査施設の設計管理諸元

Standard management criteria in observed rural sewerage facilities

項目	設計管理諸元
流量調整槽流出水BOD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	200
沈殿槽流出水BOD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	20以下
BOD除去率 (%)	90以上
水理学的滞留時間 (h)	27
ばっ気・攪拌サイクル数 (d^{-1})	24
ばっ気時間 (min)	30
攪拌時間 (min)	30
ばっ気工程終了時DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.0～2.0
攪拌工程開始後DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	速やかに0.0
ばっ気工程終了時ORP (mV)	50～150
攪拌工程終了時ORP (mV)	180～-100
ばっ気槽内水MLSS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2,000～4,000

Table 4.3 調査期間

Observation period on rural sewerage facilities

施設名	調査期間	調査観測実施日または頻度
A1	'15.9.25～'17.3.8	'15.9.25, 10.9, '17.2.27, 3.1, 3.8
A2	'15.9.22～'17.7.5	'15.9.22, 9.28, 10.6, '16.3.22, '17.2.28, 3.3, 6.30, 7.5
A3	'15.11.2 ～'17.1.30	'15.11.2, 11.9, 11.23, '16.1.6, 1.13, '16.1.20, 5.2, 6.14, 6.29, 7.12, 7.20, '16.8.9, 9.7, 9.29, 11.28, '17.1.30
A4	'16.6.8 ～'17.10.23	'16.6.8, 6.15, 6.21, 7.12, 7.20, 8.3, '16.9.5, 9.7, 10.23, '17.3.31
B1	'95.4.18 ～'96.3.27	年間12回（月毎）の頻度
B2	'92.5.21～'93.4.16	年間12回（月毎）の頻度
B3	'93.6.15～'94.5.24	年間9回（1993年8月，1994年1月，及び2月以 外の月毎）の頻度

4.2.2 調査内容

調査では、流量調整槽流出水と沈殿槽流出水を採水して JIS K 0102 工場排水試験法（日本規格協会，2013）に基づき，BOD，ATU-BOD，T-N，NH₄-N，NO₂-N，及び NO₃-N の水質項目を測定した（**Table 4.4**）．N-BOD については，測定された BOD 濃度から ATU-BOD 濃度の測定値を差し引いて求めた．A1～A4 施設においては，現地観測開始時と終了時に採水したスポットサンプリング試料から得られた水質分析結果を平均することにより，1日1データとして整理した．一方，B1～B3 施設のサンプリングに関しては，1日を3または4区分し，30分毎に採水した試料を流量比で混合し，その時間区間のコンポジット試

料とする方法に従うとともに、コンポジット試料から得られた水質調査結果を平均することにより、1日1データとして整理した。

ばっ気槽内の水温、MLSS、DO、及びORPは、DO計（YSI ProODO 蛍光式携帯型溶存酸素計）とORP計（YSI Pro1020 蛍光式携帯型酸化還元電位計）を用いて観測した。汚水計量槽で流入水量を測定し、ばっ気槽のばっ気強度とばっ気時間に関しても観測した。A1～A4施設では、ばっ気槽内の1サイクル運転工程中のDOとORPを1分毎に観測した。また、ばっ気槽の活性汚泥性状を把握するため、A4施設の活性汚泥をサンプリングして粘度計（音叉型振動式粘度計 SV-A）を用いて粘度を測定した。A4施設の月別電力使用量と月別電気料金に関しては、金武町上下水道課からの提供データを用いた。

4.2.3 検討手法

BOD除去速度恒数の算定には、ばっ気槽が1室構造の調査施設を対象とするとともに、ばっ気槽のORPとDOの挙動に関しては、調査施設の観測データを1室、2室、及び3室に区分して、ばっ気槽の室毎に整理・検討した。また、ばっ気槽混合液の総括酸素移動容量係数（ KLa ）の算出には、A1～A4施設のばっ気槽各室におけるORPとDOの観測データを用いた。さらに、A4施設の維持管理データと電力使用量データ等を用いて、ばっ気空気量を低くできる運転管理条件を比較検証した。実測データの重回帰分析等の統計処理には、統計解析アドインソフトエクセル統計2015を使用した。

Table 4.4 調査内容
Contents of investigation

調査位置	調査項目
流量調整槽流出部， 沈殿槽流出部	BOD, ATU-BOD, (N-BOD*) , T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N , NO ₃ -N
汚水計量槽	流入水量
ばっ気槽	水温, MLSS, DO, ORP, 粘度 ばっ気強度, ばっ気時間

注) *括弧内の N-BOD は, BOD と N-BOD の測定値から算定

4.3 結果と考察

4.3.1 BOD 除去性能とばっ気槽の ORP 管理

流量調整槽流出水と沈殿槽流出水の BOD は, **Table 4.5** に示すようにそれぞれ 33.6~390.0 mg·L⁻¹ (平均値: 148.4 mg·L⁻¹), 0.6~55.9 mg·L⁻¹ (平均値: 5.8 mg·L⁻¹) の範囲に分布しており, BOD 除去率は 60.4~99.3% (平均値: 99.5%) を示している. 1室構造のばっ気槽においては動力学モデルによる BOD 収支から槽内が完全混合流であり, BOD 除去が 1次反応に従う場合には, 次式が成り立つ (下水・廃水・汚泥処理ガイドブック編集委員会, 1982) .

$$Q \cdot (Bi - Be) / Va = Kb \cdot Ca \cdot Be \quad (4.4)$$

$$Ca \cdot ta \cdot Bi / (Bi - Be) = Ca \cdot ta + 1 / Kb \quad (4.2)$$

ここで, Bi : 流量調整槽流出水の BOD (mg·L⁻¹), Be : 沈殿槽流出水の BOD (mg·L⁻¹), Q : 流入水量 (m³·h⁻¹), Va : ばっ気槽の有効容量 (m³), Ca : MLSS (mg·L⁻¹), Kb : BOD 除去速度恒数 (L·mg⁻¹·h⁻¹), ta : ばっ気槽の水理学的滞留時間 (h) .

そこで, 1室構造の施設である A1, A4, B1, 及び B2 施設を対象に (4.1) 式を変形して導かれる (4.2) 式を用いて, $Ca \cdot ta \cdot Bi / (Bi - Be)$ と $Ca \cdot ta$ の

関係を検討した (Fig. 4.2) . 両者の間には高い正の相関 (決定係数 : 0.996) が存在しており, Fig. 4.2 に示す直線回帰式が得られた. この直線回帰式の切片値 (1,531.2) より, BOD 除去速度恒数として $6.5 \times 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の値が算定された. 一方, 各観測データから (4.1) 式より求めた BOD 除去速度恒数は $1.4 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の広い範囲に分布しており, BOD 除去性能にはばっ気槽の MLSS や水理学的滞留時間以外の要因が関与しているものと考えられる.

流量調整槽流出水 BOD に占める ATU-BOD と N-BOD の比率はそれぞれ 68.7%, 31.3% である一方で, 沈殿槽流出水 BOD では ATU-BOD と N-BOD はそれぞれ 57.4%, 42.6% となっており, 4 割程度が N-BOD で占められている (Fig. 4.3) . 沈殿槽流出水の ATU-BOD と N-BOD の平均値は, それぞれ $3.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ である. 沈殿槽流出水 ATU-BOD と N-BOD は, それぞれ $0.5 \sim 18.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (標準偏差 : $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) , $0.0 \sim 44.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (標準偏差 : $5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) と N-BOD は ATU-BOD に比べて 2 倍以上広い範囲に分布している. 沈殿槽流出水 N-BOD は ATU-BOD に比べて平均値はやや小さいものの, バラツキが大きくなっており, N-BOD は処理水中の BOD 濃度に大きな影響を与えている. 流量調整槽流出水の全窒素に占める有機態窒素, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ の比率は, それぞれ 54.6%, 43.7%, 1.7% となっており, 流量調整槽流出水はケルダール窒素 (有機態窒素と $\text{NH}_4\text{-N}$ の総和) によって占められ, 硝酸態窒素をほとんど含んでいない (Fig. 4.4) .

沈殿槽流出水の全窒素に占める有機態窒素, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ の比率は, それぞれ 26.1%, 46.7%, 27.2% を示しており, 有機態窒素の無機化や処理過程で生成された窒素化合物の硝化反応に伴って生じる N-BOD によって, 処理水中の BOD 値を高めているものと考えられる. ばっ気槽の運転操作 (攪拌・ばっ気工程) を踏まえ, ばっ気終了時の ORP を 50mV 毎に区分して, 沈殿槽流出水に含まれるケルダール窒素と N-BOD を求めた (Fig. 4.5) . ばっ気槽 1 室から 3 室のいずれも, ばっ気終了時 ORP の低下に伴って, 沈殿槽流出水のケルダール窒素は増加している. 沈殿槽流出水中の N-BOD は, ばっ気槽 1 室から 3 室のいずれも, ばっ気終了時の ORP の上昇に対応して低下している. ばっ気終了時に還元状態にある場合には硝化作用が十分に進まず, 沈殿槽流出水にケルダ

ール窒素が残存した結果、処理水中に N-BOD が生成されたものと考えられる。処理水中の N-BOD について、沈殿槽流出水の平均濃度である $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下の濃度水準とするためには、ばっ気槽 1 室では、ばっ気終了時の ORP を 100mV 以上に維持するとともに、ばっ気槽 2 室と 3 室ではばっ気終了時の ORP を 50mV 以上にすることが必要である。

攪拌終了時の ORP を 50mV 毎に区分して、沈殿槽流出水の $\text{NO}_x\text{-N}$ と ATU-BOD の関係を検討したところ、ばっ気槽 1 室から 3 室のいずれも、沈殿槽流出水の $\text{NO}_x\text{-N}$ は攪拌終了時の ORP の上昇に対応して増加しており、還元領域から酸化領域に移行すると $\text{NO}_x\text{-N}$ の値を $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度から $5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度まで高めている。沈殿槽流出水中の ATU-BOD は、ばっ気槽 1 室から 3 室のいずれも、攪拌終了時の ORP の上昇に対応して低下しており、ばっ気槽 1 室と 2 室では ORP が -50mV 以上の領域では ATU-BOD は $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下に低下している。ばっ気工程で酸化状態であると ATU-BOD の低下が図られ、攪拌工程が還元状態である場合には $\text{NO}_x\text{-N}$ の除去が図られることを考慮すれば、沈殿槽流出水の ATU-BOD を平均濃度である $3.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下の濃度水準とするためには、ばっ気槽における攪拌終了時の ORP 値を -50mV に維持することが必要であるといえる。

