

5. ラグーンおよび後段処理システムに関する共同研究（沖縄県）

日本で唯一の亜熱帯地域である沖縄県において、ラグーン処理法に関する検討を行った。実験施設は、沖縄県の中部東側の海岸沿いにある具志川浄化センター内に設置した。実験施設を用いた実験は、平成 13 年度から平成 15 年度まで行い、平成 16 年度にデータ整理、取りまとめを行った。（写真、および、カラー図は「5.」の文末にまとめて記載する）。

5. 1 目的

事前に行った技術援助経験者へのヒヤリングにより、熱帯地域の下水処理場に流入してくる生下水が計画に比べかなり低い場合があることや、ラグーン処理水の BOD 上昇の原因が槽内で繁殖した藻類の流出であること等の情報を得ることができた。その問題点の中からラグーン処理法に関する以下の 2 検討項目を抽出し、屋外実験施設を用いた実験を行った。

- 1) 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討
- 2) ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討

5. 2 実験施設に関して

5. 2. 1 具志川浄化センターの概要

沖縄県の下水道は、3つの流域で構成されている⁸⁾。そのうち、中城湾流域下水道の末端に具志川浄化センターがあり、沖縄県の中南部東海岸に位置している（図-9 参照 カラー）。全体計画は表-13 のとおりである。主要施設と運転概要を表-14 に示す。平成 13～15 年度の流入下水量は、11,500 m³/d 程度であり、年度ごとに若干の上昇がみられる（表-15 参照）。分流式の下水道であり、昭和 62 年から活性汚泥による下水処理を行っている。標準活性汚泥法の運転を行っており、流入下水、処理水の水質としては、流入下水の濃度が比較的高いものの、処理水の水質は良好である（表-16 参照）。水質の詳細は、資料-2 に記載する。処理水の放流先は、浄化センター横の海岸付近の河川であり、処理水の一部を砂ろ過し、再利用している。利用先としては、センター内のトイレ、洗浄用水、植栽用水等に利用し、さらに一般の方や業者にも提供している。

場内施設の配置を、図-10（カラー）に簡易図として示す（写真-25～27 参照）。実験施設は、重力濃縮棟付近にあり、浄化センターの流入下水と処理水の供給を受け運転を行った。

表-13 具志川浄化センターの全体計画⁵⁾

下水処理場 面積 ha	流入水質		処理区域 面積 ha	処理人口 人	処理能力 m ³ /d
	BOD mg/L	SS mg/L			
8.95	230	210	3,092	120,300	70,500

表-14 具志川浄化センターの主要施設と運転概要

主要施設名	有効容量 (m^3)	形 状	施設数	項 目	設 計 負 荷	
					計 画	実 績
最初沈殿池	1,526	$\phi 18.0 \times 3.0H$	2池	水面積負荷 $m^3/m^2 \cdot d$	日最大 50	日平均 21.6
エアレーション タンク	7,216	8.2W $\times$ 46.0L $\times$ 5.0H	4池	滞留時間 h	" 1.5	" 3.3
				エアレーション時間 h	日最大 10.1	日平均 15.7
				" (返送汚泥量込み)	" 7.2	" 11.6
				BOD-SS負荷 kg/SSkg $\cdot$ d	" 0.21	" 0.40
				汚泥返送率 %	" 40	" 35.3
				返送汚泥濃度 mg/L	" 6,000	" 3,000
				MLSS濃度 mg/L	" 1,789	" 770
最終沈殿池	2,252	8.5W $\times$ 26.5L $\times$ 2.5H	4池	所要空気量 $m^3/除去BODkg$	" 33.7	" 44.9
塩素混和池	384	3.0W $\times$ (26.0+22.4)L $\times$ 3.0H	1池	水面積負荷 $m^3/m^2 \cdot d$	日最大 20.0	日平均 12.2
				沈殿時間 h	" 3.0	" 4.9
				接触時間 min	日最大 15	日平均 50
汚泥濃縮タンク (車力式)	208	$\phi 9.4 \times 3.0H$	1池	塩素注入率 mg/L	平均2 最大3	" 3.1
				固形物負荷 kg/ m^2/d	60	56.3
				沈殿時間 h	7.8	6.4
遠心濃縮設備		30 m^3/h (運転は15 m^3/h)	1台	汚泥濃度 %	4.0	4.52
汚泥消化タンク	5,960	$\phi 16.0 \times 11.5H$	2基	汚泥濃度 %	3.5	4.42
				消化日数 d	30 (加温)	50.7 (無加温)
				消化率 %	50 (")	59.6 (")
				消化温度 $^{\circ}C$	35 (")	28.3 (")
脱水設備		15 m^3/hr	2台	ガス発生量 $Nm^3/分解有機物kg$	0.8 (")	0.64 (")
			2台	薬品添加率 %	1.0	1.25
				脱水率含水率 %	75.0	77.4
備 考	*形状・有効容量・計画値等は【平成10年度 中城湾流域下水道事業計画変更認可申請書】に基づいている。 *平成12年4月11日(火)より第4池のエアレーションタンク及び最終沈殿池本格稼働開始。					

※ 沖縄県下水道管理事務所「維持管理年報 平成13年度」より引用

表-15 具志川浄化センターの実験期間中の流入水量の移行⁵⁾

項目	単位	平成13年度	平成14年度	平成15年度
年間総流入下水量	m^3/y	4,015,680	4,167,700	4,501,920
最大流入下水量	m^3/d	35,990	33,922	25,820
最小流入下水量	m^3/d	8,200	9,890	9,890
年間日平均流入下水量	m^3/d	11,000	11,420	12,300

表-16 具志川浄化センターの実験期間中の水質の移行⁵⁾

項目	単位	平成13年度	平成14年度	平成15年度
流入下水	SS mg/L	156	220	221
	BOD mg/L	240	280	300
	COD mg/L	97	120	120
放流水	SS mg/L	3	3	2
	BOD mg/L	4.3	3.9	2.6
	COD mg/L	14	14	12

5. 2. 2 実験施設の概要

実験施設の概略図を、図-11 に示す。実験施設は、大きく分けて流入下水混合槽、ラグーン処理施設、植生帯流入タンク、植生帯の 4 施設からなる。流れとしては、流入下水混合槽から出た流入下水が、ラグーン処理施設で処理され、その処理水が植生帯に流入する。図-12 が実際の実験施設である。手前にラグーンが 2 池あり、奥の植生帯から植物が生えている様子が確認できる。

流入下水混合槽では、浄化センターより流入下水と処理水を引き入れ、BOD が目標とする値となるように混合し、ラグーンに流入させた。混合槽の容量は 3 m^3 で、ラグーンへの流入水量は最大 $50 \text{ m}^3/\text{d}$ まで上げられる。なお、流入下水は当初生下水を使用していたが、混合槽内のスクリーンに SS が多量に詰まる問題、さらに、実験期間中、浄化センターにおいて夜間電力使用による省エネのための管内貯留が開始され、管内貯留で溜まった SS が朝方に大量の生下水とともに実験施設に流れ込み、混合槽のスクリーンでは対応が難しいという問題が生じたため、最終年度である平成 15 年の 6 月 27～30 日の時期に流入下水用のポンプを最初沈殿池後に移設し、一次処理水を流入下水として使用した。なお、生下水を使用していた際もスクリーンで多くの SS が捕捉されていたため、移設後の流入下水に大きな水質の変動は見られなかった。

ラグーン処理施設は、形状の異なるラグーン 2 池で構成され、共に容量 100 m^3 、水深 2 m である。ラグーン 1 は、 $14 \times 5.5 \text{ m}$ の長方形の形状であり、ラグーン 2 は $8.6 \times 8.6 \text{ m}$ の正方形の形状をしている（資料-3 参照）。なお、本調査の前に、ラグーンの基礎的運転方法等の知見を得るため、浄化センター流入下水（高負荷、通常の日本の下水）を対象とした運転管理に関する実験が行われた。その際、ラグーン 1 でラグーン処理法、ラグーン 2 で曝気式安定化池の検討を行ったため、2 池構成となっている。その詳細は「平成 12 年度下水道関係調査研究年次報告書集 国総研資料第 10 号 pp.41-46」に記載されている。本調査はその当時のノウハウを踏まえて進められている。

植生帯流入タンクは、植生帯への流入水（ラグーン処理水）の流量調節、分配を行うものである。容量は 0.5 m^3 であり、ラグーン処理水を 3 つに分配できる構造とした。

植生帯は、外寸 $1,337 \times 864 \times 793 \text{ mm}$ の容器（ 0.5 m^3 ）に、赤土を水深 20 cm になるように敷き詰め、現地で自生しているヨシを植付けた（写真-34～36 参照）。その容器を縦に 5 つ並べたものを 1 系列として、合計 3 系列の植生帯を作製した。うち 1 系列は、ヨシを植付けないブランク系列とした。

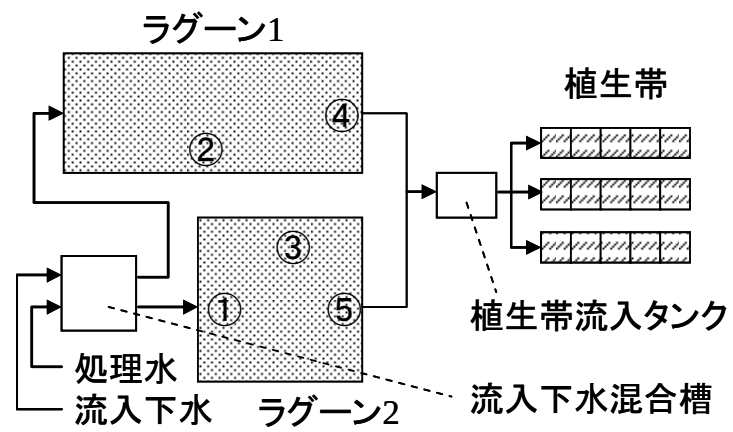


図-11 実験施設の概略図

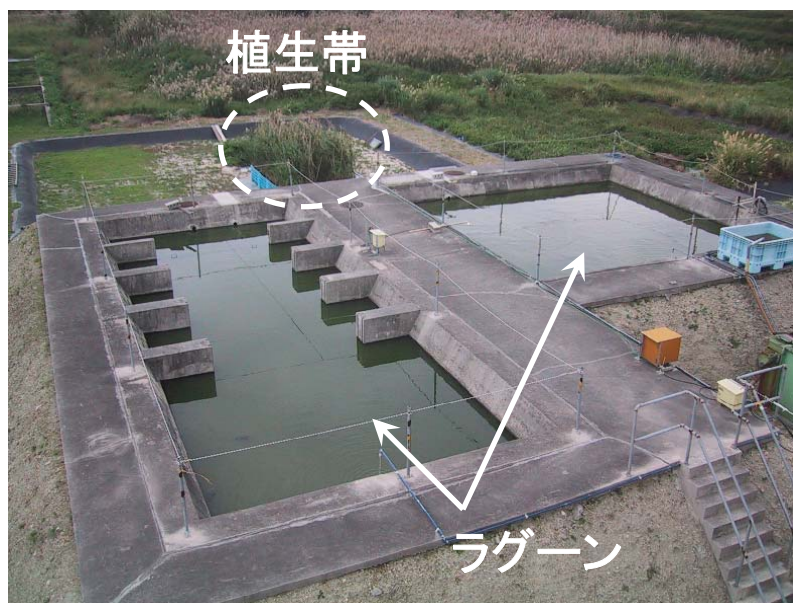


図-12 実験施設の全体写真

5. 3 各実験施設の詳細と実験方法

5. 3. 1 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討方法

熱帯・亜熱帯地域の発展途上国の中には、下水管路内において下水の沈降・浄化作用により、計画値に比べかなり低負荷の流入水が処理場に流入している現状がある。このため、浄化センターの流入下水を処理水で希釈して、ラグーンに流入させ、処理状態を確認することで、低負荷条件での適切な維持管理に関する検討を行った。

