

令和5年度「基地周辺環境対策推進事業」
有機フッ素化合物汚染源調査に係る専門家会議

報 告 書

令和6年3月

沖 縄 県

< 目 次 >

1. はじめに.....	1
1.1 専門家会議の趣旨及び目的.....	1
1.2 専門家会議の設置.....	1
1.3 検討の経緯.....	1
2. 汚染源の特定に関する検討事項.....	2
2.1 検討事項.....	2
2.2 汚染源の推定及び絞込み（これまでの検討内容）.....	2
2.3 令和5年度の検討事項.....	3
3. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要.....	4
3.1 調査ボーリングの概要.....	4
3.2 試験・分析結果の概要.....	5
4. 汚染源特定に関する検討結果.....	8
4.1 PFOS等の検出状況.....	8
4.2 地下水流向の推定.....	15
4.3 PFOS等の長期検出の要因.....	16
5. 汚染源特定に向けた今後の課題.....	17
5.1 汚染源の特定に向けた条件.....	17
5.2 令和6年度の調査方針.....	18

巻末資料

- 資料1 委員名簿
- 資料2 専門家会議設置要綱
- 資料3 議事概要

* 令和6年6月26日に一部修正を行いました。

該当箇所	誤	正
9ページ 10ページ	伊佐ウフガー 【PFOS+PFOA】 350 ng/L(6m) 2023/10/10 採水 350 ng/L	伊佐ウフガー 【PFOS+PFOA】 200 ng/L(6m) 2023/10/10 採水 200 ng/L

1. はじめに

1.1 専門家会議の趣旨及び目的

有機フッ素化合物である PFOS 及び PFOA については、全国の公共用水域や地下水での検出状況等から令和2年5月に環境省が水質の要監視項目に位置づけ、暫定指針値として PFOS と PFOA の合計で 50ng/L が設定されている。

沖縄県は、平成 28 年度から水道水源を除く県内の河川や湧水等で有機フッ素化合物の残留実態調査を行っており、これまでの調査において普天間飛行場北西側の湧水等から、暫定指針値を超過する高濃度の有機フッ素化合物が継続して検出されている。

普天間飛行場周辺については、これらの検出状況に加えて普天間飛行場の返還が予定されていることから、早期に汚染源の特定を図り、原因者へ対策等を求め、円滑な跡地利用に繋げていくことが重要である。そのため、沖縄県は令和3年度に同飛行場周辺における有機フッ素化合物の汚染源の特定を目的とした専門家会議を設置し、検討を行った。

令和4年度及び令和5年度は、令和3年度の専門家会議での検討内容等も踏まえて、基地周辺環境対策推進事業（以下「本事業」という。）において、引き続き専門家会議委員による検討を行うとともに、普天間飛行場周辺の地下水流向の把握に係る調査等を実施している。

令和5年度「基地周辺環境対策推進事業」有機フッ素化合物汚染源調査に係る専門家会議（以下「専門家会議」という。）における検討内容について、本報告書により報告する。

1.2 専門家会議の設置

環境水理学、地下水工学、環境化学、応用地質学等の分野について、知見を有する学識経験者で構成する専門家会議を設置した。

専門家会議の委員名簿を資料1に、設置要綱を資料2に収めた。

1.3 検討の経緯

専門家会議における検討の経緯を表1.1に示し、会議の議事概要は資料3に収めた。

表 1.1 専門家会議における検討の経緯

開催日	議事内容
第1回 令和5年7月18日（火）	(1) PFOS 等 [*] の定期モニタリング結果 (2) 汚染源検討の経緯 (3) 汚染源特定に向けた方針 (4) 令和5年度の調査及び解析の実施計画 (5) その他（国内外の有機フッ素化合物汚染に関する動向など）
第2回 令和5年11月2日（木）	(1) PFOS 等の定期モニタリング結果 (2) 令和5年度の調査ボーリング及び分析結果の概要 (3) 汚染源特定に向けた今後の課題 (4) その他（国内外の有機フッ素化合物汚染に関する動向など）
第3回 令和6年2月5日（月）	(1) PFOS 等の定期モニタリング結果 (2) 令和5年度の調査ボーリング及び分析結果の概要 (3) 汚染源特定に向けた課題と令和5年度の検討結果 (4) 汚染源特定に向けた今後の課題 (5) その他（今後の予定、有機フッ素化合物汚染に関する動向など）