ばっ気終了時と攪拌終了時の ORP の間にバラツキは認められるものの、正の相関（ばっ気 1 室の相関係数：0.62，ばっ気 2 室の相関係数：0.65，ばっ気 3 室の相関係数：0.91）が存在（t 検定の有意水準 5% で有意）している（Fig. 4.6）。ばっ気槽 1 室では、ばっ気終了時の ORP が 100mV を示すのは攪拌終了時の ORP が -100mV 以上の領域である一方、攪拌終了時の ORP が -50mV 以下となる条件はばっ気終了時に ORP が 125mV を上回らない領域下であることが確認された。このため、ばっ気終了時の ORP は、 $100\sim 125\text{mV}$ に維持することが望ましい。また、ばっ気槽 2 室では、ばっ気終了時の ORP が 50mV となる条件は攪拌終了時の ORP が -100mV 以上の領域であり、攪拌終了時の ORP が -50mV 以下となる条件はばっ気終了時に ORP が 85mV を上回ることがない領域であるため、ばっ気終了時の ORP は $50\sim 85\text{mV}$ に維持することが必要であると考えられる。

Table 4.5 調査施設の BOD 除去状況

BOD removal conditions in observed rural sewerage facilities

項目	運転管理状況*
流量調整槽流出水BOD (mg・L ⁻¹)	148.4 (33.6～390.0)
沈殿槽流出水BOD (mg・L ⁻¹)	5.8 (0.6～55.9)
BOD除去率 (%)	95.5 (60.4～99.3)

注) *の運転管理状況欄の数値は、平均値。また、括弧内の数値は、最大値と最小値を示しており、範囲を表示

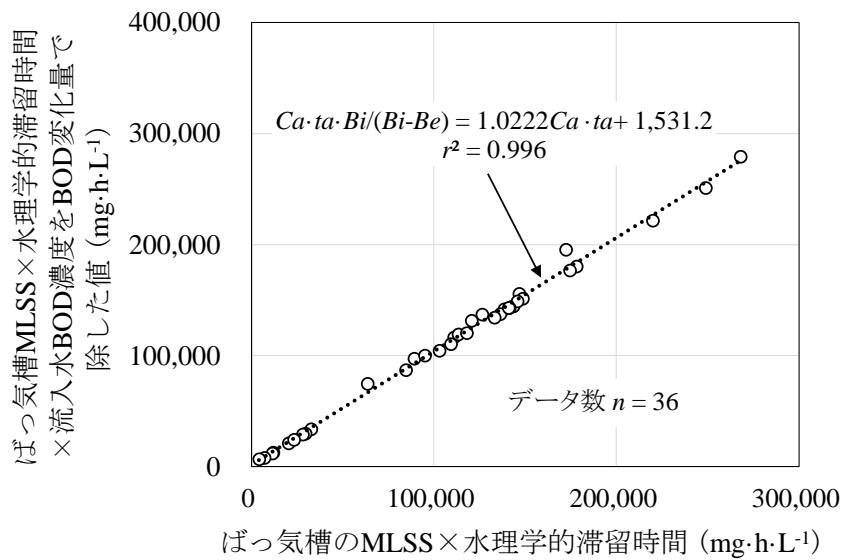


Fig. 4.2 BOD 除去速度恒数の算定

Calculation of BOD removal reaction rate

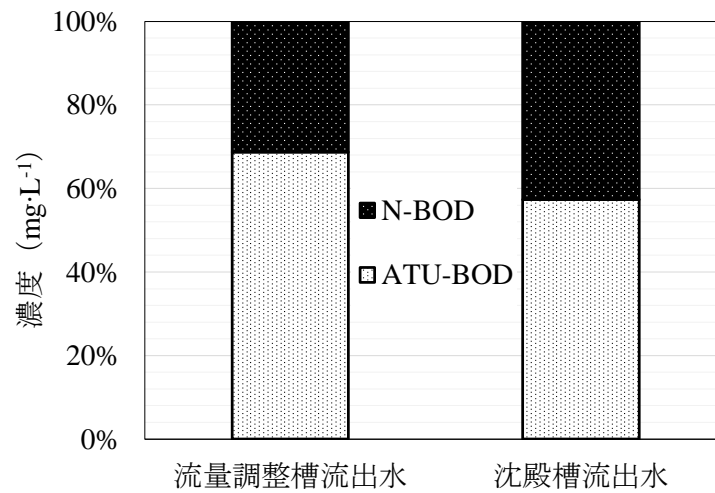


Fig. 4.3 流量調整槽流出水と沈殿槽流出水における BOD の内訳
 BOD profile in influent of aeration tank and effluent of sedimentation

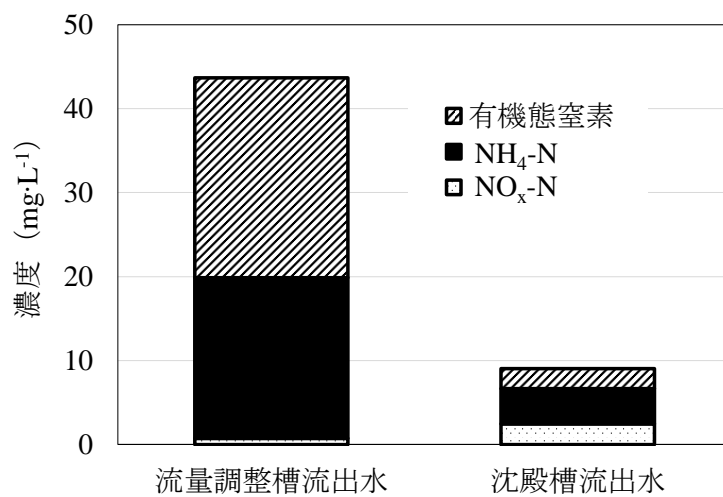
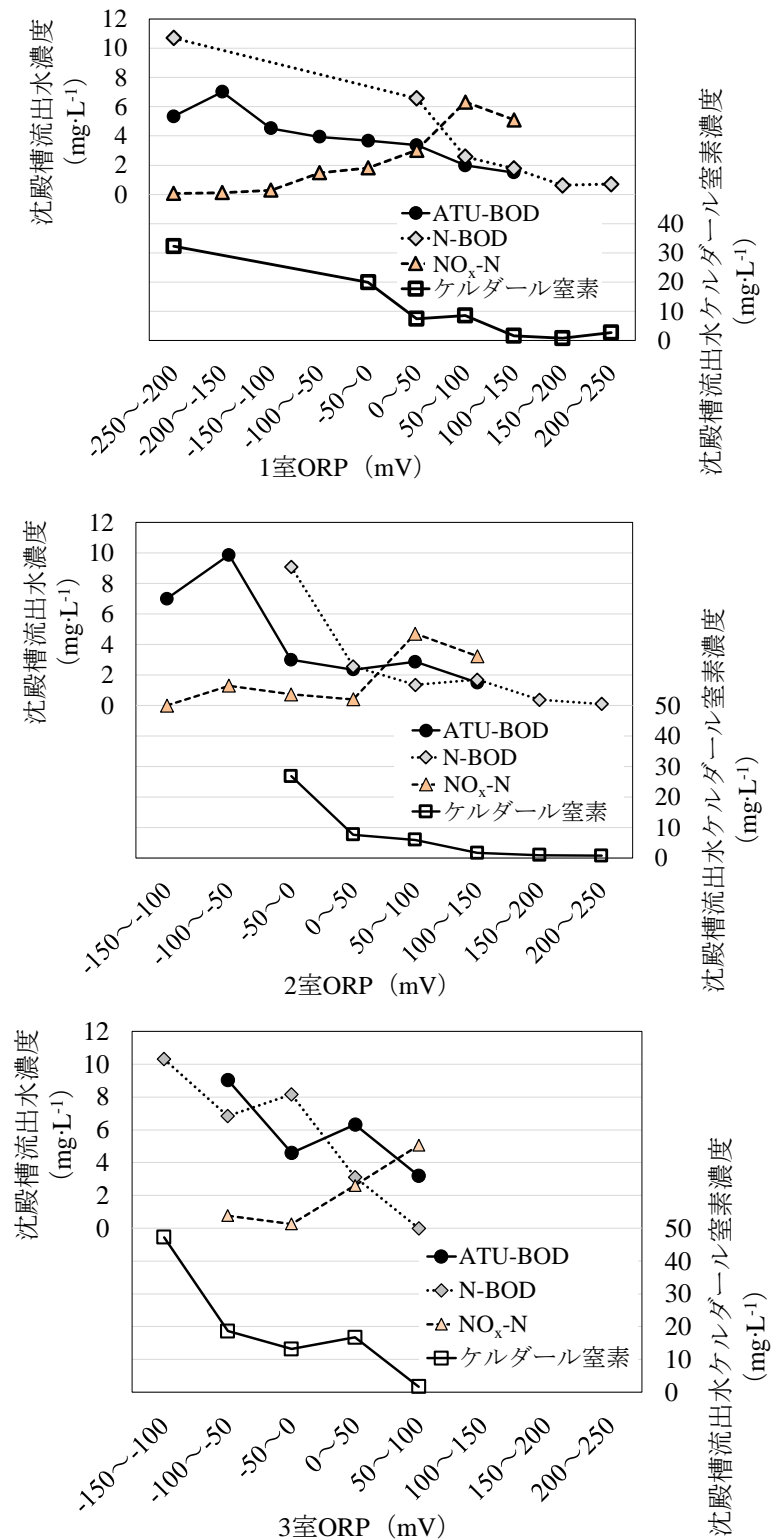


Fig. 4.4 流量調整槽流出水と沈殿槽流出水における T-N の内訳
 T-N profile in influent of aeration tank and effluent of sedimentation tank