本検討に用いた実験施設は、流入下水混合槽とラグーン 1, 2 である（図-11、写真-28～31 参照）。

実験では、流入水の BOD を 50, 100, 200 mg/L、HRT を 30, 20, 10, 5, 2 d に変更し、処理状態を確認しながら、適正な維持管理について検討を行うこととした。なお、BOD 200 mg/L、HRT 2 d の設定は、負荷が高過ぎ、その後の実験に影響があるため、設定しなかった。実験中は、週 1 回の水質測定とラグーン内の鉛直分布調査を行った。水質測定は、図-11 の図中の番号のポイントでサンプリングを行った。各名称は順番に①流入水、②ラグーン 1 槽内、③ラグーン 2 槽内、④ラグーン 1 処理水、⑤ラグーン 2 処理水であり、採水位置は水面付近とした。サンプルは、現地と国総研で分析を行い、国総研へのサンプルは現地で硫酸を適量添加したのち冷蔵で移送した。現地での測定・分析項目は、水温、pH、DO、ORP、SS、BOD、COD_{mn}、大腸菌群数、クロロフィル a であり、国総研では T-N、T-P、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、COD_{cr} の分析を行った。鉛直分布調査は、②ラグーン 1 槽内と③ラグーン 2 槽内で行い、水深ごとの水温、pH、DO、ORP の測定を行った。なお、BOD 100 mg/L、HRT 30, 10 d の条件では、実験作業の都合で、この試験を行うことができなかった。

平成 13 年 11 月末に実験施設の改造、設置工事が終了したため、12 月より通水を開始した。通水開始後 1 ヶ月間は養生期間とし、平成 14 年 1 月よりサンプリングを開始した。養生期間の流入水の設定条件は、BOD 50 mg/L、HRT 30 d である。

実験をはじめめる前にラグーン底の清掃を行い、さらに条件設定の都合上、高負荷の時期が長く続いた後の平成 15 年 2 月 18 日に清掃を行った（写真-32 参照）。清掃時には、まず水面付近の水をタンクに入れることで元のラグーンの水を確保した後に、すべての水を抜き清掃を行った。底の掃除を行った後に浄化センターの処理水をラグーンに入れ、適量になったところで元のラグーンの水を入れ、十分な養生期間を取り実験を再開した。

5. 3. 2 ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討方法

ラグーンにおいて、ある程度の処理水質が維持できることは確認されている。しかし、処理水中に藻類が含まれているため、処理水と流入水がほぼ変わらない BOD の値を示し、藻類の流出が問題となっている。また、ラグーンは、大腸菌のような病原微生物の除去を考慮したものではないため、その処理が十分ではない。このため、ラグーン後段に植生帯を設置し、処理水のさらなる高度化についての検討を行った。

本検討に用いた実験施設は、植生帯流入タンクと植生帯である（図・11、写真・33～36 参照）。3系列ある植生帯（内、1系列はブランク）に、ラグーン1、2から得られた処理水を流入させ、ブランク系とヨシを植えた植生帯1、植生帯2の対照実験を行った。設定条件はHRT 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25 dとした。なお、実験期間中、ブランクと植生帯1のHRTは同じ条件であるが、植生帯2に関しては負荷を高く設定した。サンプルは、流入タンクで植生帯流入水、植生帯各系列の中間点で槽内の水を、最終槽の末端で処理水を採取した。現地の水質分析は、週1回の水温、SS、BOD、COD_{mn}、大腸菌群数、クロロフィルaを測定し、国総研に関しては、月1回でT-N、T-P、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、COD_{cr}の分析を行った。

平成13年12月に設置工事が終了したが、冬期のため水温が低く、ヨシの植付けをすぐには行えなかった。その後、水温の状態を確認しながら平成14年3月に1回目の植付けを行ったが、根付かず枯れてしまった。次に2回目の植付けを6月に行い、植付けが成功した。開発途上国では、人件費等の問題により、維持管理が行えない状態にあることが多々あるため、今回の実験ではヨシが十分生長しきった状態で実験を開始し、管理をまったくしない状態で設定条件の変更を行い、その浄化能力を確認する。このため、平成14年度の1月末までをヨシの養生期間とし、その後サンプリングを開始した。

5. 4 実験結果

5. 4. 1 低負荷流入水におけるラグーンの適正維持管理に関する検討結果

図-13 に実験期間中の水温、T-BOD、DO、クロロフィル a を示す。水温は、平均 25 °C 程度であり、夏季の一部の期間で 30 °C 以上に上がり、最低でも 15 °C を維持していた。処理の状態として T-BOD の値を見ると、ラグーン処理水質は期間中ほとんど流入水質に比べ良好であり、期間中十分な処理が行えていることがわかる。藻類の繁殖状態として、DO とクロロフィル a を見ると、ほぼ年中活発に繁殖していることがうかがえる。特に 2 年目の夏に DO が高い値を示している。実験初期に DO とクロロフィル a が低い値を示しているが、これはラグーン立ち上げの時期であるうえ、流入負荷、水温がともに低く、藻類の増殖が思わしくなかったためであると思われる。

各設定条件の処理状態として、図-14,15 に T-BOD、D-BOD、DO、ORP、クロロフィル a、大腸菌群数の設定 HRT ごとの平均値（処理が安定している期間の平均値）を示す。また、表-17 にその他の水質分析も含めたすべての項目の平均値を示す。処理水の T-BOD の値は、流入 BOD 200 mg/L、HRT 5 d の処理水で高い値を示したものの、その他の条件では処理水の水質はほぼ同程度であった。全体的な傾向として、BOD 負荷が高い設定条件のときに処理水の T-BOD が比較的高い値を示していた。

ラグーン槽内の状態として DO、ORP を見ると、流入 BOD 50 mg/L の HRT 2 d、流入 BOD 100 mg/L の HRT 5, 2 d、流入 BOD 200 mg/L の HRT 5 d の処理水の DO がなく、ORP もマイナスの値を示した。クロロフィル a の値は、流入 BOD 50 mg/L の HRT 2 d と流入 BOD 100 mg/L の HRT 2 d で低かった（ここで、流入 BOD 50 mg/L の HRT 30 d の DO、クロロフィル a 値が低いのは、実験初期段階に水温が低く、流入負荷の設定も低く、藻類の繁殖が良好に行えていなかったためである）。これは、負荷が藻類からの酸素の供給に比べて大きいこと、および、藻類の増殖速度に比べ、滞留時間が短いことが理由として考えられる。流入 BOD 100 mg/L の HRT 5 d、流入 BOD 200 mg/L の HRT 5 d に関しては、クロロフィル a の値が高く、DO がなく、ORP がマイナスを示していることから、藻類が池内に存在しているものの、藻類からの酸素供給がすべて流入負荷の好気処理に使用され、酸素が足りない状態にあると考えられる。また、流入 BOD 50 mg/L の HRT 2 d、流入 BOD 100 mg/L の HRT 2 d に関しては、クロロフィル a の値が低く、DO がなく、ORP がマイナスを示していることから、池内の滞留時間が短すぎるため藻類の増殖が追いついていない状態にある。この結果、ラグーンにおいて HRT 2 d では、池内に藻類を維持することが難しいため、それ以下の HRT では運転が行えない。HRT 5 d に関しても、流入 BOD 100, 200 mg/L の高負荷の場合、池内の酸素が足りない状況になるためラグーンとしての処理が不完全になる。

次に、流入 BOD 100 mg/L の HRT 2 d の条件での T-BOD を確認すると、処理水の T-BOD の除去率が若干低い印象があるものの、他の条件の処理水と比較すると同程度の値であり、ある程度の処理が行われているように見える。しかし、上述のとおり、この運転条件は藻

類を維持できない状態にある。ここで、流入水と処理水の D-BOD はほぼ同程度となっており、ほとんど処理されていない状態であることがわかる。DO、ORP、クロロフィル a も同様に他の運転条件より悪い状態にあることが確認できる。このように、T-BOD のようなトータルサンプルのみの確認では、その値が未処理の下水由来なのか、それとも処理中に発生した藻類の影響なのか、確認することは不可能である。そのため、T-BOD だけでなく、その他の水質項目も合わせて適正な処理がなされているか確認することが必要である。ラグーン処理では、反応槽内に溜めた下水に藻類が十分に繁殖し、その藻類から発生される酸素を使い、下水中の汚濁物質を好気処理することが理想とされる基本的な処理であるため、藻類濃度を示すクロロフィル a や槽内酸素濃度の DO 値が重要であり、その他、処理水中の藻類を含まない溶解性のみの汚濁負荷の指標である D-BOD が重要な指標となる。今回の実験により、汚濁物の処理を考えた場合、ラグーンがシステムとして機能している設定条件は、流入 BOD 50 mg/L の場合 HRT 5 d 以上、流入 BOD 100 mg/L の場合 HRT 10 d 以上、流入 BOD 200 mg/L の場合 HRT 10 d 以上が必要であることが明らかとなった。

実験期間中の大腸菌群数の値は、各流入 BOD 設定値で HRT が短くなるごとに値が大きくなっていく傾向にあった。流入 BOD 50 mg/L であれば HRT 5 d から、流入 BOD 100 mg/L であれば HRT 10 d から、流入 BOD 200 mg/L であれば HRT 20 d から値が増加した。今回の実験では、処理が良好に行えている場合、大腸菌群数は 1.0×10^4 CFU/mL 程度に抑えることが可能であった。