※ 本報告書では「有機フッ素化合物」のうち普天間飛行場周辺で継続的に調査を実施している PFOS、PFOA、PFHxS、6:2FTS の4物質を「PFOS 等」と称している。

2. 汚染源の特定に関する検討事項

2.1 検討事項

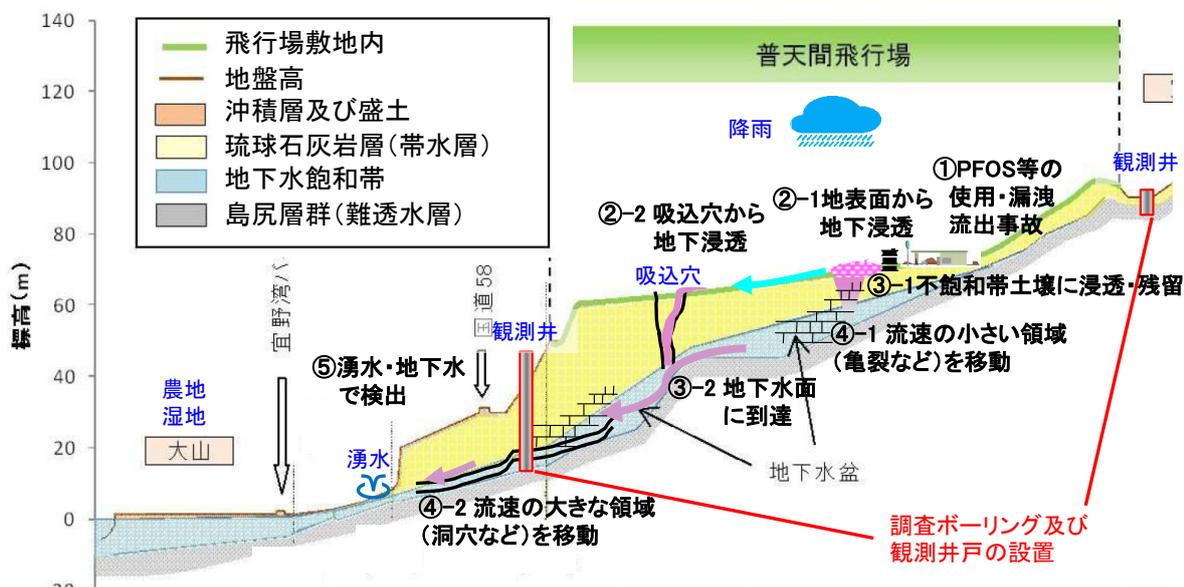
専門家会議では、前項に示した趣旨及び目的を達成するため、次の事項について検討した。

- ① 普天間飛行場周辺でのボーリング調査や地下水調査等の結果、文献等情報の収集整理の結果に基づく、有機フッ素化合物の汚染状況の整理および評価に関すること
- ② 普天間飛行場周辺における有機フッ素化合物の汚染源の特定に向けた課題や対応に関すること

2.2 汚染源の推定及び絞込み（これまでの検討内容）

令和3年度に県が設置した専門家会議では、普天間飛行場周辺における PFOS 等の汚染源の推定及び絞込みについて検討し、同飛行場内での PFOS 等の漏洩や流出等による汚染が発生した場合の移動経路について想定した。