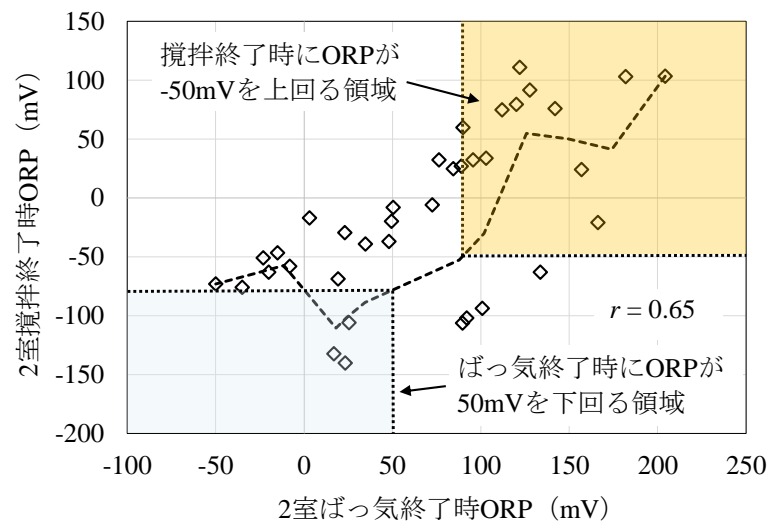
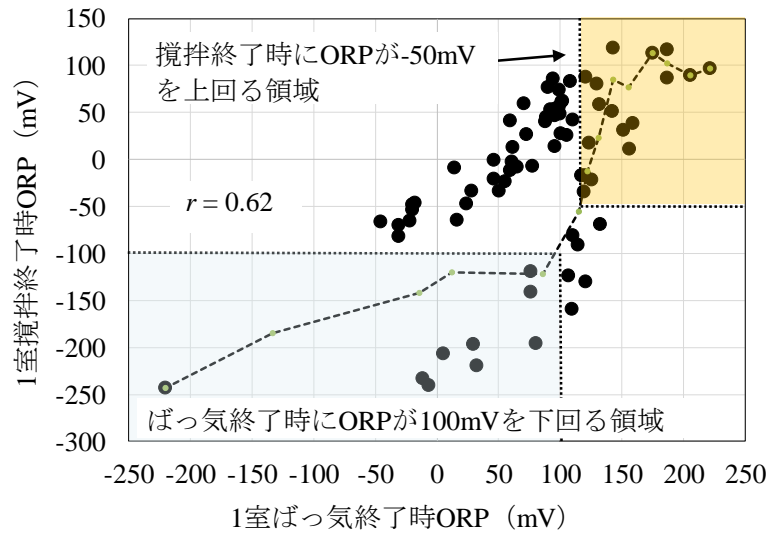


注 1：ケルダール窒素と N-BOD においてはばっ気終了時 ORP

注 2：NO_x-N と ATU-BOD においては攪拌終了時 ORP

Fig. 4.5 ばっ気槽 ORP と沈殿槽流出水水質の関係

Relationship between ORP in aeration tank and effluent water quality in sedimentation tank



注：図中の破線は，ばっ気終了時と攪拌終了時のORPについて，20 mV 毎に平均した値を繋いだもの

Fig. 4.6 ばっ気終了時ORPと攪拌終了時ORPの関係

Relationship between ORP at the end of aeration and ORP at the end of stirring in aeration tank

4.3.2 ばっ気槽の設計・運転操作と DO 挙動特性

好気性生物処理法による汚水処理では、酸素の供給状況が処理の良否を決定する重要な要因であり（北尾，2003），BOD 除去性能には，3.1 でばっ気槽の ORP 管理の重要性が確認されたことを踏まえ，ばっ気槽の ORP と DO の関係について検討した．ORP は，一般に Nernst 電極電位による（4.3）式で表され（合田，1975），武藤らは室内試験結果から ORP と DO の関係式として，（4.4）式を導いている（武藤・金，1986）．（4.4）式を用いて，ばっ気槽の ORP と DO の関係式である（4.5）式が求められ，この式を変形することで（4.6）式が導かれる（Fig. 4.7）．

$$Eh = E_0 + (RTk/nF) \cdot \ln(Oxd/Red) + (RTk/F) \cdot \ln(H^+) \quad (4.3)$$

$$Eh = A + B \cdot \ln(Ox) \quad (4.4)$$

$$Eha = 73.2 + 40.6 \ln(Oxa) \quad (4.5)$$

$$Oxa = e^{(Eha - 73.2)/40.6} \quad (4.6)$$

ここで， Eh ：ORP (mV)， E_0 ：系における標準 ORP (mV)， R ：気体定数 ($\text{mV} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)， Tk ：絶対温度 (K)， n ：反応電子数， F ：Faraday 定数 (mol^{-1})， Oxd ：水中物質の酸化型活量， Red ：水中物質の還元型活量， H ：水素イオン濃度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)， A ：実験定数 (mV)， B ：実験係数 (mV)， Ox ：DO 濃度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)， Eha ：ばっ気終了時 ORP (mV)， Oxa ：ばっ気終了時 DO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)．（4.6）式を用いて，BOD 除去性能を確保するために必要なばっ気終了時の DO 値を算定したところ，ばっ気槽 1 室においては 100 ～ 125 mV の ORP に対応する DO として 1.9 ～ 3.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，2 室では 50 ～ 85 mV の ORP に対応して 0.6 ～ 1.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ が得られる（Table 6）．

調査施設のばっ気装置には，4 タイプ（水中機械式，全面ばっ気式，片側旋回流式，及び微細気噴射式）の散気方式が採用されており（笠倉，1992；藤田，1982；山崎，1982），調査施設でエアレーション方法が異なっている（Table 7）．ばっ気槽の単位体積当たりの 1 サイクルばっ気空気量（以下，1 サイクルばっ気空気量という）とばっ気終了時 DO の間には正の相関（相関係数：0.66）は存在（t 検定の有意水準 5% で有意）するものの，1 サイクルばっ気空気量に対するばっ気終了時 DO の挙動は調査施設によって差異が生じており，調査施設でのエアレーション方法の違いがばっ気終了時 DO 値の応答に影響している

ものと推察される (Fig. 4.8) . また, ばっ気終了時 DO は, Fig. 4.9 に示すようにばっ気強度の増加に対応して高くなる一方, ばっ気強度が $0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下の条件ではばっ気時間が増えてもばっ気終了時 DO は上昇しない. ばっ気終了時 DO 値は, DO 濃度の上昇を左右するばっ気強度とばっ気時間によって定まるものの, DO 濃度の応答にはばっ気強度の閾値 ($0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$) が存在しており, この値より小さいばっ気強度ではばっ気時間に応じた DO 濃度の上昇は生じないことが分かった.

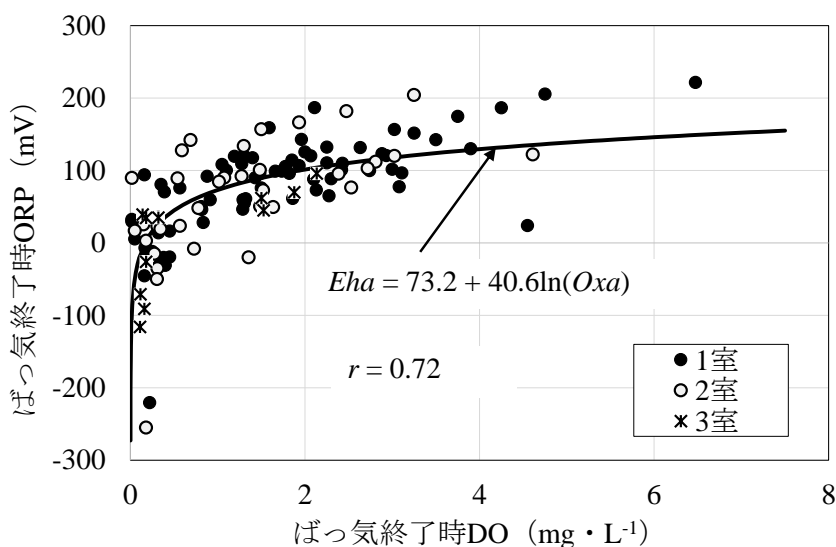


Fig. 4.7 ばっ気槽のばっ気終了時の ORP と DO の関係

Relationship between ORP and DO at the end of aeration in aeration tank

Table 4.6 ばっ気槽のばっ気終了時の ORP と DO の管理範囲

Operation range of ORP and DO of at the end of aeration in aeration tank

ばっ気槽	ORP (mV)	DO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1 室	100 ~ 125	1.9 ~ 3.6
2 室	50 ~ 85	0.6 ~ 1.4
3 室	0 ~ 50	0.2 ~ 0.6

Table 4.7 調査施設のばっ気装置と DO・空気量の相関

Diffused aeration device of each research facility with their correlation between the ultimate DO of aeration and aeration quantity

調査施設	ばっ気装置方式	DO と空気量の相関
A1	水中機械式散気方式	0.62
A2	水中機械式散気方式	0.72
A3	全面ばっ気式散気方式	0.96
A4	片側旋回流式散気方式	0.87
B1	片側旋回流式散気方式	0.88
B2	微細気噴射式散気方式	0.92
B3	片側旋回流式散気方式	0.89

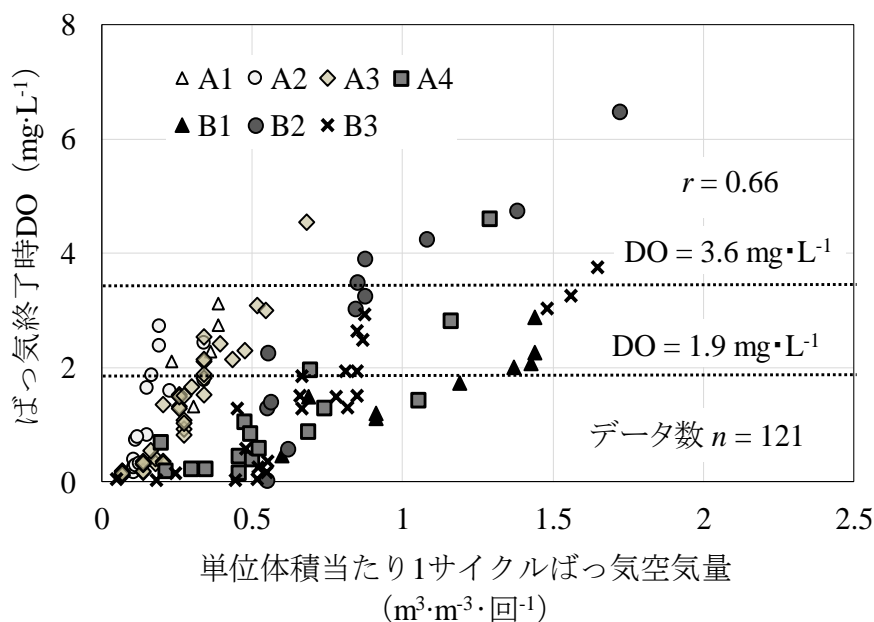


Fig. 4.8 単位体積当たり 1 サイクルばっ気空気量とばっ気終了時 DO の関係
Relationship between DO at aeration termination and aeration quantity per unit volume of a cycle in aeration tank