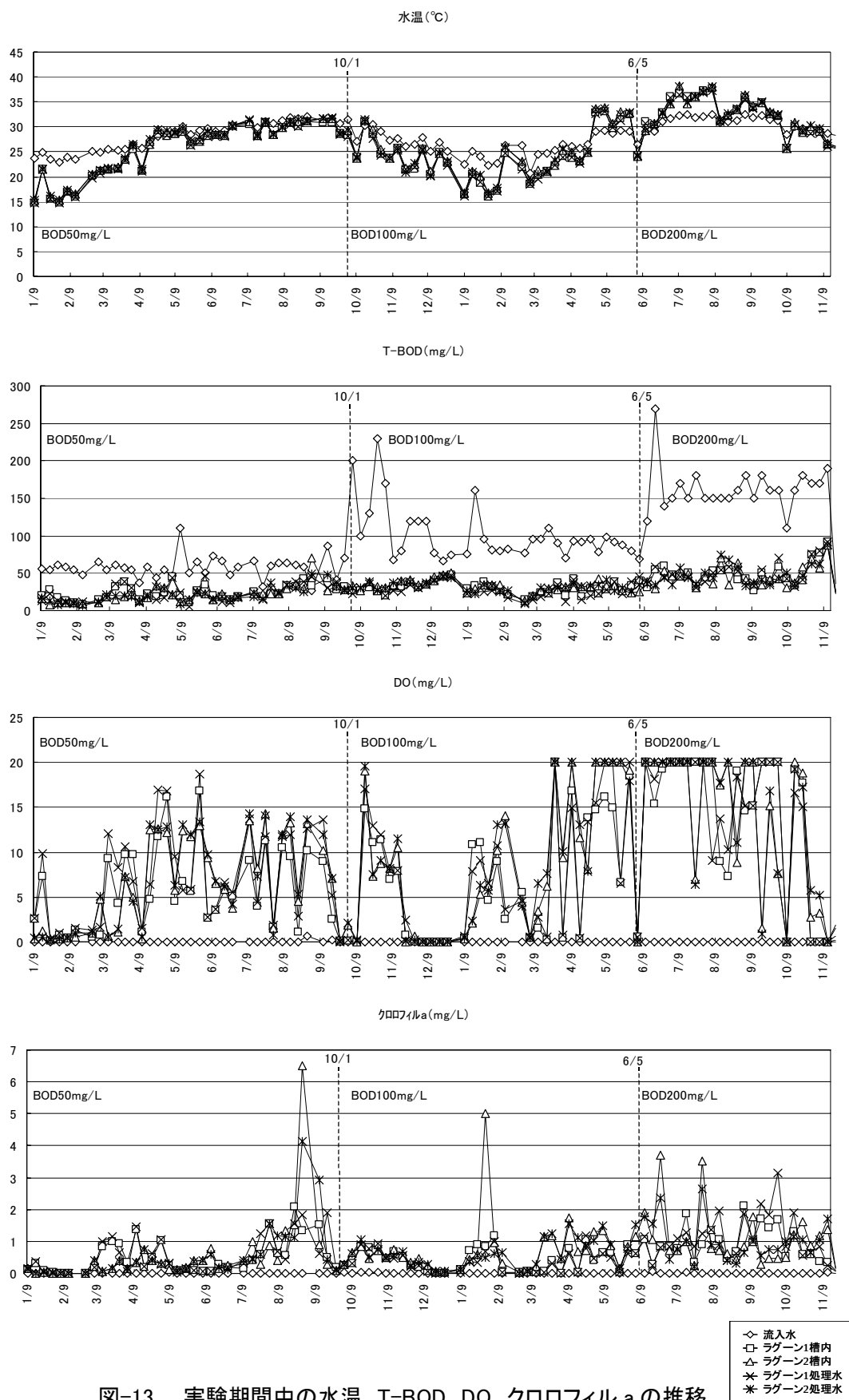


図-13 実験期間中の水温、T-BOD、DO、クロロフィル a の推移

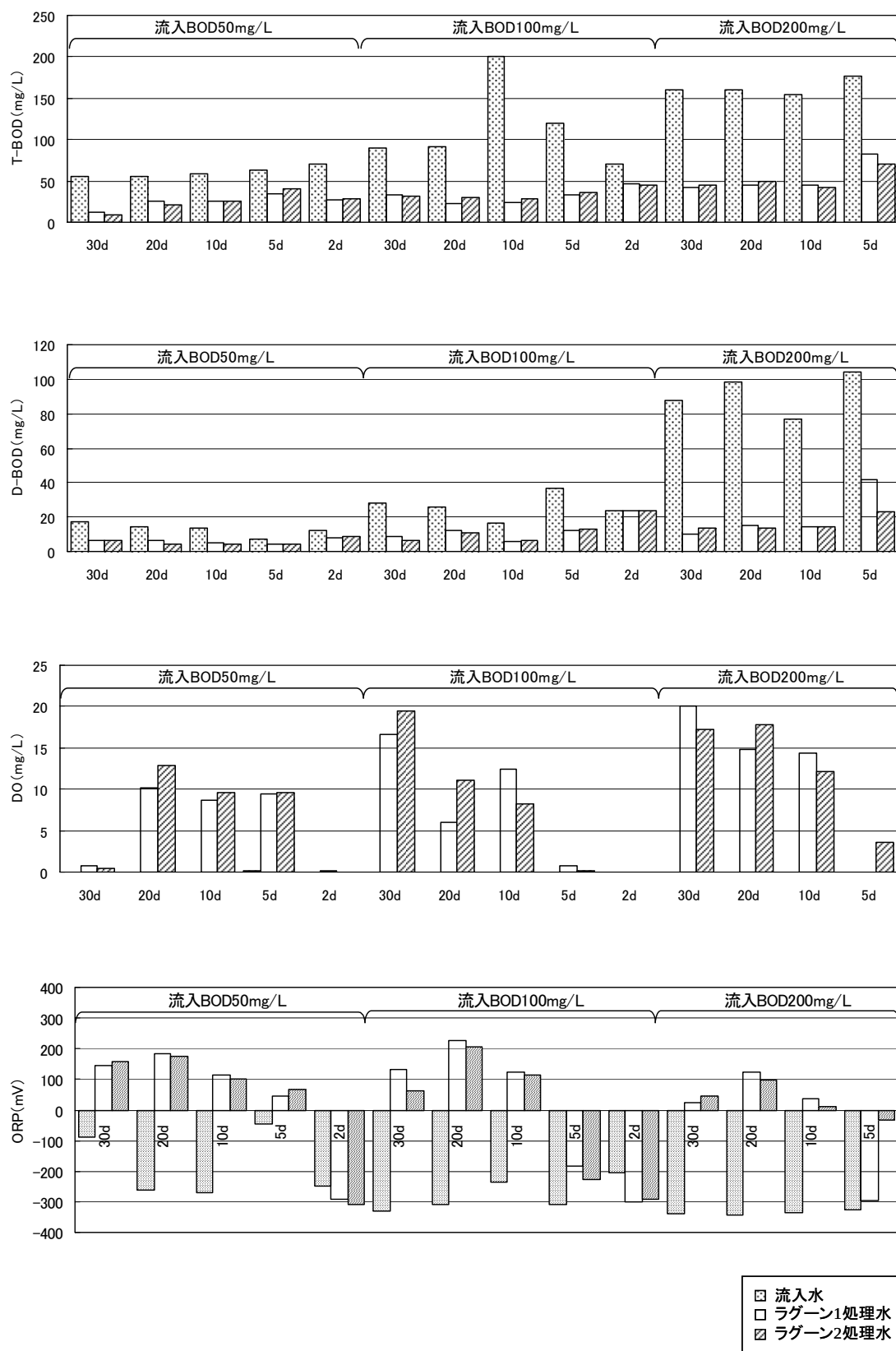


図-14 各設定 HRT ごとの平均値(T-BOD、D-BOD、DO、ORP)

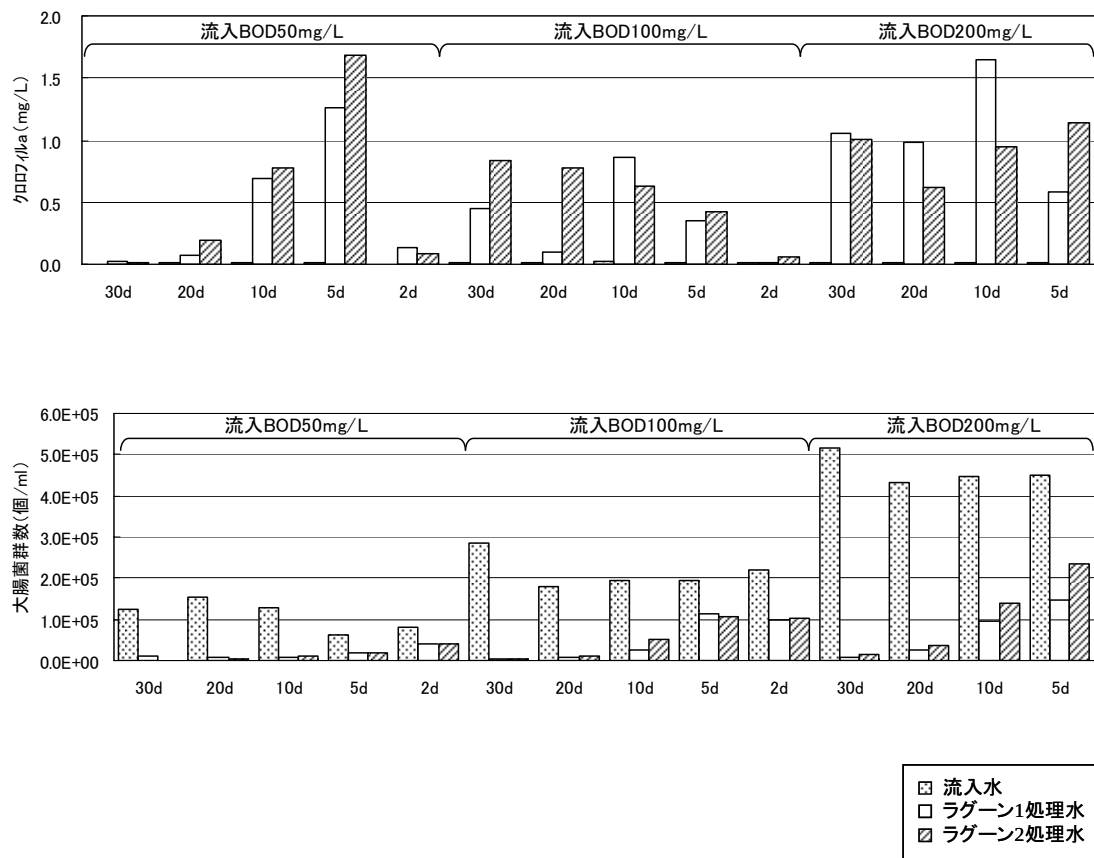


図-15 各設定 HRT ごとの平均値(クロロフィル a、大腸菌群数)