これらの検討結果を踏まえ、令和4年度の専門家会議では図2.1に示すとおり、地下水が普天間飛行場を横断して流下すると想定される方向に沿って調査ボーリング及び観測井戸の設置を行い、地質状況や地下水位及び水質に関するデータの収集に努めた。また、汚染源の特定に必要なと考えられる条件及び今後把握すべき課題等については、表2.1に示すとおり整理した。



出典) 宜野湾市：宜野湾市自然環境保全に関する基本方向(平成24年3月)の一部に加筆して作成

図2.1 PFOS等の移動経路と調査ボーリング及び観測井戸の設置位置

表 2.1 汚染源の特定に向けた条件

把握する項目		令和4年度までに把握した内容	今後把握すべきデータ等
①	PFOS等の使用・保管・漏洩の履歴が有る。	普天間飛行場内で使用等の履歴あり。(令和3年度の専門家会議で検討)	既知の情報については把握済みであるが、今後新たな情報が得られれば追加検討する。
②	飛行場の地下水上流・下流側でPFOS及びPFOA濃度に有意な差が有る。	上流側は暫定指針値50ng/L以下、下流側は50ng/L超過の濃度を示す。(地下水下流側の新たに設置した観測井戸において、1,000ng/Lを超過する地点有り)	調査密度が少ないエリアで地下水の水質調査を実施し、PFOS等濃度を把握する。【課題1-2】
③	南東⇒北西方向以外の地下水の流れが無い。	観測井戸の地下水位データに基づく地下水位等高線から、地下水流向は南東⇒北西方向と推定。 調査ボーリング地点での島尻泥岩上面標高と琉球石灰岩の透水係数(10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵ m/sオーダー)を把握。	調査密度が少ないエリアで地盤や地下水の水位調査を実施し、水位データの把握と島尻泥岩上面形状の精査を行う。【課題1-2】 地盤モデルの作成とシミュレーションによる地下水流向・流速の検証に努める。【課題2】
④	飛行場と観測地点との間に高濃度なPFOS等の地下浸透が生じる土地利用が無い。	普天間飛行場とR4-3孔の間は、主に住宅地であり、PFOS等の使用や埋設の履歴は確認されない。	既知の情報については把握済みであるが、今後新たな情報が得られれば追加検討する。

2.3 令和5年度の検討事項

汚染源の特定に向けた条件とした事項やこれまでの水質モニタリング結果を踏まえ、令和5年度の専門家会議では以下の3つの課題を中心に整理し、検討を行った。

【課題1-1】 モニタリング結果とPFOS等使用箇所との関連付け

【課題1-2】 地盤・地下水の調査範囲の拡大

【課題2】 シミュレーションを活用した地下水流動の検証

3. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要

3.1 調査ボーリングの概要

既往の文献資料等により普天間飛行場内は大きく3つの地下水流域（C流域～E流域）に区別されると推定していることを踏まえ、同飛行場周辺の地質や地下水の状況を把握するため、令和5年度は図3.1のエリア概略図に示すとおり、C流域内の下流側と側部付近に2地点、E流域内の上流側と下流側付近に2地点の計4地点（R5-1～R5-4孔）において調査ボーリング及び観測井戸の設置を行った。