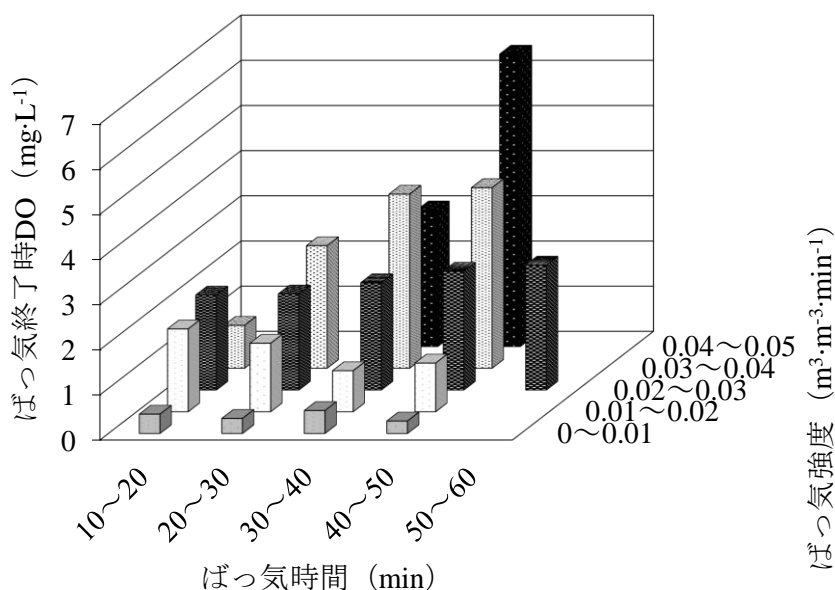


Fig. 4.9 ばっ気強度とばっ気時間に対するばっ気終了時 DO の関係

Relationship between DO at aeration termination and aeration time under various aeration intensity in aeration tank

4.3.3 ばっ気槽の総括酸素移動容量係数 K_{La} と DO 管理

3.2 におけるばっ気槽の設計・運転操作と DO 挙動特性を踏まえ、A1～A4 施設の K_{La} を算定した。活性汚泥が存在するばっ気槽内混合液中の DO 濃度の時間変化は (4.7) 式で表される (Eckenfelder and O'Connor, 1961)。 (4.7) 式は、ばっ気槽内がばっ気・攪拌によって完全混合状態で均一濃度であることを仮定している (平山ら, 1978)。 柚山らは、酸素利用速度を内生呼吸速度で近似して K_{La} を求める算定式として、(4.8) 式を提案している (柚山ら, 1993)。そこで、(4.9) 式から与えられる飽和 DO 濃度 (C_s) と (4.10) 式から与えられる内生呼吸速度 (α_0) を (4.8) 式に代入したうえで、ばっ気工程開始時と終了時の DO 濃度実測値から K_{La} を求めた。

$$dCL/dt = KL(C_s - CL) - Rr \quad (4.7)$$

$$KL = ((CL_2 - CL_1)/\Delta t_1 + \alpha_0)/(C_s - (CL_1 + CL_2)/2) \quad (4.8)$$

$$C_s = 14.16 - 0.3943T + 0.007714T^2 - 0.0000646T^3 \quad (4.9)$$

$$\alpha_0 = CL_2 / \Delta t_2 \quad (4.10)$$

ここで、 CL : 混合液中の DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 C_s : 混合液中の飽和 DO 濃度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 KL : K_{La} (h^{-1})、 Rr : 酸素利用速度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)、 t : 時間 (h)、 T : 水

温 (°C) , α_0 : 内生呼吸速度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) , CL_1 : ばっ気工程開始時の DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) , CL_2 : ばっ気工程終了時の DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) , Δt_1 : 1 サイクルばっ気時間 (h) , Δt_2 : ばっ気工程終了時から DO 値が 0 になるまでに要する時間 (h) .

KLa は, ばっ気強度の増加に対応して高い値を示しており, 両者の間には次の直線回帰式が得られた (**Fig. 4.10**) . ばっ気強度に対する KLa の増加割合は, A1 施設から A4 施設と順次小さくなっており, ばっ気強度と KLa の挙動には調査施設によって相違が認められる.

A1 施設 (相関係数 : 0.90)

$$KL_{A1} = 181.3A_i \quad (4.11)$$

A2 施設 (相関係数 : 0.93)

$$KL_{A2} = 172.3A_i \quad (4.12)$$

A3 施設 (相関係数 : 0.97)

$$KL_{A3} = 163.9A_i \quad (4.13)$$

A4 施設 (相関係数 : 0.97)

$$KL_{A4} = 101.1A_i \quad (4.14)$$

ここで, KL_{A1} : A1 施設の KLa (h^{-1}) , KL_{A2} : A2 施設の KLa (h^{-1}) , KL_{A3} : A3 施設の KLa (h^{-1}) , KL_{A4} : A4 施設の KLa (h^{-1}) , A_i : ばっ気強度 ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$) .

A1 施設と A2 施設の散気方式は水中機械式散気方式であり, 送風機からの空気とインペラでばっ気槽内の旋回流を生じさせるとともに, 全面ばっ気方式の A3 施設では空気泡を噴射することで旋回流を起こして, 溶解酸素がばっ気槽内を移動・連行することから, KLa はばっ気強度に比例して高くなるものと考えられる. (井出, 1990) . 一方, 片側旋回流式の A4 施設は, ばっ気槽の片側にディフューザーを配置しており, ディフューザー上部に生じる上昇流によって多くの泡が大気中に早期に放出される. 全面ばっ気方式はばっ気槽底面全体にディフューザーを分散配置するため, 片側旋回流方式に比較してばっ気槽内の泡の大気中への放出は緩やかであり, 気泡の滞留時間が長くなることから, 同じばっ気強度に対して高い KLa 値が得られたものと考えられる (鍋島, 1991) . このように片側旋回流式散気方式と水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方

式の槽内旋回流の発生形態と気泡の滞留時間の違いから、両者のばっ気強度と KLa に係る動態は異なった挙動が現れたものと考えられる。気泡直径や表面積への粘性による影響を踏まえ（丸野ら，2012），A4 施設のばっ気槽活性汚泥を対象に，15～40℃の水温条件に対応する粘度を測定した。液体の粘度と温度に関しては，複数の指数関数式（Cornelissen and Waterman, 1955）が提案されており，(4.15) 式が導かれる（Fig. 4.11）。(4.15) 式の粘度係数と定数は，Table 4.8 に示すとおりである。粘度係数も MLSS に対応して非線形的な挙動を示しており，(4.16) 式の指数関数式が求められる（Fig. 4.12）。(4.16) 式を (4.15) 式に代入することで，水温と MLSS を説明変数とする粘度の推定式である (17) 式が得られる。

$$\mu = \mu' e^{nT} \quad (4.15)$$

$$\mu' = 0.86 e^{0.29Ca} \quad (4.16)$$

$$\mu = 0.86 e^{0.29Ca} \cdot e^{-0.03T} \quad (4.17)$$

ここで， μ ：粘度（mPa・s）， μ' ：粘度係数（mPa・s）， n ：定数（℃⁻¹）， Ca ：MLSS（g・L⁻¹）， T ：水温（℃）。

(4.16) 式から求められる粘度の計算値は実測値によく一致（自由度調整済重相関係数：0.97）しており，ばっ気槽混合液の粘度はばっ気槽混合液の水温と MLSS から一定の精度で推定できることが確認された。

ばっ気槽混合液の粘度への水温と MLSS の関与を踏まえ，ばっ気強度に水温と MLSS を加味して，加法式による KLa の定式化を試みた。既往研究（O'Connor, 1960；Eckenfelder and McCabe, 1960）から KLa に対する水温の影響に関して，水温 20℃を基準とする (4.18) 式が実務的に活用されている。粘度は MLSS の指数関数で表されることから，水温と MLSS はそれぞれ (4.18) 式による関数式と (4.17) 式による指数関数式として捉えたうえで，重回帰分析を行った。ばっ気強度・ KLa 動態を踏まえ，水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方式と片側旋回流式散気方式に区分して，加法式による重回帰式を求めたところ，次式が導かれた。

$$KL_{(T)} = KL_{(20)} \theta^{(T-20)} \quad (4.18)$$

水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方式

$$KL_o = 189.2 Ai + 0.42\theta^{(T-20)} + 8.93 \times 10^{-6} e^{Ca} - 0.76 \quad (4.19)$$

片側旋回流式散気方式

$$KL_P = 81.2 Ai + 0.62\theta^{(T-20)} + 2.37 \times 10^{-3} e^{Ca} - 0.62 \quad (4.20)$$

ここで、 $KL_{(T)}$: 水温 $T^{\circ}\text{C}$ の KL_a (h^{-1}) , $KL_{(20)}$: 水温 20°C の KL_a (h^{-1}) , θ : 温度補正係数 (1.02) , KL_o : 水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方式の KL_a (h^{-1}) , KL_P : 片側旋回流式散気方式の KL_a (h^{-1}) , Ai : ばっ気強度 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$) , Ca : MLSS ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) , T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$) . KL_a に係る実測値と計算値の自由度調整済重相関係数は、水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方式と片側旋回流式散気方式、それぞれ 0.95, 0.97 と高い値が得られ、 KL_a の実測値と計算値はよく一致している。ばっ気槽の KL_a には、ばっ気装置散気方式に対応したばっ気強度、MLSS、及び水温条件が関与しており、これらの影響因子から一定精度で算定できることが分かった (Fig. 4.13) .