表-17 各設定HRTごとの水質分析の平均値

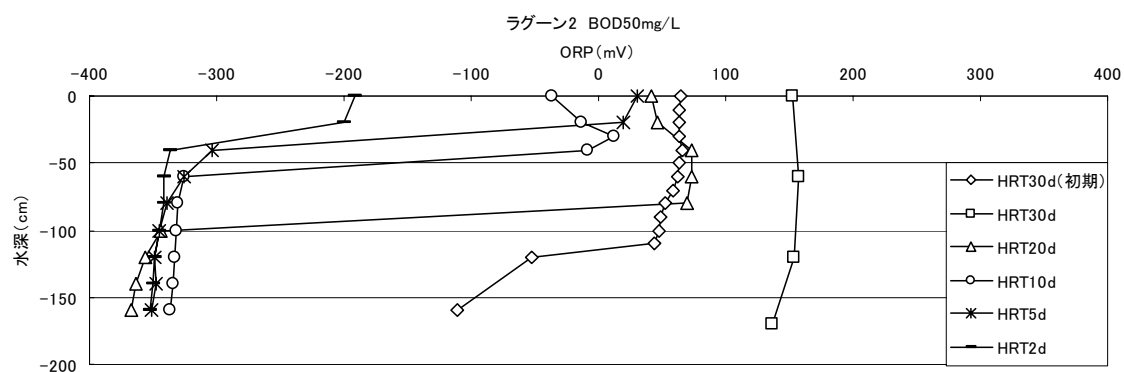
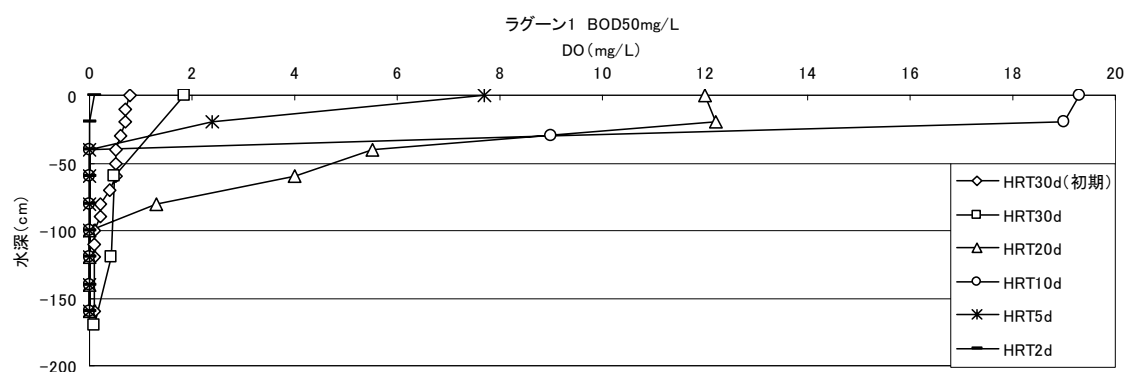
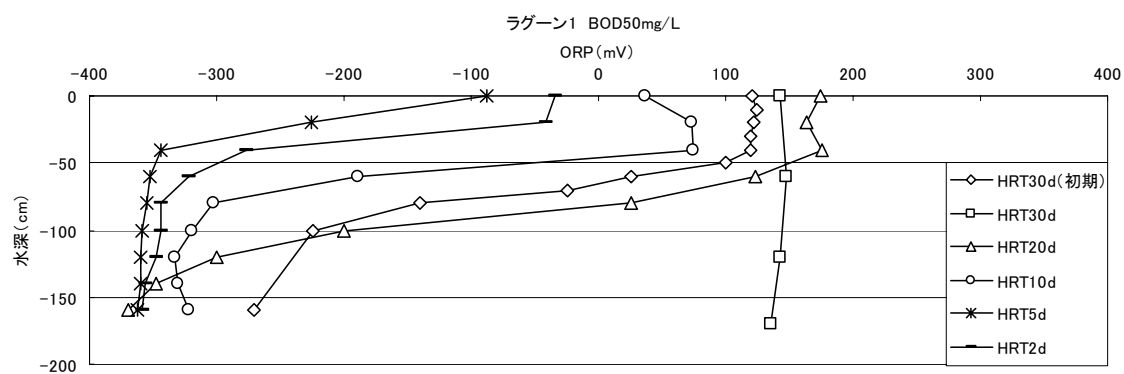
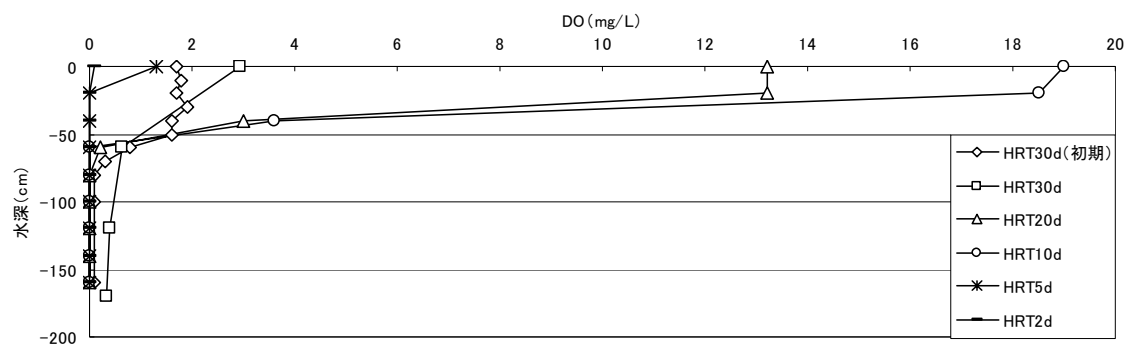
	流入BOD50mg/L						流入BOD100mg/L						流入BOD200mg/L					
	HRT (d)						HRT (d)						HRT (d)					
	30	20	10	5	2		30	20	10	5	2		30	20	10	5		
水温 ℃	23.4	29.3	30.8	31.5	30.7		29.1	25.2	29.7	26.8	26.0		32.1	31.7	30.2	29.2		
ラグーン1処理水	15.8	27.4	29.9	31.7	28.5		31.7	21.7	26.0	23.0	23.5		36.2	33.6	30.0	27.8		
ラグーン2処理水	16.4	28.2	30.0	31.7	28.7		32.4	22.6	26.8	23.0	23.8		36.2	34.1	30.1	28.8		
流入水	7.2	7.1	7.0	6.9	6.8		7.0	6.9	6.8	6.7	7.0		6.9	6.9	6.9	6.8		
ラグーン1処理水	7.3	8.2	8.5	8.1	6.9		9.0	7.7	8.0	7.1	7.0		9.8	8.6	8.3	7.0		
ラグーン2処理水	7.3	8.5	8.6	8.1	6.8		10.2	8.3	7.8	7.1	7.0		9.6	9.0	8.0	7.8		
流入水	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0		
ラグーン1処理水	0.8	10.1	8.7	9.4	0.1		16.6	6.0	12.5	0.8	0.0		20.0	14.8	14.3	0.0		
ラグーン2処理水	0.5	12.8	9.5	9.6	0.0		19.5	11.1	8.3	0.1	0.0		17.3	17.8	12.2	3.6		
流入水	-88	-260	-271	-44	-249		-330	-309	-237	-311	-207		-340	-345	-337	-326		
ラグーン1処理水	147	183	115	46	-293		130	229	122	-182	-302		23	121	39	-298		
ラグーン2処理水	159	175	102	67	-311		64	204	115	-229	-292		46	96	11	-32		
流入水	45.5	61.0	60.4	58.5	78.0		95.0	86.3	305.0	83.7	78.5		96.4	87.3	94.4	90.7		
ラグーン1処理水	6.0	12.7	49.6	70.0	34.0		46.8	15.0	59.0	50.0	37.5		86.0	72.0	124.2	73.3		
ラグーン2処理水	5.0	23.3	51.1	85.0	33.0		68.3	44.3	54.5	53.7	43.0		74.6	76.8	90.6	109.7		
流入水	55.5	55.3	58.1	63.5	70.0		89.3	91.3	200.0	120.0	71.0		160.0	160.0	154.0	176.7		
ラグーン1処理水	12.0	25.7	26.1	34.5	27.0		32.3	22.0	23.5	32.7	46.5		41.6	45.5	44.8	82.0		
ラグーン2処理水	8.7	20.7	25.3	40.0	28.0		31.0	30.3	28.5	35.7	44.5		44.2	49.3	41.8	70.3		
流入水	17.5	14.3	14.0	7.4	12.0		28.0	25.8	16.5	36.3	24.0		88.0	98.5	76.8	104.3		
ラグーン1処理水	6.7	6.2	5.2	4.6	7.7		8.6	12.0	5.4	11.9	23.5		10.2	14.8	14.5	41.7		
ラグーン2処理水	6.2	4.6	4.4	4.4	8.5		6.5	10.5	6.2	12.0	23.5		13.8	13.5	14.0	23.3		
流入水	31	31	29	26	31		48	47	90	41	45		66	61	64	66		
ラグーン1処理水	19	28	36	44	25		44	29	45	39	3		70	67	74	82		
ラグーン2処理水	17	27	36	54	29		58	44	44	41	33		78	67	64	71		
流入水	17	16	14	11	14		21	22	17	20	20		32	33	33	34		
ラグーン1処理水	16	21	13	13	15		22	22	14	17	19		27	30	21	26		
ラグーン2処理水	16	16	13	14	16		21	21	15	17	19		33	29	22	24		
大腸菌数 個/ml(CFU/ml)	124,500	153,333	128,571	61,500	81,000		285,000	180,000	195,000	193,333	220,000		516,000	430,000	448,000	450,000		
ラグーン1処理水	9,675	6,667	5,686	17,000	42,000		5,075	8,750	26,500	115,000	99,500		6,320	25,000	94,800	145,000		
ラグーン2処理水	1,300	4,833	9,814	19,000	41,000		3,978	10,675	53,000	107,333	103,000		15,660	37,500	138,000	232,667		
流入水	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		0.01	0.01	0.03	0.01	0.01		0.01	0.01	0.01	0.01		
ラグーン1処理水	0.02	0.07	0.69	1.26	0.13		0.45	0.10	0.67	0.35	0.01		1.06	0.98	1.65	0.58		
ラグーン2処理水	0.01	0.20	0.78	1.68	0.08		0.84	0.78	0.63	0.42	0.06		1.01	0.61	0.94	1.14		
データ期間	2002.1.23 ～2002.2.13	2002.5.15 ～2002.5.29	2002.6.26 ～2002.8.14	2002.9.11 ～2002.9.18	2002.9.25		2003.5.7 ～2003.5.28	2003.3.12 ～2003.4.2	2002.10.23 ～2002.10.30	2002.11.20 ～2002.12.4	2002.12.18 ～2002.12.25		2003.7.2 ～2003.7.30	2003.8.20 ～2003.9.10	2003.9.24 ～2003.10.22	2003.10.29 ～2003.11.12		

※データは、設定変更後、それぞれの設定HRT分の日数が経過した後、次の設定変更直前の水質分析日から、次の設定変更直前の水質分析日までを平均したものである。
 ※2003.6.4のデータに管内貯留の影響が見られたため、今回のデータ整理からはずしている。

鉛直分布調査の結果を図-16,17,18 に示す。全体的な傾向としては、ラグーン 1 と 2 の差があまりないことが確認できる。基本的な水質測定の結果でも有意な差が見られないため、今回のラグーンの形状の場合、処理レベルの差が比較的少ないと考えられる。図-16 中の流入 BOD 50 mg/L の HRT 30 d (初期) は、実験開始直後の、藻類の繁殖が悪い時期の鉛直分布調査の結果である。HRT 30 d に比べ、水深の深いところで ORP が低く、嫌気的な状態であった。同じ条件であっても、藻類の状態により、池の縦方向の違いがあることが確認できた。