表3.1に調査ボーリングで確認された地質や地下水の概要を示す。

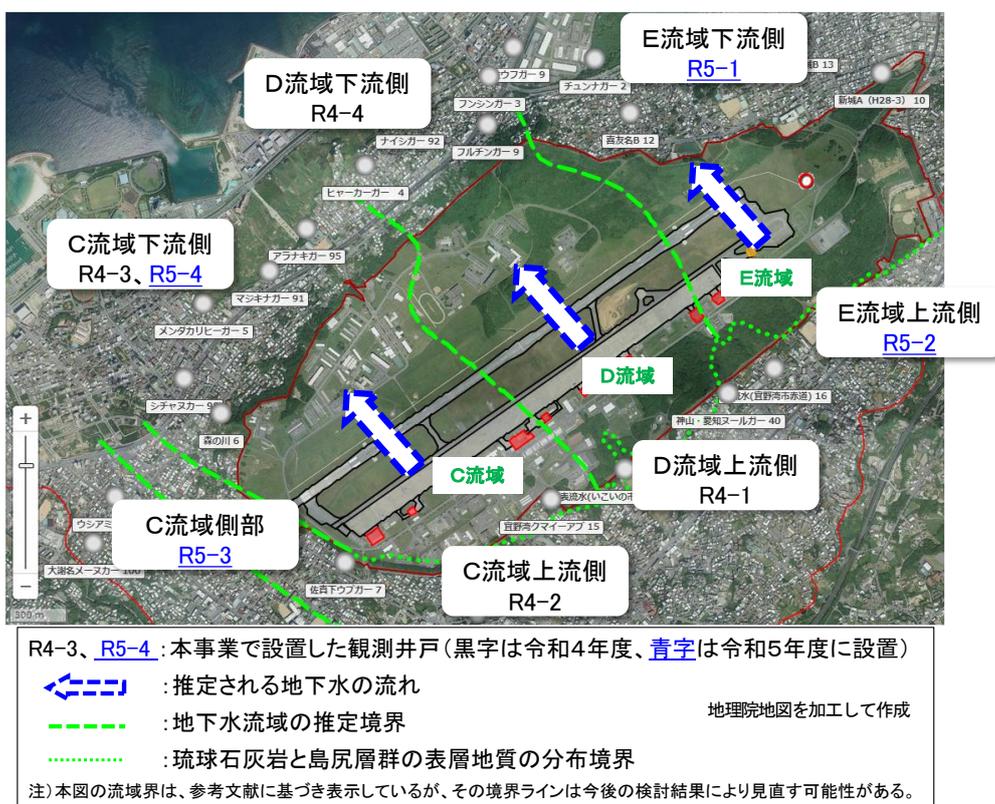


図3.1 調査ボーリング及び観測井戸設置のエリア概略図

表3.1 調査ボーリングで確認された地質や地下水の概要

地 点		地質や地下水の概要	
R5-1	E流域 下流側	地 質	島尻泥岩層上位に層厚16m程度の石灰岩（塊状～岩屑状）が分布
		地下水	島尻泥岩層上面まで水深2.5m程度で石灰岩層下部（塊状）に分布
R5-2	E流域 上流側	地 質	島尻泥岩層上位に石灰岩は確認されず、盛土・埋土が堆積
		地下水	島尻泥岩層上面まで水深1.5m程度で埋土層内に分布
R5-3	C流域 側部	地 質	島尻泥岩層上位に層厚1.8m程度の石灰岩（塊状）が分布
		地下水	令和5年12月時点では未確認
R5-4	C流域 下流側	地 質	島尻泥岩層上位に層厚9m程度の石灰岩（塊状～岩屑状）が分布
		地下水	島尻泥岩層上面まで水深5.7m程度で石灰岩層下部（岩屑状～塊状）に分布

3.2 試験・分析結果の概要

R5-1～R5-4 のボーリング孔で採取したボーリングコアを用いて、琉球石灰岩等を対象とした PFOS 等の分析を実施した。また、石灰岩の透水性を確認するため、下流側の R5-1 孔と R5-4 孔の観測井戸で現場透水試験を実施して透水係数を把握した。

(1) 地下水位以深の石灰岩等における PFOS 等の濃度

地下水位以深の石灰岩から PFOS 等が検出された (表 3.2 参照)。

R5-1 孔の石灰岩からは PFOS 等 4 物質が検出され、地下水の濃度構成比と同じであった。R5-2 孔の埋土からは PFOS、PFOA、PFHxS が検出され、R5-3 孔と R5-4 孔の石灰岩からは PFOA が検出されたが、それぞれの地下水の濃度構成比 (R5-3 孔は地下水なし) とは異なっていた (図 3.2 参照)。