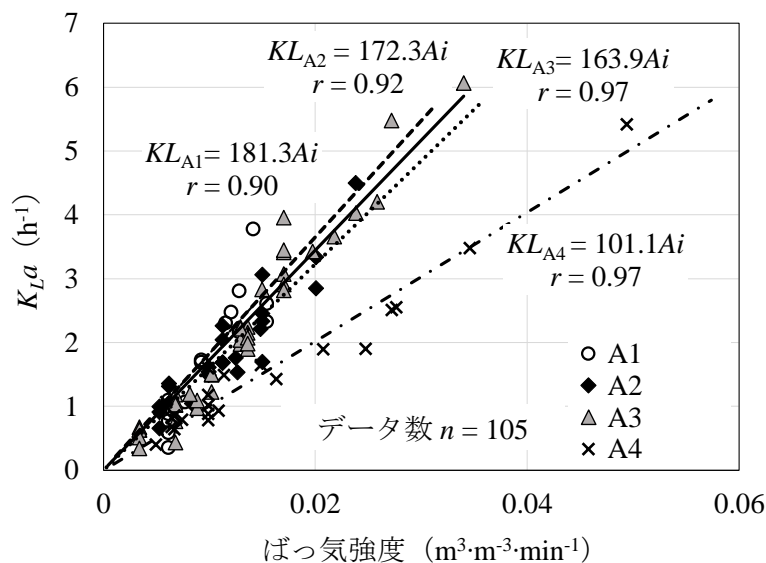


Fig. 4.10 ばっ気強度と KL_a の関係

Relationship between KL_a and aeration intensity in aeration tank

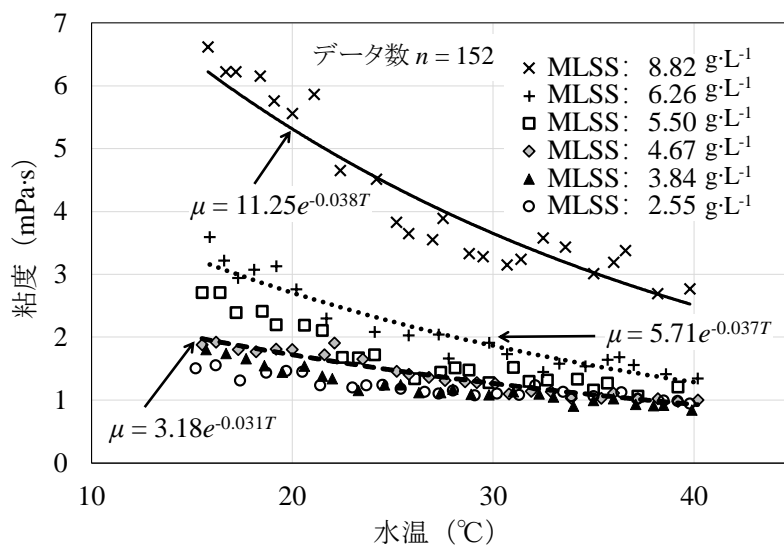


Fig. 4.11 ばっ気槽混合液の粘度と水温・MLSS の関係

Relationship between the measured value and the estimated value the viscosity from aeration tank mixed fluid

Table 4.8 粘度と水温・MLSS の係数

Coefficients corresponding viscosity to water temperature and MLSS

MLSS (g·L ⁻¹)	n (°C ⁻¹)	μ' (mPa·s)
8.82	-0.038	11.25
6.26	-0.037	5.71
5.50	-0.038	4.48
4.67	-0.031	3.18
3.84	-0.028	2.56
2.55	-0.017	1.87

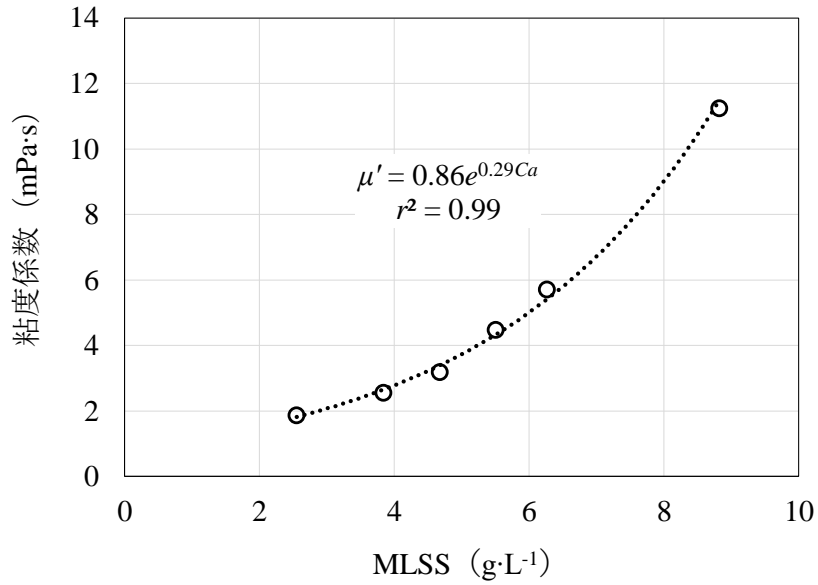


Fig. 4.12 MLSS と粘度係数の関係

Relationship between MLSS and viscosity coefficient

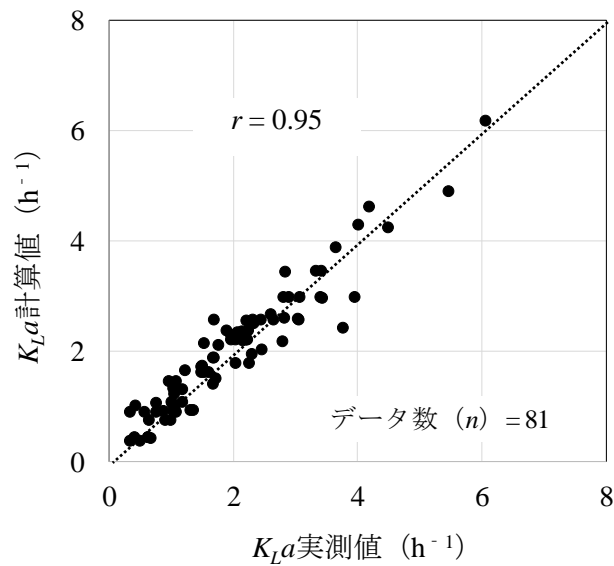


Fig. 4.13 水中機械式散気方式・全面ばっ気式散気方式施設の K_{La} 実測値と計算値の関係

Relationship between measured value and estimated value of the K_{La} from underwater mechanical aeration tank and overall aeration tank

4.3.4 効率的な処理能確保のためのばっ気槽管理への反映

ばっ気槽が1室構造であるA4施設（片側旋回流式散気方式）を対象にBOD除去性能の定式化を試みたうえで、効率的な処理性能確保するためのばっ気条件の設定方法を検討した。BOD除去速度恒数と KLa の間には、正の相関（相関係数：0.88）が存在しており、 KLa はばっ気強度や水温と（4.20）式で関係づけられることから、ばっ気強度、ばっ気時間、槽内水温を説明変数に乗法式による重回帰分析を行った。これらの説明変数とBOD除去速度恒数の重相関式として、（4.21）式（自由度調整済重相関係数：0.92）が導かれ、BOD除去速度恒数はばっ気強度、ばっ気時間、及び槽内水温を説明変数とする乗法型の重回帰式から推定できるものと考えられる。そこで、BOD除去率の説明式として（4.21）式を（4.2）式に代入すると（4.22）式が求められる。

$$Kb = 3.46 \times 10^{-8} \cdot \Delta t_l^{1.98} \cdot Ai^{0.30} \cdot T^{2.87} \quad (4.21)$$

$$BODr = 3.46 \times 10^{-6} \cdot \Delta t_l^{1.98} \cdot Ai^{0.30} \cdot T^{2.87} \cdot Ca \cdot ta / (1 + 3.46 \times 10^{-8} \cdot \Delta t_l^{1.98} \cdot Ai^{0.30} \cdot T^{2.87} \cdot Ca \cdot ta) \quad (4.22)$$

ここで、 $BODr$ ：BOD除去率（%）， Ai ：ばっ気強度（ $m^3 \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ）， Ca ：MLSS（ $mg \cdot L^{-1}$ ）。

（4.22）式に係る重相関乗法式係数はFig. 4.14に図示したように0.89であり、各説明変数単独によるBOD除去率との相関係数に比較して高い値が得られており、A4施設のBOD除去率の実測値と計算値はよく一致している。BOD除去率は、供用施設のばっ気装置散気方式に対応したばっ気強度・ばっ気時間、水温に影響されるBOD除去速度恒数と、ばっ気槽内のMLSS・水理的滞留時間の積を説明変数とする双曲線関係式から推定できるものと考えられる。A4施設のBOD除去率とBOD除去速度恒数は、それぞれ79.0～99.5%（平均値：92.0%）， $1.4 \times 10^{-5} \sim 9.9 \times 10^{-4} L \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1}$ （平均値： $2.6 \times 10^{-4} L \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1}$ ）で推移している（Fig. 4.15）。

BOD除去率とBOD除去速度恒数の経時変化から、BOD除去率が90%以上であり、 $1.1 \times 10^{-4} L \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1}$ 以上のBOD除去速度恒数が確保されている2016年6月、2016年10月、及び2017年3月の運転操作条件を比較検証した（Fig. 4.16）。2016年6月には、ばっ気強度とばっ気時間は $0.04 m^3 \cdot m^{-3} \cdot min^{-1}$ と43min（日空気量： $41.2 m^3 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ ）に設定されている。2016年10月のばっ気強度と

ばっ気時間は、それぞれ $0.05\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$, 20min (日空気量: $24.0\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$) であり、2017年3月の運転操作では、ばっ気強度とばっ気時間は $0.03\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$ と 30min (日空気量: $21.6\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$) に設定されている。2016年10月と2017年3月のばっ気槽水温は、それぞれ 31.2°C , 24.3°C であり、水温差は 6.8°C となっている。両者の日空気量水準は $20\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 強で運転操作されているなかで、2017年3月のBOD除去速度恒数は $4.4\times 10^{-4}\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ を示しており、水温が高い2017年10月に比べて高いBOD除去速度恒数値が得られている。運転日の水温条件とBOD除去速度恒数値を勘案すると、2017年3月の運転管理は、この3ケース中でばっ気空気量が最も少なくなるように運転操作されており、月平均電力使用量と月電気料金が2016年6月の運転管理に比較して25%程度低く抑えられたものと考えられる。(4.22)式に農業集落排水施設の目標BOD除去率を与えることによって、ばっ気槽の水温条件と水理的滞留時間が分かれば、ばっ気強度とばっ気時間の組合せを検討することで、ばっ気空気量を低くできる効率のよい運転管理方法を設定することが可能であると考えられる。