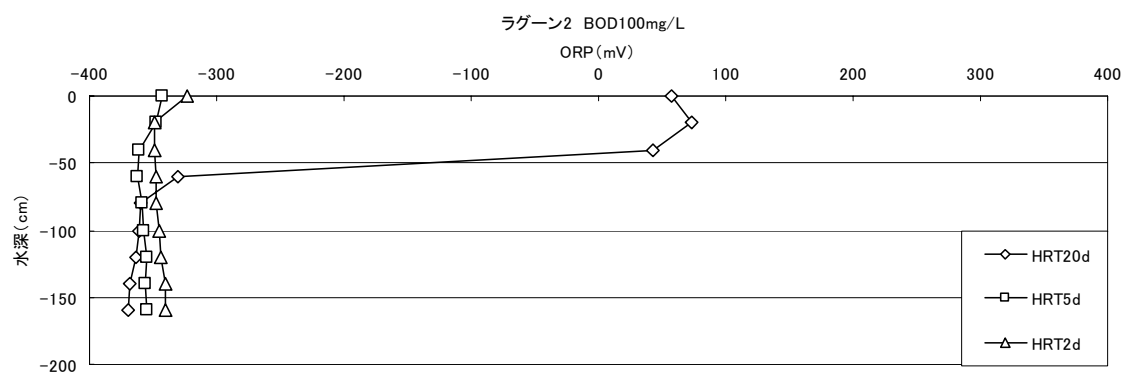
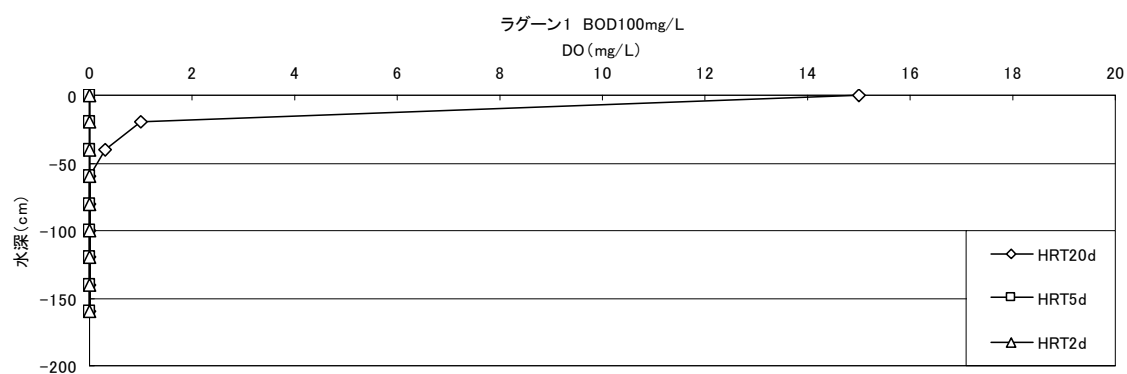
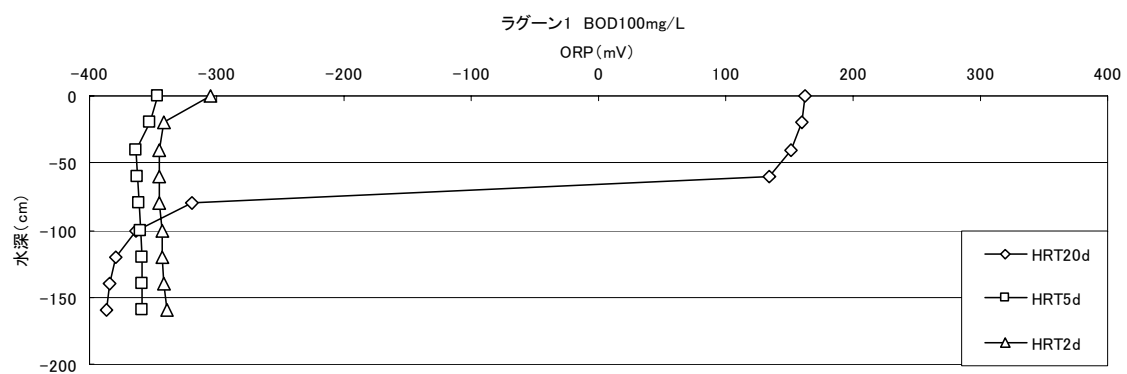
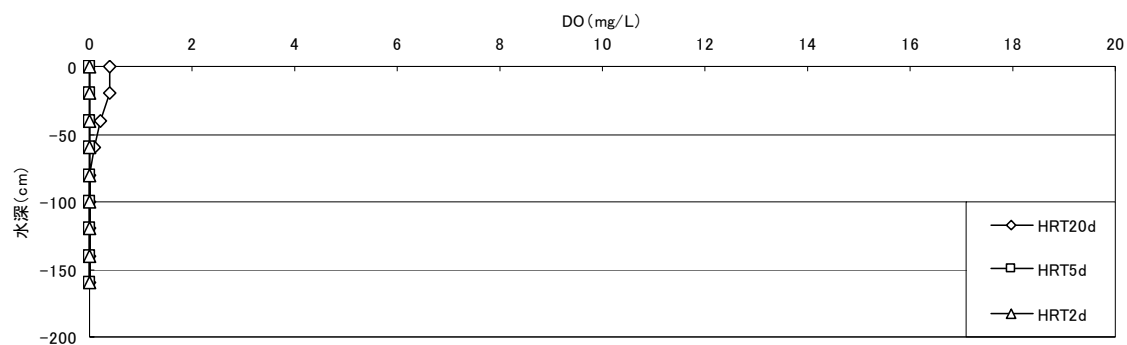
各流入 BOD での ORP を比較すると、流入 BOD 50 mg/L では、今回の実験で一番負荷の小さい HRT 30 d で水深の深いところまで ORP がプラスを示し好气的であることがうかがえる。その他の HRT に関しては、水深が深くなるにつれ ORP がマイナスを示し、嫌気的な状態へ移行していた。それに比べ流入 BOD 200 mg/L では、どの HRT でも水深 50 cm 付近で ORP が極端に低くなる傾向にあった。流入 BOD 100 mg/L は、試験した回数が少ないため判断しにくい、HRT 20 d で比べるとほぼ流入 BOD 50 mg/L と同様、もしくは若干嫌気的な様子がうかがえる。DO に関しても、流入 BOD 50 mg/L では水深の深いところまで DO が存在していたが、流入 BOD 200 mg/L では水深 50 cm でほぼ 0 mg/L を示していた。どの流入負荷条件でも DO が高い値を示していたのは、水深 50 cm 程度までであった。この結果から、特に活発に光合成が行われるのは水深 50 cm 程度までが限界であると考えられる。

流入 BOD 50 mg/L では、水面付近の藻類による活発な光合成により生産された酸素が、水深の深いところに拡散し、それぞれの水深の好気処理の工程で段々に酸素が消費されている、または、負荷が低く槽内の SS が少ないため、水深の深いところまで光が達するが、深くなるにつれ段々に光量が少なくなり、徐々に DO の生産が少なくなることが考えられる。逆に、流入 BOD 200 mg/L では、負荷が高いため、水面付近で生産されたすべての DO がその場でほとんど消費してしまう、もしくは SS が多量に含まれているため、水深の深いところに光が届かないことが、図のような状態を引き起こしていると考えられる。鉛直分布調査に関しては、クロロフィル a 等の詳細な水質分析を行っていないため、これ以上の考察は難しいが、図の状態を確認する限りでは、濃度が最も高い流入 BOD 200 mg/L において最も長い HRT 30 d の運転条件で、流入 BOD 50 mg/L の HRT 5 d と同等程度と確認できる。しかし、ラグーンの処理の状態として、ある程度の水深まで好気処理が行えることが望ましいと考える場合、流入 BOD 200 mg/L の HRT 30 d は水面付近のみしか好気処理が行えない状態であるため、ラグーンの処理としては不完全であると言える。上の条件を踏まえると、結果として流入 BOD 50 mg/L では HRT 10 d 以上が、流入 BOD 100 mg/L では 20 d 以上が適正な処理と考えられる。



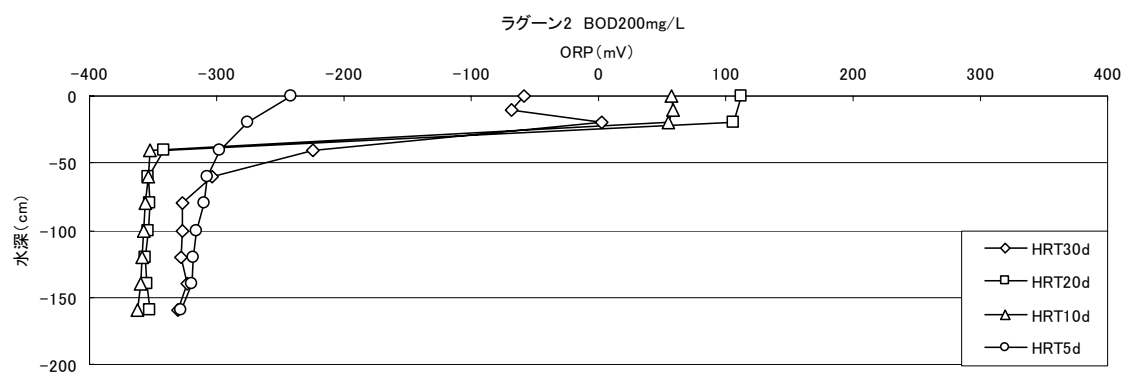
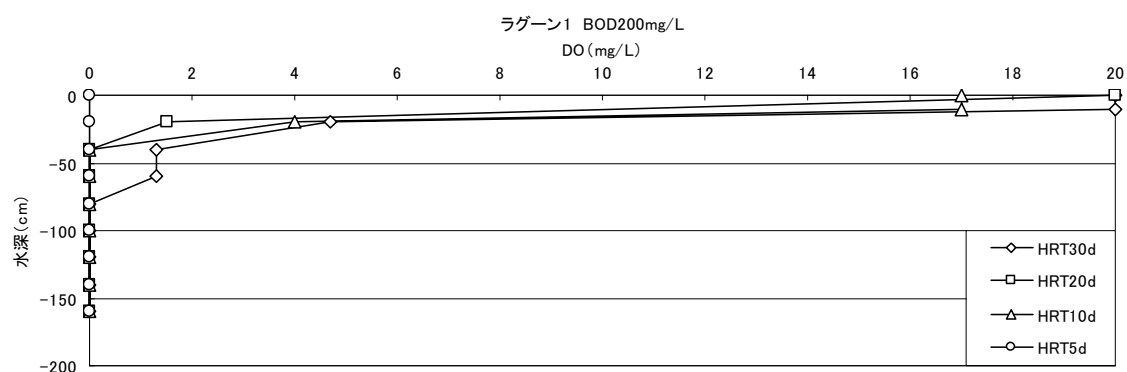
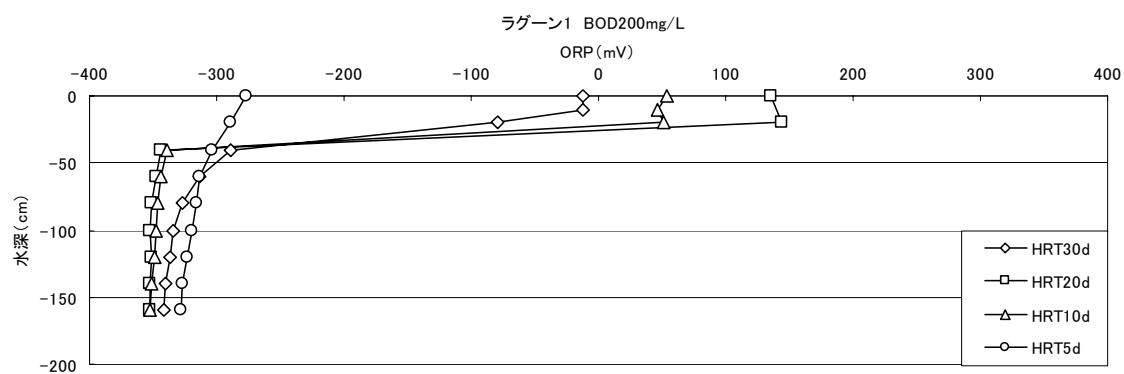
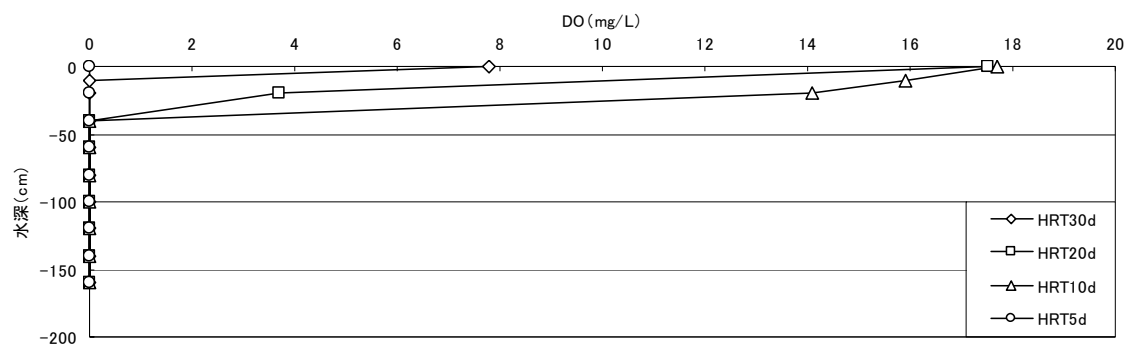
ラグーン2 BOD50mg/L

図-16 流入 BOD 50 mg/L の鉛直分布調査の結果 (DO、ORP)



ラグーン2 BOD100mg/L

図-17 流入 BOD 100 mg/L の鉛直分布調査の結果(DO、ORP)



ラグーン2 BOD200mg/L

図-18 流入 BOD 200 mg/L の鉛直分布調査の結果(DO、ORP)