表 3.2 石灰岩等における PFOS 等の分析結果

分析項目	単位	R5-1						R5-2					
		塊状石灰岩 試料深度: 21.30~21.40m			岩屑状石灰岩 試料深度: 22.50~22.60m			埋土上部 試料深度: 1.45~1.55m			埋土下部 試料深度: 2.70~2.80m		
		合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐
PFOS	ng/g	0.24	0.16	0.08	0.88	0.58	0.30	0.42	0.31	0.11	0.35	0.28	0.07
PFOA	ng/g	0.05	0.03	<0.02	0.09	0.07	<0.02	0.08	0.06	<0.02	0.07	0.05	<0.02
PFHxS	ng/g	0.09	0.07	<0.02	0.22	0.19	0.03	0.04	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
6:2FTS	ng/g	0.02			0.06			<0.02			<0.02		
4物質合計	ng/g	0.40			1.3			0.54			0.46		
有機物含有量	%	0.8			2.0			10.9			12.8		

分析項目	単位	R5-3						R5-4					
		塊状石灰岩 試料深度: 5.19~5.30m			岩屑状石灰岩 試料深度: 5.00~5.15m			塊状石灰岩 試料深度: 12.82~13.00m			岩屑状石灰岩 試料深度: 13.65~13.75m		
		合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐
PFOS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PFOA	ng/g	0.08	0.06	<0.02	0.07	0.05	<0.02	0.05	0.03	<0.02	0.05	0.03	<0.02
PFHxS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
6:2FTS	ng/g	<0.02			<0.02			<0.02			<0.02		
4物質合計	ng/g	0.08			0.07			0.05			0.05		
有機物含有量	%	4.4			3.6			1.7			3.3		

定量下限値 0.02ng/g

PFOS等を検出

注) 令和4年度のPFOS等の分析は石灰岩試料に風乾・破碎・篩別等の処理を行い、「要調査項目等調査マニュアル(水質、底質、水生生物)平成20年3月環境省水・大気環境局水環境課」の底質の分析方法に準拠(定量下限値 0.5ng/g)したが、令和5年度の分析では「土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSの暫定測定方法について(令和5年7月31日 環境省・大気環境局環境管理課事務連絡)」が通知されたため、同通知の「参考」土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法で定量した。

注) 有機物含有量は強熱減量550℃・4時間による測定結果を示す。

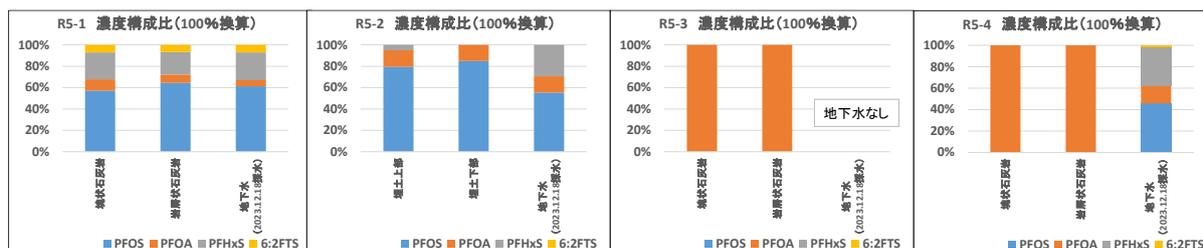


図 3.2 石灰岩等と地下水の PFOS 等の濃度構成比

(2) ボーリングコア分析によるPFOS等の深度分布

R5-1 孔において、地下水位以浅の粘土層及び石灰岩からPFOS等4物質が検出された(表3.3参照)。

地下水位以浅の「GL-6.4~6.5m」から「GL-19.4~19.5m」までは、深くなるに従いPFOS等濃度は低下しているが、地下水位以深の「GL-21.3~21.4m」及び「GL-22.5~22.6m」では濃度が上昇していた(図3.3参照)。