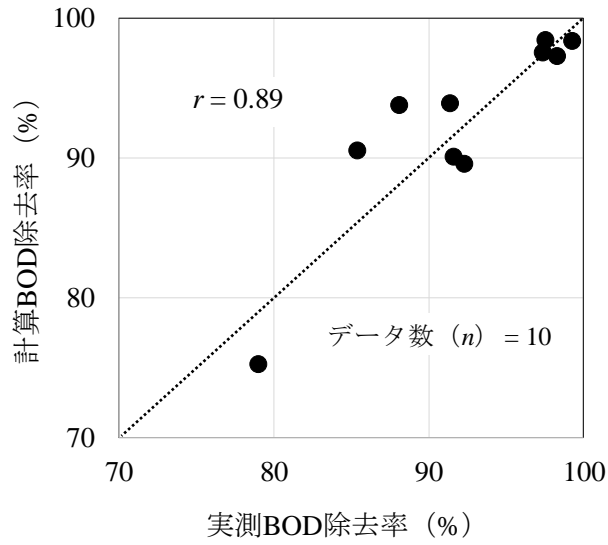


Fig. 4.14 BOD 除去率の実測値と計算値 (A4 施設)

Relationship between observed BOD removal and calculated BOD removal in A4 rural sewerage facility

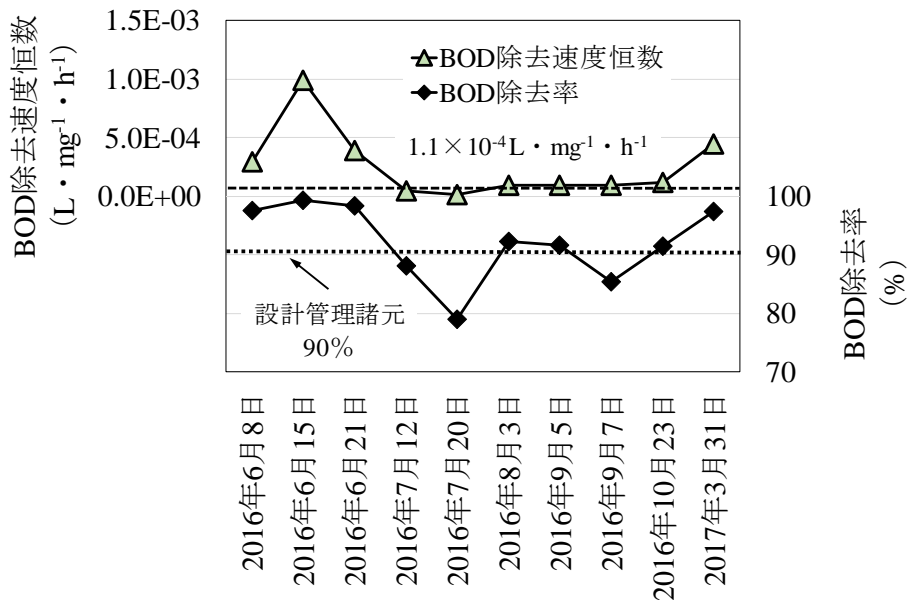


Fig. 4.15 BOD 除去率と BOD 除去速度恒数の経時変化 (A4 施設)

BOD removal and BOD removal reaction rate during observation period in A4 rural sewerage facility

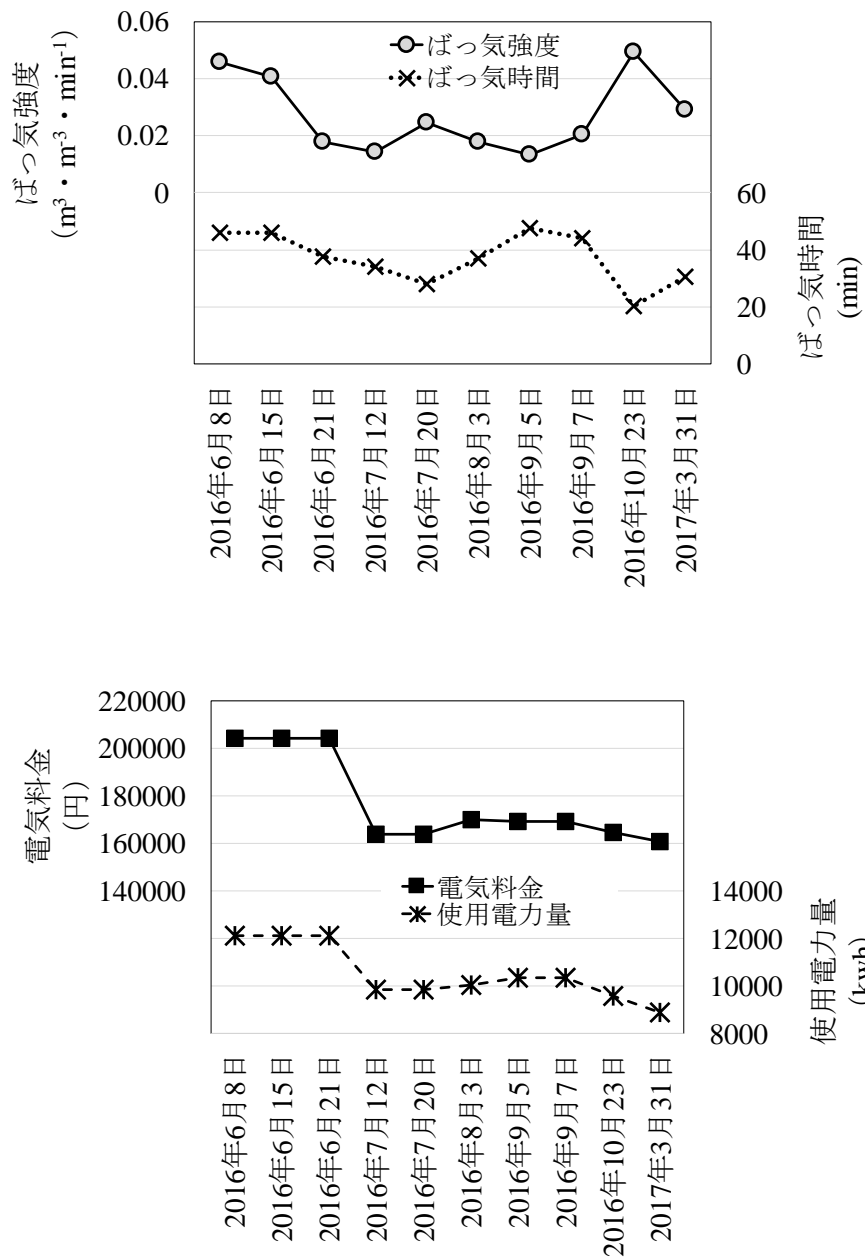


Fig. 4.16 ばっ気条件と使用電力量・電気料金 (A4 施設)

Aeration condition and power consumption during observation period in A4 rural sewerage facility

4.4 要約

本研究は、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設のばっ気槽管理と BOD 除去性能について、考察したものであり、得られた結果は以下のとおりである。

- (1) BOD 除去性能には沈殿槽流出水の ATU-BOD とともに N-BOD が関与しており、安定した除去性能を確保するためには、ばっ気槽 1 室のばっ気終了時の ORP は 100~125mV に、ばっ気槽 2 室のばっ気終了時の ORP は 50~85mV に維持することでばっ気終了時は酸化状態に、また、攪拌終了時には着実に還元状態となるようなばっ気槽 ORP の管理範囲について明らかにすることができた。
- (2) ばっ気槽の ORP 管理から BOD 除去性能確保に必要なばっ気終了時の DO を求めるとともに、ばっ気装置散気方式、ばっ気強度、ばっ気強度等の設計・運転操作条件と DO 挙動特性について把握することができた。ばっ気終了時 DO 値は、DO 濃度の上昇を左右するばっ気強度とばっ気時間によって定まるものの、DO 濃度の応答にはばっ気強度の最低閾値 ($0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$) が存在することが分かった。
- (3) KLa にはばっ気槽の活性汚泥粘度が関与しており、散気装置の散気方式に応じたばっ気強度、水温、及び MLSS を説明変数とする重回帰式から推定できるものと考えられる。また、BOD 除去速度恒数とばっ気槽内の MLSS・水理的滞留時間を説明変数とする双曲線関係式から BOD 除去率を推定することが分かった。ばっ気槽 1 サイクルのばっ気強度を $0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ とばっ気時間を 30min とすることで、少ないばっ気空気量で高い BOD 除去性能を得るなど、ばっ気強度とばっ気時間の組合わせたばっ気槽の運転操作を通じて、農業集落排水施設の運転管理効率化を図れることが示された。

第 5 章 総括

5.1 本研究のまとめ

本研究では、供用中の農業集落排水施設を対象として、農業集落排水施設における流入動態の把握と生物反応槽（連続流入間欠ばっ気方式）の浄化メカニズムに係る調査検討を通じて、運転管理の適正化に向けた考察を行った。ここに各章で得られた成果を総括し、本論文の結論とする。農業集落排水施設整備事業の内容・現状とともに、農業集落排水処理技術の現状と課題を第 1 章に示した。農業集落排水施設の流入負荷については、流入汚水量の特質と計画流入汚水量に対する検討結果を第 2 章に、それに基づいた農業集落排水施設流入水における既知の日水量負荷変動成分を状態空間モデルに適用し、変動特性の抽出を試みた結果を第 3 章に示した。連続流入間欠ばっ気方式における農業集落排水施設の浄化性能について、BOD 除去性能の影響因子と運転効率化に向けた運転管理方法に関する検討結果を第 4 章に述べた。以下に、各章の概要を示す。

第 1 章「緒論」では、本研究の目的とその背景及び研究構成について示した。また、農業集落排水施設整備の実施状況を述べるとともに、農村型汚水処理方式の特徴・概要と農業集落排水施設整備の推進と円滑な管理に向けて取り組みが必要となる技術課題について示した。