表-18 に各実験条件毎の単位面積あたりの負荷量（設定条件での計算結果）を示す。それ
ぞれ上が設定値ベースの流入 BOD で計算を行った結果であり、下が実測値ベースの流入
BOD で計算を行った結果である。水深を考慮した処理の場合の限界点は、流入 BOD 50
mg/L で HRT 10 d、流入 BOD 100 mg/L で HRT 20 d であり、流入 BOD 200 mg/L は該
当なしであった。設定流入 BOD で負荷量を計算した結果から、76~77 kg/ha・d が限界点
であることがわかる。流入 BOD 200 mg/L の HRT 30 d は 101~103 kg/ha・d であるため、
設定流入 BOD ベースで考えた場合、水深を考慮した処理の限界点が妥当な値であることが
わかる。しかし、実測値の計算結果では、その状態が逆転していることが確認できる。こ
のことから、流入水の汚濁の濃度が限界点を決める単位面積あたりの負荷量に影響を与え
ていることがわかる。今回の結果では、汚濁濃度が高い場合は限界点の負荷量が低い値を
示し、汚濁濃度が低い場合は限界点の負荷量が高い値を示す結果であった。さらに水深を
考慮した処理の限界点は、大腸菌群数を 1.0×10^4 CFU/mL 程度に抑えることのできる限界
点とほぼ同じであった。大腸菌群数を低くするためには好気処理による捕食、太陽光によ
る殺菌が重要であり、水深を考慮した処理の場合は光量や藻類の状態が重要になる。どち
らも太陽光の影響を強く受けているため、何らかの関係があると考えられるが、今回の調
査ではその詳細は不明である。

今回の調査の結果をまとめ、表-19 に示す。

ラグーンにより汚濁物の処理を行うためには、流入 BOD 50 mg/L では HRT 5 d、流入
BOD 100 mg/L では HRT 10 d、流入 BOD 200 mg/L では HRT 10 d が最低限必要な HRT
であることが明らかとなった。さらに、大腸菌群の除去や水深方向の ORP、DO を考慮す
ると、流入 BOD 50 mg/L では HRT 10 d、流入 BOD 100 mg/L では HRT 20 d、流入 BOD
200 mg/L では HRT 30 d が最低限必要な HRT であると考えられる。なお、アメリカ等さ
まざまな地域の文献を集め、様々な気候での適用事例を取りまとめた文献によると、ラグ
ーン(通性嫌気性安定化池)の基本的な性能としては滞留時間 25~180 d、水深 1.5~2.5 m、
負荷量 22~67 kg/ha・d、処理水 BOD 30~40 mg/L、TSS 40~100 mg/L と示されており
4)、表-19 の「大腸菌群数や水深を考慮した処理が主な場合」とほぼ同程度であった。

低負荷流入水を想定した流入 BOD 50 mg/L の設定において、ラグーンの処理に問題は生
じない結果であった。そのため、現在までに建設された現地のラグーンにおいても、低負
荷流入水による影響なく適切な運転がなされているものと考えられる。通常、ラグーンの
設計は単位面積あたりの負荷量から計算されるため、低負荷になれば「池面積の縮小」も
しくは「受け入れ水量の増加」が可能になる。「池面積の縮小」により土地の有効利用、「受
け入れ水量の増加」により下水道整備エリアの拡大などの、現地の特性に合わせたさまざ
まな利点が生じる可能性がある。ただし、ラグーンの HRT を短くすることで、藻類を維持
できなくなる可能性があることである。今回の調査では、水深 2 m の場合 HRT が 2 d で藻
類を維持できなくなった。また、池の負荷受け入れの余裕が少なくなるため、流入水の変

動の影響を処理水が受けやすくなる可能性があり、それに伴い定期的な点検の頻度を増やす等の維持管理面での留意が必要になる可能性がある。

また、ラグーンが適切な処理を行っているか判断するにあたり、**T-BOD** などのトータルサンプルのみの確認では不十分であり、槽内の **DO** やクロロフィル **a** 値を確認し、藻類の繁殖状態を把握しながら、**D-BOD** などの溶解性サンプルに関しても合わせて確認する必要があると考えられる。

表-18 単位面積当たりの負荷量の結果

単位面積あたりの負荷量 (kg/ha・d)		ラグーン1 設定流入BOD(mg/L)		
		200	100	50
HRT(d)	30	101	50	25
	20	151	76	38
	10	303	151	76
	5	605	303	151
	2	1513	756	378
表面積	64.70 m ²		体積	98 m ³

単位面積あたりの負荷量 (kg/ha・d)		ラグーン1 実測流入BOD(mg/L)		
		163	114	61
HRT(d)	30	82	58	31
	20	123	86	46
	10	246	173	92
	5	492	346	183
	2	1231	864	458
表面積	64.70 m ²		体積	98 m ³

単位面積あたりの負荷量 (kg/ha・d)		ラグーン2 設定流入BOD(mg/L)		
		200	100	50
HRT(d)	30	103	52	26
	20	155	77	39
	10	309	155	77
	5	619	309	155
	2	1547	773	387
表面積	65.61 m ²		体積	101 m ³

単位面積あたりの負荷量 (kg/ha・d)		ラグーン2 実測流入BOD(mg/L)		
		163	114	61
HRT(d)	30	84	59	31
	20	126	88	47
	10	252	177	94
	5	503	354	187
	2	1258	884	468
表面積	65.61 m ²		体積	101 m ³

表-19 ラグーンに関する調査結果の取りまとめ

	流入BOD mg/L	HRT d	負荷量		T-BOD(D-BOD) 実測平均値		
			設定値 kg/ha・d	実測値 kg/ha・d	流入水 mg/L	処理水 mg/L	浄化率 %
汚濁物の物理的な 処理が主の場合	50	5	151~155	183~187	60.5(13.0)	37.3(4.5)	38(65)
	100	10	151~155	173~177	114.3(26.1)	26.0(5.8)	77(78)
	200	10	303~309	246~252	162.7(91.9)	43.3(14.6)	73(84)
大腸菌群数や 水深を考慮した 処理が主の場合	50	10	76~77	92~94	60.5(13.0)	25.7(4.8)	58(63)
	100	20	76~77	86~88	114.3(26.1)	26.2(11.6)	77(56)
	200	30	101~103	82~84	162.7(91.9)	42.9(11.9)	74(87)

※BODの流入水は、表-17の各流入BODのすべてのHRTのBOD値の平均である。

※BODの処理水は、表-17の各流入BOD、HRTのラグーン1,2のBOD値の平均である。

※水深を考慮した処理の場合、流入BOD 200 mg/L、HRT 30 dの設定では、処理が厳しい状態になるため、HRT、負荷量に余裕を持たせる必要がある。

5. 4. 2 ラグーン後段に植生帯を設置した高度処理実験に関する検討結果

図-19 に、実験期間中の流入水と各処理水の水温、T-BOD、D-BOD、クロロフィル a を示す。

実験期間中の水温は、流入水、ブランク系で高く、ヨシを植えた植生帯 1、植生帯 2 で低い値を示した。ヨシの遮光効果により水面まで日光が十分に届かず、水温が低下したと考えられる。遮光の効果による水温の低下は、どの HRT 設定時においてもほぼ同様であった。

クロロフィル a は、実験初期、ブランク系でのみ値が上昇した。これは、ヨシを植えていないブランク系への直射日光により、系内で藻類が増殖したためだと考えられる。しかし、その後すぐにクロロフィル a 値が低下した。これは、池内に糸状の藻が大量に発生し、水面が覆われ、池内が遮光されたことが原因である。なお、糸状の藻は池の底、側面から生えているため、サンプリング時の液体にはほとんど含まれない。一方、ヨシを植えた植生帯 1、植生帯 2 では、実験初期、クロロフィル a 値が低く、遮光、沈降作用によるラグーン処理水中の藻類の低下効果が現れていると考えられる。しかしその後実験を続け、各系列の HRT を次第に短くしていくと、HRT がブランク系で 2 d、植生帯 1 で 1 d、植生帯 2 で 2 d（以下、「ブランク系,植生帯 1,植生帯 2」の順に HRT を表示する。）の設定条件のときに若干値が上昇し、HRT 1 d より短い HRT では流入水とほぼ同じ値を示した。植生帯の実験は、ラグーンの処理水を流入水としているため、ラグーンの設定条件の影響を受ける可能性がある。ここで、HRT 5, 5, 5 d から 11 月 14 日の HRT 0.25, 0.25, 0.25 d までの期間は、ラグーンの流入 BOD を 200 mg/L の高負荷の状態に設定しており、さらに実験の経過に合わせラグーンの HRT も徐々に短くなるように設定した時期にあたる。このため、ラグーンの実験終了後の 12 月 4 日に、ラグーンの流入 BOD を負荷の低い 50 mg/L に設定し、植生帯の HRT を 3 系列ともに 1 d に設定し、半月の養生期間を経て、植生帯の短い HRT を再度検討した。しかし、植生帯の処理水のクロロフィル a 値は、ほぼ流入水と同じ程度であった。

T-BOD については、HRT 5, 5, 5 d 時に処理水の値が上昇し、さらに HRT 2, 1, 2 d 時には、HRT 1 d 設定の植生帯 1 で値が高く、HRT 2 d 設定の植生帯 2 で値が低い結果であった。HRT 1 d よりさらに短い HRT の実験ではすべて、流入水と処理水がほぼ同程度の値であった。D-BOD に関してもほぼ同様の結果であった。これは、HRT を短く設定したことで、植生帯の遮光や沈降作用による藻類濃度の低下の効果が期待できないため、流入水と処理水がほぼ同様の値になったものと考えられる。

図-20 に、各 HRT での処理水が安定した期間のみの T-BOD、クロロフィル a の平均値を示す。表-20 にその他の水質項目も含めて平均値を記載する。HRT 5, 5, 5 d 以上の設定条件では、植生帯処理水は流入水に比べ T-BOD、クロロフィル a とともに低く、植生帯の遮光、沈殿効果が見られた。しかし、HRT 2, 1, 2 d 設定時には、T-BOD、クロロフィル a とともに、HRT 2 d の植生帯 2 で若干上昇、HRT がその半分の設定の植生帯 1 ではさらに高い値を示

し、特に T-BOD に関しては流入水に近い値であった。さらに、それ以降に行った短い HRT 条件では、両項目ともに比較的高い値を示し、T-BOD では流入水に比べ処理水が若干低い値であったが、クロロフィル a は流入水と処理水がほぼ同程度であった。T-BOD とクロロフィル a の傾向の違いに関しては、様々な含有物を含む T-BOD に比べクロロフィル a 値に影響する藻類の方が高い浮遊性を持っているため、T-BOD のうち比較的比重が重いものが先に沈殿し、軽い藻類はほぼすべてが水に押し流され、濃度に差が生じたと考えられる。このため、植生帯の適切な HRT は、押し出し流れの影響を若干受けているものの、クロロフィル a 値が比較的低い値であり、かつ T-BOD の影響も低い、HRT 2 d が藻類流出を抑制するための限界値であると考えられる。