また、「GL-21.3~21.4m」と「GL-22.5~22.6m」の濃度構成比は同じであるが、地下水位以浅と比べると濃度構成比が異なるため、地下水位以深の石灰岩が上流側から流れ込むPFOS等を含む地下水に浸ることにより、当該の石灰岩の間隙等にPFOS等が残留していた可能性が考えられる。

なお、R5-2~R5-4 孔において地下水位以浅での分析は実施していないが、地下水以深での分析結果の限り、深度や塊状と岩屑状の違いによる有意な濃度の差異は認められない。

表 3.3 R5-1 孔における石灰岩等のPFOS等の分析結果

採取深度 (GL- m)	種類	PFOS			PFOA			PFHxS			6:2FTS	4物質 合計	有機物 含有量
		合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐			
		ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g			
6.40~6.50	粘土	0.58	0.49	0.09	0.08	0.06	<0.02	0.16	0.14	<0.02	0.03	0.85	9.6
7.40~7.50	岩屑状 石灰岩	0.52	0.45	0.07	0.10	0.08	<0.02	0.08	0.06	<0.02	0.15	0.85	5.6
9.40~9.50	岩屑状 石灰岩	0.66	0.47	0.19	0.08	0.06	<0.02	0.06	0.04	<0.02	<0.02	0.80	1.8
11.85~11.95	岩屑状 石灰岩	0.49	0.38	0.11	0.05	0.03	<0.02	0.13	0.11	<0.02	0.08	0.75	2.5
14.40~14.50	塊状 石灰岩	0.22	0.18	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	0.06	0.04	<0.02	<0.02	0.32	0.5
16.40~16.50	岩屑状 石灰岩	0.10	0.08	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.10	0.08	<0.02	<0.02	0.20	3.7
17.40~17.50	岩屑状 石灰岩	0.12	0.10	0.02	0.04	0.02	<0.02	0.10	0.08	<0.02	0.03	0.29	4.7
18.40~18.50	岩屑状 石灰岩	0.12	0.09	0.03	<0.02	<0.02	<0.02	0.06	0.04	<0.02	0.03	0.21	1.3
19.40~19.50	塊状 石灰岩	0.12	0.09	0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.12	1.2
21.30~21.40	塊状 石灰岩	0.24	0.16	0.08	0.05	0.03	0.02	0.09	0.07	0.02	0.02	0.40	0.8
22.50~22.60	岩屑状 石灰岩	0.88	0.58	0.30	0.09	0.07	0.02	0.22	0.19	0.03	0.06	1.3	2.0

定量下限値 0.02ng/g PFOS等を検出

注) 令和4年度のPFOS等の分析は石灰岩試料に風乾・破碎・篩別等の処理を行い、「要調査項目等調査マニュアル(水質、底質、水生生物)平成20年3月環境省水・大気環境局水環境課」の底質の分析方法に準拠(定量下限値 0.5ng/g)したが、令和5年度の分析では「土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSの暫定測定方法について(令和5年7月31日 環境省水・大気環境局環境管理課事務連絡)」が通知されたため、同通知の<参考>土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法で定量した。