第 2 章「農業集落排水施設流入汚水量の実態と影響要因」では、農業集落排水施設から得られた実測データに基づき、農業集落排水施設の流入汚水量の実態把握と変動要因の検討を通じて、設計諸元の定量化と設定について考察した。日流入汚水量には、土地利用・立地条件が関与しており、処理区の土地利用・立地条件を水道水量と降水量に加味することで、これらを説明変数とする重回帰推定式から日流入汚水量を精度よく推定できることを明らかにできた。時間流入汚水量の日間変動には、管路延長、供用率、流入人口率が関与しており、時間水量日変動幅とピーク係数はこれらを説明変数とする重回帰推定式から

設計基準値を設定できることが示唆された。

第3章「状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出に関する研究」では、農業集落排水施設流入水について農業集落排水施設から得られた実測データに基づき、状態空間モデルの適用を通じて日水量負荷変動の把握と変動特性の抽出を試み、日水量負荷の変動要因について考察した。日流入水量はトレンド成分、季節変動成分、週間変動成分、及び降雨による変動成分に分離されるとともに、状態空間モデル解析により日流入水量の有する周期的な変動特性や観測データと対応した特徴を抽出できることが確認できた。日水量負荷変動には、供用人口に対応して変動する水道使用量、降水量、流入人口動態、お盆・年末・年始のイベントに対応する流量変動が関与していることが示唆された。状態空間モデルによる解析は、季節変動成分の解釈や降水に伴う変動成分予測精度に課題が残るものの、農業集落排水施設の日流入水量の変動特性の把握には活用できるものと考えられる。

第4章「連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設におけるばっ気槽管理とBOD除去性能に関する研究」では、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設のBOD除去性能確保に関して、ばっ気槽1室のばっ気終了時のORP管理範囲100~125mVを明らかにするとともに、ばっ気装置散気方式、ばっ気強度、ばっ気時間等によるDO挙動特性とBOD除去性能確保に必要なばっ気終了時のDO濃度を把握した。総括酸素移動容量係数(K_{La})にはばっ気槽の活性汚泥粘度が関与しており、ばっ気強度、水温、MLSSを説明変数とする重回帰式から推定できることが確認された。BOD除去速度恒数はばっ気強度、ばっ気時間、及び槽内水温を説明変数とする重回帰式から推定できることが示唆された。ばっ気強度($0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$)とばっ気時間(30min)を組み合わせたばっ気槽の運転操作を通じて、少ないばっ気空気量で高いBOD除去性能を得るなど農業集落排水施設の運転管理効率化が図られることが示された。

5.2 今後の課題

農業集落排水施設の円滑な維持管理の実施や円滑な改築に当たっては、供用施設や改築対象施設における流入水量の実態とその変動特性を適切に把握することが必要である。本研究では、不明水量は降雨開始後数時間で処理施設に到達するとともに、降雨イベントが長くなると不明水の処理施設への流入が長時間にわたることが確認されたが、不明量流入継続時間と管路延長、供用率、流入人口率の関係性については、今回の検討では十分に把握することはできなかった。降雨イベントに伴う不明水量の定量的な影響把握には、管路勾配や管路網等の管路施設情報や処理区内の集水条件等の詳細情報収集とこれに基づく検討が必要であると考えられる。環境問題への意識の高まりに加えて、閉鎖性水域での富栄養化防止対策や上乘せ規制の強化等から、電気使用料金の増加などにより事業費の高騰が想定されることから、高度な水質をより経済的に確保する技術開発とその適用が求められている。本研究成果が計画諸元の適切な設定や連続流入間欠ばっ気方式採用の農業集落排水施設における適切な設計諸元の設定や管理手法の確立等に反映され、維持管理コストの一層の低減や維持管理性の向上等を通じて、全国各地の多様な農村地域において、社会的な要請に応じて農業集落排水施設の整備と管理が円滑に進められることが期待される。

農業集落排水施設は、污水处理施設の建設で終わるものではなく、処理水や汚泥の再生利用を視野に入れた整備を行うことが重要である。農業集落排水施設の処理水は年間を通じてほぼ一定量であるため、ため池等の用水に依存し、その確保に苦慮している地域では処理水が貴重な水資源として活用できるものと考えられる。農村地域ではその域内に汚泥や処理水を健全な農林業活動の展開を通じて、有効に還元利用される可能性を有しており、その特徴を積極的に生かした農業集落排水施設の整備を図ることが必要である。今後一層、農業集落排水施設の適切な整備と整備施設の円滑な維持管理を図るためには、低コスト化技術の開発と適用、維持管理技術の充実、地域資源循環システムの構築等の課題の解決に向けた取り組みを行うことが重要であると考えられる。

謝辞

2014年4月から琉球大学博士前期課程の学生として研究に取り組み始め、早5年が経過しました。研究室に配属された当初、中国の大学から卒業したばかりに、専攻も異なった留学生であることで、新たな環境でのスタートに期待と不安な気持ちを抱えていました。琉球大学農学部・地域農業工学科の中野拓治教授には、我慢強くそして紳士的な態度で接して頂くなど、公私にわたってご支援を頂くとともに、終始、熱心な御指導・御鞭撻を賜りましたことに、心より深く御礼申し上げます。

佐賀大学農学部生物環境科学科の長裕幸教授、琉球大学農学部地域農業工学科の中村真也教授は、副指導教員として論文を纏めるに当たり研究への取り組み方、得られた結果に対する客観的な考察の仕方などについて、御助言、御指導を頂きました。ここに厚く謝意を申し述べます。鹿児島大学農学部農林環境科学科の靱井和朗教授、琉球大学農学部地域農業工学科の酒井一人教授におかれましては、学位公開審査会にて貴重なご意見、ご助言を頂きましたことに対し、謝意を表します。

農研機構農村工学研究部門・水域環境ユニット長の山岡賢博士、愛媛大学農学部生物環境学科の治多伸介教授におかれましては、学会発表のたびに、研究内容にかかる貴重なご助言や温かい励ましのお言葉をいただき、原論文作成に当たり御懇切な御指導、御鞭撻を賜りましたことに深く感謝申し上げます。

本論文は、(社)日本農業集落排水協会で収集されたデータを含めて、研究の成果をまとめたものであり、データの収集や数値解析に当たり多大な御支援を賜りました上富田町上下水道課、沖縄県村づくり計画課、恩納村上下水道課、宜野座村上下水道課、金武町上下水道課、(協組)ウィーク、(社)地域環境資源センター、(株)沖縄環境調査、(株)いであ国土環境研究所の関係各位に謹んで深く感謝申し上げます。本研究において得られた成果が農業集落排水施設の設計や管理に活用され、農業集落排水事業の円滑な推進を通じて、農村地域での地域資源循環システムの構築と近年の環境保全や国民生活の質の向上に一層貢献できるようになれば望外の喜びであります。

研究生活を暖かく見守って頂きました豊橋技術科学大学名誉教授北尾高嶺

教授，琉球大学名誉教授宜保清一教授，琉球大学農学部井上章二学部長と職員皆様に厚く御礼申し上げます。

両親には，大学生活 9 年間という非常に長い学生時代を何の不自由もなく送らせて頂きました。心より感謝を申し上げます。

引用文献

第 1 章 序論

有田博之（1989）：集落排水処理施設の給源不明水とその影響，農業土木学会誌 **57**（12），15-20.

地域環境資源センター（2018）：JARUS 型施設一覧表，（社）地域環境資源センターホームページ.

地域環境資源センター（2018）：集落排水の手引き-より良い保全・管理・整備のために-，[online] http://www.jarus.or.jp/pamphlet/S-1_3005_1.pdf，7-10.

中野拓治（1993）：農業集落排水（その1）—農業集落排水の現状と今後の展開方向—，農業土木学会誌 **61**（4），49-54.

中野拓治（1993）：農業集落排水事業の現状と今後の展開方向，集落排水 1993 年 10 月号，5-7.

中野拓治（1995）：農業集落排水の現状と今後の展開方向，用水と廃水 **37**（1），24-25.

中野拓治（1995）：農業集落排水の現状と今後の展望，月刊生活排水 1995 年 4 月号，18-24.

中野 拓治（1997）協会における技術開発等の取り組み，季刊集落排水，（社）日本集落排水協会，52，8-10

中野拓治（2001）：生物膜法の農業集落排水施設における流入特性と除去性能に関する研究，豊橋技術科学大学学位論文，21-22.

中野拓治（2013）：農業集落排水施設処理水の ATU-BOD・N-BOD 評価と設計・管理因子による影響について，農業土木学会論文集 **81**（1），9-16.

中野拓治（2016）：沖縄の農業農村と陸水環境の保全，陸水学雑誌 **77**，217-222

日本集落排水協会（1997）：平成 9 年度農業集落排水事業担当者講習会テキスト，（社）日本集落排水協会，26.

農業集落排水事業諸基準等作成全国検討委員会（1996）：農業集落排水施設設計指針，（社）日本集落排水協会，150-156.

農業土木学会編（2000）：改訂六版農業土木ハンドブック本編，（社）農業土木学会，242-245.

- 農林水産省構造改善局整備課監修（1993）：農業集落排水事業の手引き，公共事業通信社，4-9.
- 農村水質保全研究会（1990）：農村地域の水質保全と農業集落排水事業，（社）日本農業集落排水協会，7-10.
- 農村整備事業の歴史研究委員会編（1999）：豊かな田園の創造，（社）日本農業集落排水協会等，271-273.
- 李 雨桐，中野拓治，阿部真己，山本一生，畑 恭子（2015）：農業集落排水施設流入汚水量の変動特性に関する考察，平成 27 年度農業農村工学会講演会要旨集，118-119.
- 斉藤仁志（1997）：管理の時代に向けての集落排水，季刊集落排水，（社）日本集落排水協会，49，1
- 谷山重孝編集（2000）：新しい水環境の創出，（社）日本集落排水協会，106-109.

第 2 章 農業集落排水施設流入汚水量の実態と影響要因

- 地域環境資源センター（2004）：宜野座村惣慶地区（惣慶処理区）基本設計業務報告書，10-73.
- 地域環境資源センター（2006a）：恩納村山田地区（山田処理区）基本設計業務報告書，9-70.
- 地域環境資源センター（2006b）：宜野座村城原地区（漢那・城原処理区）基本設計業務報告書，10-65.
- 地域環境資源センター（2007）：金武町屋嘉地区（屋嘉処理区）基本設計業務報告書，12-68.
- 地域環境資源センター（2008）：恩納村喜瀬武原地区（喜瀬武原処理区）基本設計業務報告書，13-69.
- 李 雨桐，中野拓治（2016）：農業集落排水施設流入水の不明水と影響要因に関する考察，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，241-242.
- 李 雨桐，中野拓治，阿部真己（2016）：農業集落排水施設流入水における不明水の動態，第 19 回日本水環境学会シンポジウム講演集，196.