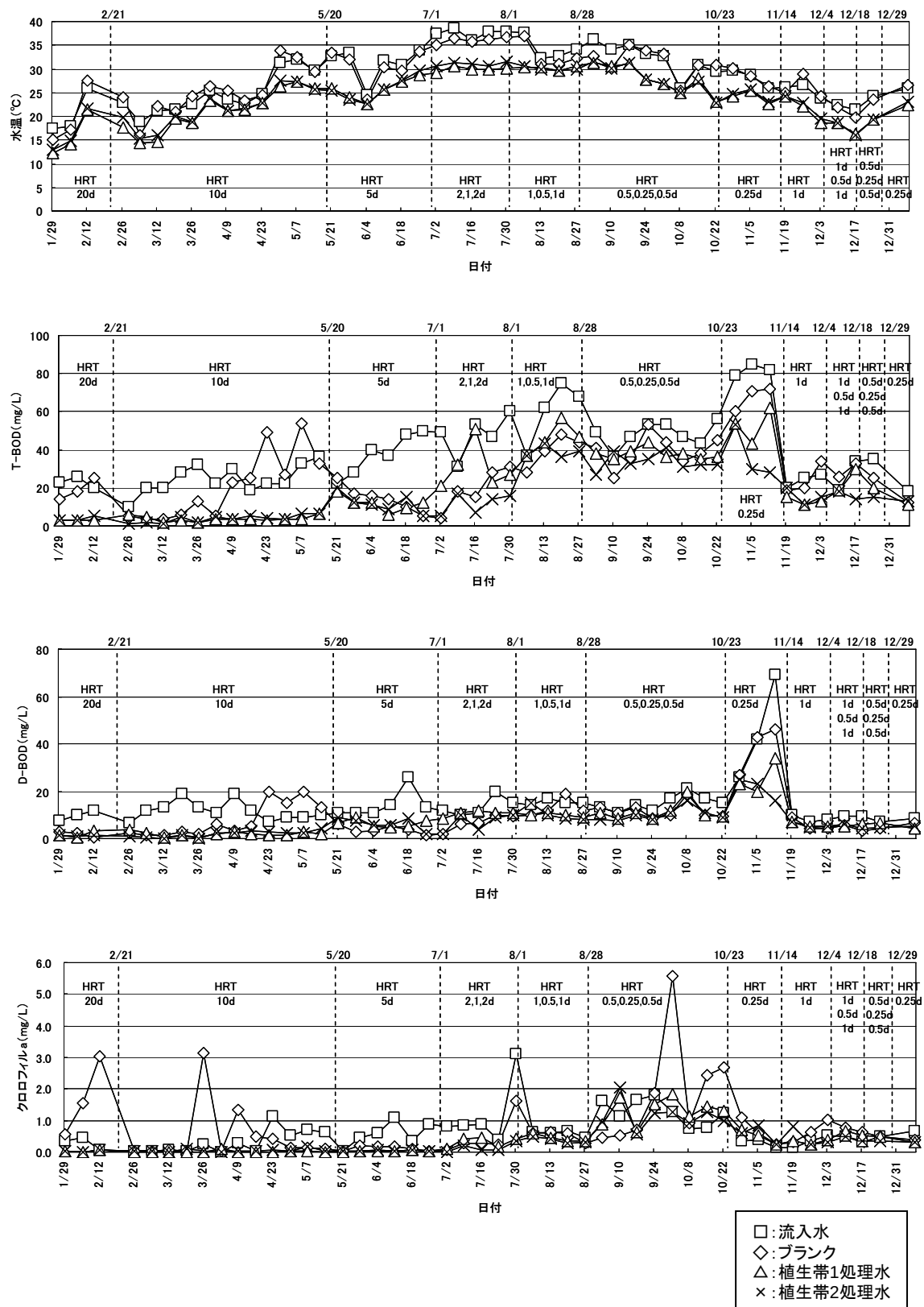


図-19 実験期間中の水温、T-BOD、D-BOD、クロロフィル a の移行

※植生帯のHRTの表示に関して、3系列のHRTがそれぞれ違う場合は「HRT ブランク、植生帯1、植生帯2」と表示する。その他は3系列一緒である。

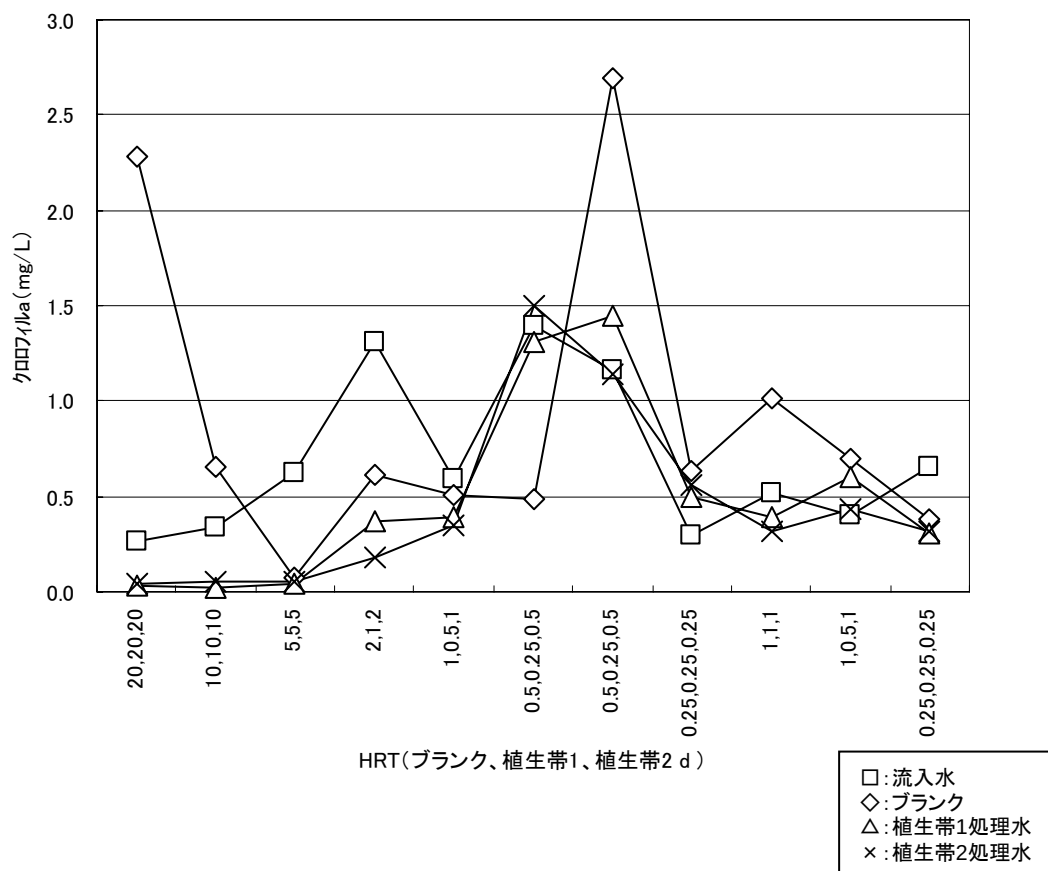
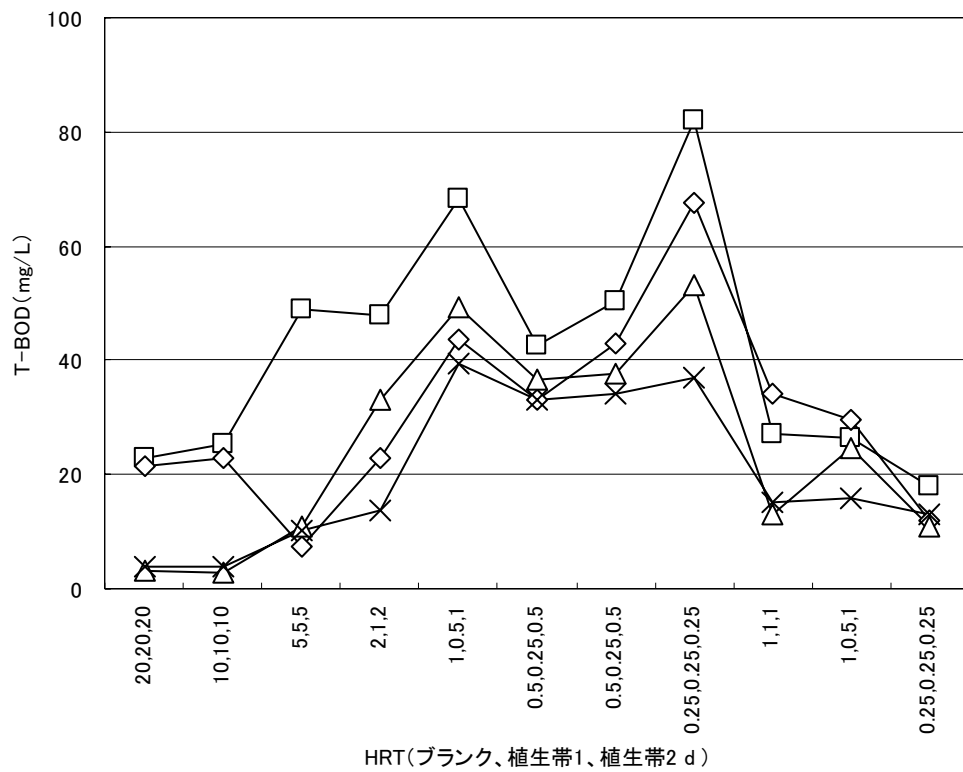


図-20 処理水安定時の平均 T-BOD、クロロフィル a の値

表-20 各設定HRTごとの水質分析の平均値

	20,20,20	10,10,10	5,5,5	2,1,2	HRT(ブランク、植生帯1、植生帯2 d)										1,1,1	1,0,5,1	0,25,0,25,0,25
					20,20,20	10,10,10	5,5,5	2,1,2	1,0,5,1	0,5,0,25,0,5	0,5,0,25,0,5	0,25,0,25,0,25	1,1,1	1,0,5,1			
水温 ℃	流入水	21.9	25.0	32.4	37.6	33.0	35.2	30.4	28.2	23.7	21.9	25.8					
	ブランク	22.3	25.9	31.7	36.3	31.4	31.4	30.8	28.3	24.3	20.9	26.5					
	植生帯1処理水	17.9	21.7	28.0	30.2	30.2	31.0	26.1	24.2	18.5	17.4	22.3					
	植生帯2処理水	18.2	22.1	28.6	31.2	29.8	30.9	25.9	24.5	19.6	17.3	23.0					
SS mg/L	流入水	35.0	25.9	35.0	100.3	61.0	102.0	99.0	51.7	45.0	35.5	32.0					
	ブランク	108.0	39.7	7.5	38.3	41.3	49.0	147.4	74.3	49.0	42.5	23.0					
	植生帯1処理水	4.0	4.9	10.5	36.3	44.3	78.0	100.2	50.7	20.0	31.5	14.0					
	植生帯2処理水	7.5	7.9	7.0	19.8	43.3	95.5	85.6	48.7	15.0	24.0	17.0					
T-BOD mg/L	流入水	23.0	25.3	49.0	47.8	68.3	42.5	50.4	82.0	27.0	26.5	18.0					
	ブランク	21.5	22.8	7.6	23.0	43.7	33.0	42.8	67.7	34.0	29.5	12.0					
	植生帯1処理水	3.1	3.0	10.8	33.3	49.3	36.5	37.8	53.0	13.0	24.5	11.0					
	植生帯2処理水	4.0	3.9	10.3	13.6	39.3	33.0	34.2	37.0	15.0	16.0	13.0					
D-BOD mg/L	流入水	11.0	12.5	19.5	13.9	15.7	12.0	16.4	45.7	8.0	9.2	8.3					
	ブランク	1.5	8.3	2.5	8.0	14.3	12.0	11.4	38.7	4.2	4.7	6.4					
	植生帯1処理水	2.0	1.6	6.3	11.3	10.0	9.8	12.0	25.7	5.0	5.6	4.4					
	植生帯2処理水	1.3	1.9	5.0	8.2	8.7	7.7	11.0	21.3	5.2	5.2	5.3					
T-CODmn mg/L	流入水	37	35	53	77	67	71	67	54	36	34	34					
	ブランク	72	50	21	49	57	52	86	73	38	36	30					
	植生帯1処理水	16	20	34	52	54	64	67	56	25	29	27					
	植生帯2処理水	16	22	30	39	50	69	58	54	21	27	26					
D-CODmn mg/L	流入水	21	23	31	31	27	24	21	26	14	17	17					
	ブランク	19	30	14	27	28	24	20	25	15	15	17					
	植生帯1処理水	15	19	29	29	23	21	20	22	14	14	17					
	植生帯2処理水	14	19	25	30	23	21	19	22	14	14	17					
大腸菌群数 個/ml(CFU/ml) 平板培養法	流入水	6,850	13,156	31,950	18,000	79,333	29,000	91,200	99,667	78,000	120,500	31,000					
	ブランク	169	2,566	345	3,460	15,233	19,050	93,400	82,667	4,200	15,500	13,000					
	植生帯1処理水	129	1,219	1,750	3,650	27,467	13,850	48,000	64,000	5,000	33,700	4,800					
	植生帯2処理水	183	1,160	2,750	1,933	29,467	16,250	40,800	54,333	1,500	8,300	4,000					
クロロフィルa mg/L	流入水	0.27	0.34	0.63	1.31	0.59	1.39	1.16	0.29	0.52	0.41	0.66					
	ブランク	2.29	0.65	0.08	0.61	0.50	0.49	2.70	0.64	1.01	0.70	0.38					
	植生帯1処理水	0.04	0.02	0.05	0.37	0.39	1.31	1.45	0.50	0.39	0.60	0.31					
	植生帯2処理水	0.05	0.05	0.05	0.18	0.35	1.50	1.14	0.56	0.32	0.43	0.32					
ラグーン 設定条件	流入BOD (mg/L)	100	100	200	200	200	200	200	200	200	50	50					
	HRT (d)	30	20	30	30	20	20	20	10	5	5	5					
データ期間		2003.2.5 ～2003.2.12	2003.3.12 ～2003.5.7	2003.6.18 ～2003.6.25	2003.7.9 ～2003.7.30	2003.8.13 ～2003.8.27	2003.9.3 ～2003.9.10	2003.9.24 ～2003.10.22	2003.10.29 ～2003.11.12	2003.12.3	2003.12.10 ～2003.12.17	2004.1.7					

※基本的なデータ整理法としては、設定変更後、それぞれの設定HRT分の日数が経過した後にすぐに行った水質分析日から、次の設定変更直前の水質分析日までを平均したものである。
 ※ラグーン設定条件の流入BOD200→50mg/Lの変更の次のデータは、流入水が急激に変化するため、全体的なデータの確認後、影響のないと思われる最終日のデータのみ採用した。

5. 5 まとめ

低負荷条件での適切な維持管理に関する検討を行うため、ラグーン実験施設において 3 段階の流入 BOD における適切な HRT を選定する実験を行った。その結果、ラグーンにより汚濁物の処理を行うためには、流入 BOD 50 mg/L では HRT 5 d、流入 BOD 100 mg/L では HRT 10 d、流入 BOD 200 mg/L では HRT 10 d が最低限必要な HRT であることが明らかとなった。さらに、大腸菌群の除去や水深方向の ORP、DO を考慮すると、流入 BOD 50 mg/L では HRT 10 d、流入 BOD 100 mg/L では HRT 20 d、流入 BOD 200 mg/L では HRT 30 d が最低限必要な HRT であると考えられる。また、ラグーンが適切な処理を行っているか判断するにあたり、T-BOD などのトータルサンプルのみの確認では不十分であり、槽内の DO やクロロフィル a 値を確認し、藻類の繁殖状態を把握しながら、D-BOD などの溶解性サンプルに関しても合わせて確認する必要がある。

また、ラグーンからの藻類の流出の問題を検討するため、ラグーン後段に植生帯を設置しさらなる処理水の高度化に関して実験を行った。その結果、ラグーンから流出する藻類を削減するためには、植生帯において HRT の設定条件を 2 d 以上にする必要がある。

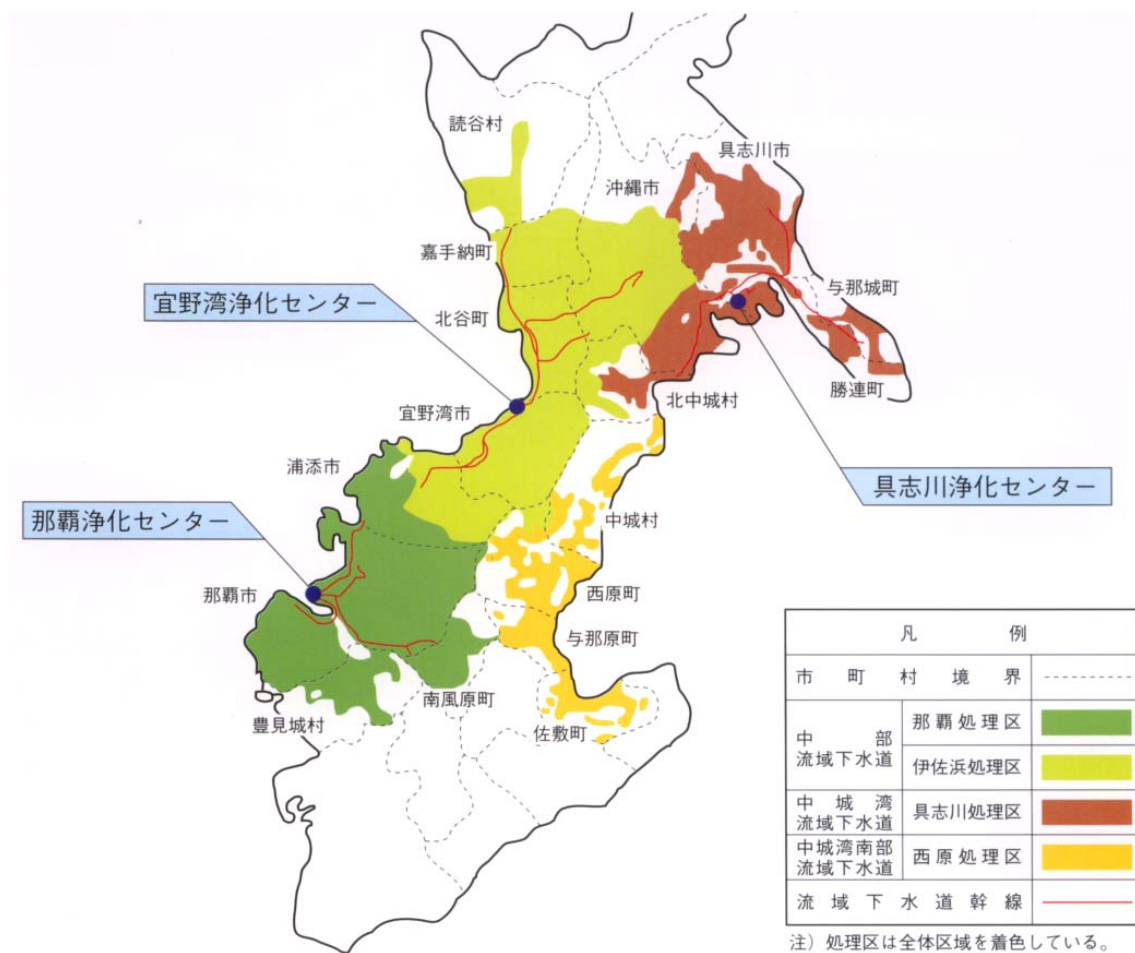


図-9 沖縄県流域下水道処理区域平面図

※ 沖縄県下水道管理事務所「みんなの下水道」パンフレットより引用

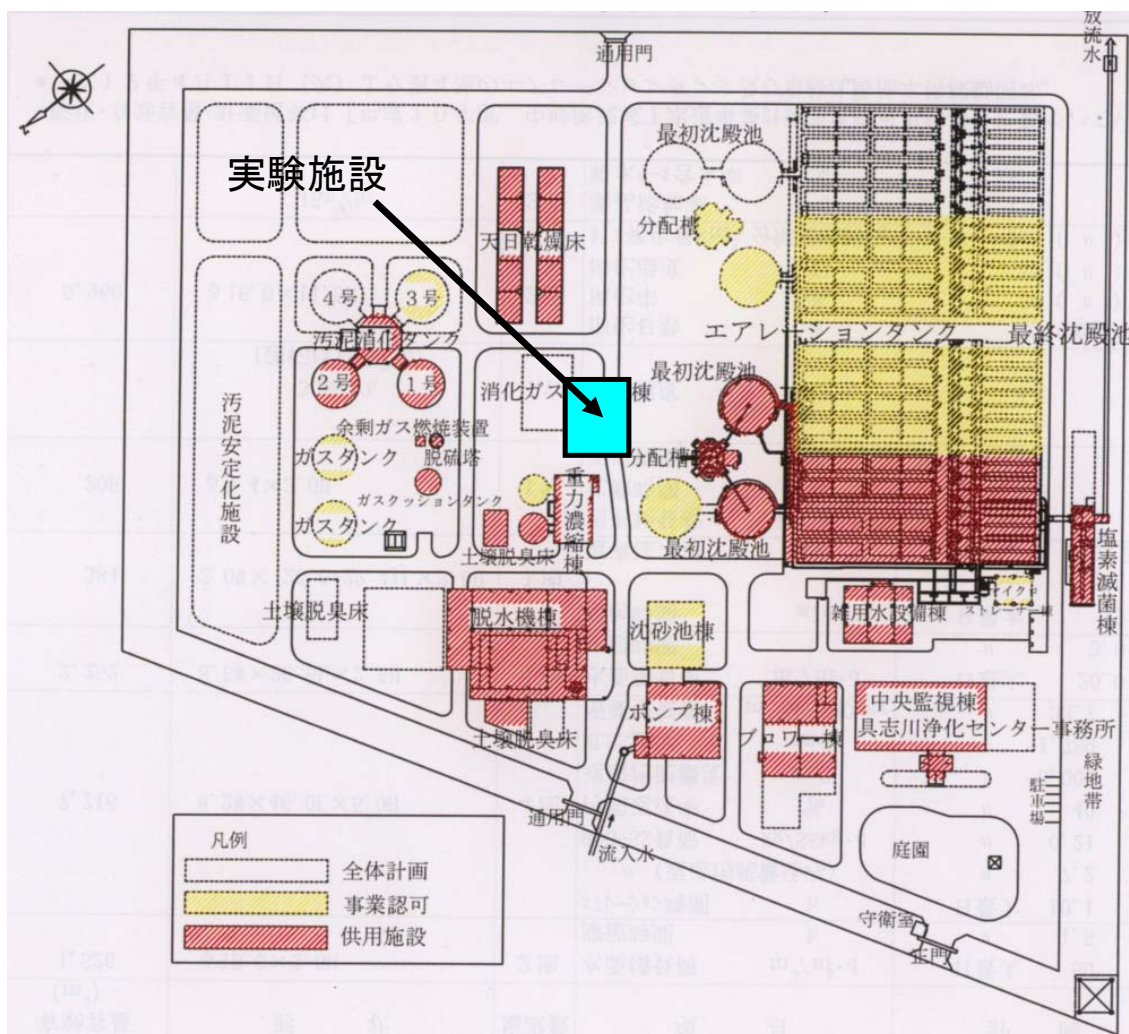


図-10 具志川浄化センター平面図

※ 沖縄県下水道管理事務所「維持管理年報 平成 13 年」より引用



写真-25 具志川浄化センター



写真-26 浄化センター曝気槽



写真-27 浄化センター最終沈殿池



写真-28 ラグーン実験施設全体



写真-29 流入下水混合槽



写真-30 ラグーン 1



写真-31 ラグーン 2



写真-32 ラグーン清掃



写真-33 植生帯流入タンク



写真-34 植生帯全体



写真-35 植生帯



写真-36 ヨシ植付け前