- 李 雨桐，中野拓治，山岡 賢（2017a）：亜熱帯地域の農業集落排水施設における水量負荷の実態と影響要因，第 20 回日本水環境学会シンポジウム講演集，317-318.
- 李 雨桐，阿部真己，畑 恭子，山岡 賢，中野拓治（2017b）：農業集落排水施設における水量負荷特性の把握と運転効率化への試み，平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，194-195.
- 村山 栄（1988）：農業集落排水処理施設における高度処理と処理水の利用事例，農土誌，56(3)，49-53.
- 中野拓治，川田明宏，三原達也，北尾高嶺（1999）：農業集落排水施設における流入汚水量の特質と計画流入汚水量に関する考察，農土論集，203，19-28.
- 中野拓治（2016）：沖縄の農業農村と陸水環境の保全，陸水学雑誌，77(2)，217-222.
- 中野拓治，李 雨桐，増井 寛，阿部真己（2016a）：農業集落排水施設における流入特性と運転効率化への試み，第 50 回日本水環境学会年会講演集，440.
- 中野拓治，李 雨桐，阿部真己（2016b）：農業集落排水施設流入水の日間変動特性に関する考察，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，235-236.
- 中野拓治，李 雨桐，阿部真己，畑 恭子（2018）：状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出に関する研究，農業農村工学会論文集，86(1)，I_9-I_17.
- 熱帯・亜熱帯地域水環境研究委員会（2017）：熱帯・亜熱帯地域水環境に関する研究動向，水環境学会誌，40(12)，436-440.
- 日本農業集落排水協会（1997）：上富田町生馬地区（生馬処理区）基本設計業務報告書，11-58.
- 日本農業集落排水協会（1998a）：農業集落排水協会技術開発課題検討業務報告書，46-106.
- 日本農業集落排水協会（1998b）：農業集落排水施設整備報告書，16-53.
- 農業土木技術研究会（1997）：農業土木技術の変遷，公共事業通信社，318-319.
- 農業集落排水事業諸基準等作成全国検討委員会（1996）：農業集落排水施設設計指針，日本農業集落排水協会，29-38.

農村整備事業の歴史研究委員会（1999）：豊かな田園の創造—農村整備事業の歴史と展望，日本農業集落排水協会，237-247.

高橋 強，西口 猛（1987）：集落排水処理施設への雨水流入の実態と対策，農土誌，**55**(2)，39-44.

田中義朗（1984）：集落排水処理技術の現状と問題点，農土誌，**52**(3)，21-30.

谷山重孝，安田昭彦，山崎隆信，中村義文，伊藤一幸（1989）：農業集落排水施設の処理性能と整備方式の検討，農土誌，**57**(5)，65-74.

谷山重孝（2000）：新しい水環境の創出—農業集落排水システムとその技術，日本農業集落排水協会，126-127.

安田昭彦（1988）：集落排水処理技術の現状と課題，農土誌，**56**(3)，11-17.

第 3 章 状態空間モデルの適用を通じた農業集落排水施設流入水の日水量負荷変動と変動特性抽出に関する研究

樋口知之（2011）：予測にいかす統計モデリングの基本，講談社，95-109.

キム・ヨンス，立川康人，萬和明，キム・スンミン（2014）：粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発，河川技術論文集，**20**，361-366.

金 明哲（2007）：R によるデータサイエンス，森北出版株式会社，134-147.

村山 栄（1988）：農業集落排水処理施設における高度処理と処理水の利用事例，農業土木学会誌，**56**(3)，49-53.

李 雨桐，中野拓治（2006）：農業集落排水施設流入水における不明水と雨水の影響要因について，H28 農業農村工学会大会講演会講演要旨集，241-242

中野拓治，川田明宏，三原達也，北尾高嶺（1999）：農業集落排水施設における流入汚水量の特質と計画流入汚水量に関する考察，農業土木学会論文集，**67**(5)，19-27.

杉浦正之，田中耕司（2014）：中小河川の水位予測モデルにおける非線形フィルタリング法の適用性評価，河川技術論文集，**20**，349-354.

高橋 強，西口 猛（1987）：集落排水処理施設への雨水流入の実態と対策，農業土木学会誌，**55**(2)，39-44.

田中義朗（1984）：集落排水処理技術の現状と問題点，農業土木学会誌，**52**(3)，
21-30.

田中耕司，辻倉裕喜，杉浦正之（2014）：非線形フィルタリングを用いた実時間河川水位の集中型モデルへのデータ同化，土木学会論文集 B1（水工学），
70(4)，409-414.

谷山重孝，安田昭彦，山崎隆信，中村義文，伊藤 一幸（1989）：農業集落排水施設の処理性能と整備方式の検討，農業土木学会誌，**57**(5)，65-74.

安田昭彦（1988）：集落排水処理技術の現状と課題，農業土木学会誌，**56**(3)，
11-17.

第 4 章 連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設における ばっ気槽管理と BOD 除去性能

Cornelissen J. and Waterman H. I. (1955) : The viscosity temperature relationship of liquids, Chemical Engineering Science, **4**(5) , 238-246.

Eckenfelder W. W. and McCabe B. J. (1960) : Waste Treatment, Edited by Issac, Pergamon Press, Oxford, 68-74.

Eckenfelder W. W. and O'Connor D. J. (1961) : Biological Waste Treatment, Pergamon Press, 76-81.

藤田哲雄（1982）：アクアレータの原理と機能について，月刊下水道，**5**(11)，
48-54.

Garret T. M. and Sawyer C. N. (1952) : Proc. 7th. Industrial Waste Conference, Purdue Univ., 51-71.

下水・廃水・汚泥処理ガイドブック編集委員会（1982）：下水・廃水・汚泥処理ガイドブック，（株）理工新社，407-410.

合田 健（1975）：水質工学-基礎編-，丸善株式会社，56-57.

平山公明，今岡正美，片山けい子，中村寛治（1978）：表面ばっ気における総括酸素移動容量係数の算出方法に関する一考察，山梨大学工学部研究報告：発表論文等リスト，山梨大学工学部，106-111.

井出哲夫（1990）水処理工学 - 理論と応用 - ，技報堂出版株式会社，253-254.

- 笠倉忠夫，富田美穂，松原 極，久保篤司（1992）：全面曝気方式エアレーションの基礎的研究，水処理技術，**3**(33)，143-151.
- 北尾高嶺（2003）：生物学的排水処理工学，水質工学，コロナ社，94-95.
- 丸野紘史，島田光重，石山 明，三浦雅彦（2012）：低動力型膜分離活性汚泥法，神鋼環境ソリューション技報，**9**(1)，2-5.
- Monod J.（1949）：Ann. Rev. Microbiology，**3**，371-394.
- 武藤暢夫，金 甲守（1986）：酸化還元電位値に影響を及ぼす要因に関する実験的検討，水質汚濁研究，**9**(10)，661-667.
- 鍋島良宏(1991):エアレーションタンクの省エネルギー化，環境技術，**20** (9) ，571-574.
- 中野拓治，宮城俊彦，渡久山 章，治多伸介，山岡 賢（2017）：熱帯・亜熱帯地域水環境に関する研究動向，水環境学会誌，**40A**(12)，436-440.
- 中野拓治（2001）：生物膜法の農業集落排水施設における流入特性と除去性能に関する研究，豊橋技術科学大学学位論文，21-22.
- 中野拓治(2006):連続流入間欠ばつ気活性汚泥方式の農業集落排水施設の BOD 除去性能とその支配因子，農業土木学会論文集，244，423-430.
- 中野拓治（2016）：沖縄の農業農村と陸水環境の保全，陸水学雑誌，**77** (2)，217.
- 日本規格協会（2013） ， JIS K 0102:2013 工場排水試験方法，45-51，170-179，157-160，148-157.
- 日本農業集落排水協会（1997）：農業集落排水協会-XV96 設計指針，（社）日本農業集落排水協会，55-65.
- 日本農業集落排水協会（1998a）：農業集落排水協会技術開発課題検討業務報告書，46-106.
- 日本農業集落排水協会（1998b）：農業集落排水施設整備報告書，（社）日本農業集落排水協会，16-53.
- 農村整備事業の歴史研究委員会（1999）：豊かな田園の創造—農村整備事業の歴史と展望，日本農業集落排水協会，237-247.
- O'Connor D. J.（1960）：Proc. 3rd Biological Waste Treatment Conf., Manhattan-College，45-49.

李 雨桐，中野拓治，阿部真己，畑 恭子，仲村千春，山岡賢（2018）：農業集落排水施設流入水の処理性能と運転効率化の試みに関する研究-連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式を事例として-，第 52 回日本水環境学会大会講演要旨集，39.

李 雨桐，中野拓治，阿部真己（2015），連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式農業集落排水施設 BOD 除去性能の影響因子と運転効率化に関する研究，第 49 回日本水環境学会大会講演要旨集，218.

地域環境資源センター（2016）：農業集落排水処理施設維持管理マニュアル JARUS-X IV 型編，（社）地域環境資源センター，120-121.

山崎満佳（1982）：JAS(ジェットエアレーションシステム)の原理と性能について，月刊下水道，5(11)，40-47

柚山義人，大西亮一，宮本泰行（1989）；回分式活性汚泥法による集落排水の高度処理に関する研究，農業工学研究所技報，(181)，17-81.

第 5 章 総括

治多伸介，櫻井雄二（2001）：処理水再利用の実態と特徴—農業集落排水処理水の農地への再利用(I)—，農業土木学会論文集，211，13-20.

中野拓治（2013）農業集落排水施設処理水の ATU-BOD・N-BOD 評価と設計・管理因子による影響について，農業農村工学会論文集，283，9-16

農林水産省農村振興局（2014）：農業集落排水事業の取組状況について，[online] <https://www.env.go.jp/council/09water/y0917-02/mat04.pdf>.

農林水産省農村振興局（2017）：農業集落排水施設の処理水のかんがい利用に関する手引き（案），[online] http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/nn/n_nouson/syuhai/attach/pdf/170809-1.pdf.

大橋欣治，山崎隆信，伊藤正晴（1980）：農村における集落排水処理の動向と課題，農土誌，48(11)，833-843.