注) 有機物含有量は強熱減量550℃・4時間による測定結果を示す。

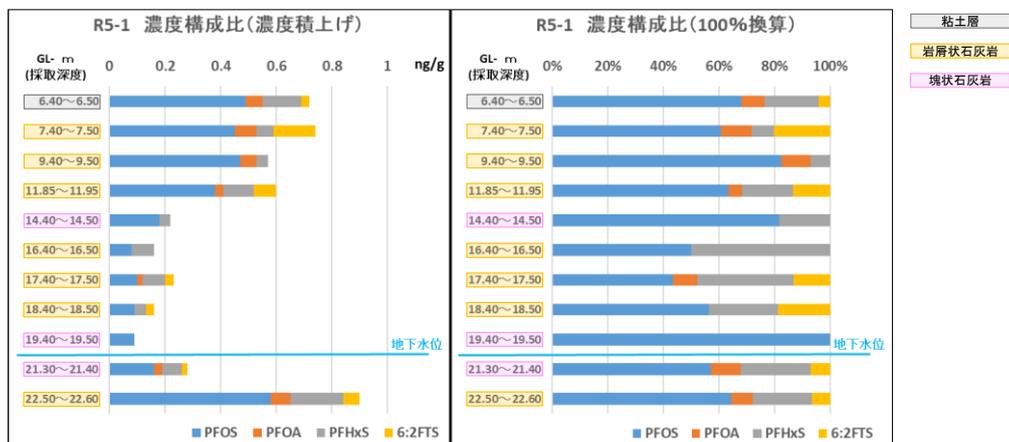


図 3.3 R5-1 孔における石灰岩試料のPFOS等の濃度構成比

(3) 石灰岩における透水係数

令和4～5年度に行った現場透水試験から得られた透水係数は「 $1.7 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 」であり、既往の文献資料等で提示されている透水係数($10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/s}$)と近い結果となり、琉球石灰岩の比較的妥当な透水係数と考えられる(表3.5参照)。

表 3.5 琉球石灰岩の透水係数

対 象	透水係数 (m/s)				方 法	
	観測井戸					4 地点で得られた 透水係数の範囲
	R4-3	R4-4	R5-1	R5-4		
岩屑状～塊状 の石灰岩	1.7×10^{-6}	2.2×10^{-5}	4.4×10^{-4}	4.8×10^{-4}	$1.7 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-4}$	現場透水試験※
既往文献の 琉球石灰岩	$10^{-5} \sim 10^{-3}$ オーダー				現場透水試験、 揚水試験など	

※ 観測井戸での揚水による試験（非正常法による結果）

4. 汚染源特定に関する検討結果

4.1 PFOS 等の検出状況

沖縄県が実施した平成 28 年度から令和 5 年度までの「有機フッ素化合物環境中残留実態調査」及び「令和 5 年度有機フッ素化合物汚染源調査委託業務」で実施した調査結果を図 4.1～図 4.6 に示す。

なお、図 4.1～図 4.2 は PFOS 等の濃度分布と宜野湾市「平成 16 年度宜野湾市自然環境調査」に示される地下水流域区分を重ね合わせて作成した。

(1) PFOS 等の濃度分布

普天間飛行場内を経由した地下水下流側では、PFOS 等 4 物質合計で 1,000ng/L を超える濃度が検出される地点は、C 流域と E 流域に分布している (図 4.1 参照)。また、一部の地点を除き地下水下流側では、PFOS 及び PFOA の暫定指針値である 50ng/L を超過する地点が確認されている (図 4.2 参照)。

特に E 流域下流側の R5-1 孔では 4 物質合計で 6,300ng/L の PFOS 等が確認され (図 4.1 参照)、R5-1 孔のさらに下流側に位置するチュンナガーとヒージャーガー (西普天間住宅地区跡地内の湧水) では 1,200ng/L の PFOS 等が確認されている (図 4.3～図 4.4 参照)。

(2) PFOS 等の経時変化と積算降水量 (湧水地点)

令和 4 年度までの傾向と同様に、6:2FTS は 1 桁を超える濃度変動を示し、PFOS、PFOA、PFHxS は 6:2FTS と比べると濃度変動が小さく、概ね一定の濃度で推移している (図 4.5 参照)。

また、一部の湧水における PFOS 等濃度の変動は、採水前 50～90 日間の積算降水量に相関する傾向が認められた。C 流域下流側のシチャヌカーは積算降水量と負の相関があり、降雨の影響で PFOS 等濃度が低下する。一方、D 流域下流側のヒヤカーガーや E 流域下流側のチュンナガーは積算降水量と正の相関があり、降雨の影響で PFOS 等濃度が上昇する傾向がある (図 4.7 参照)。

(3) PFOS 等の経時変化と積算降水量 (観測井戸)

6,300ng/L の PFOS 等が検出された E 流域下流側の R5-1 孔では、PFOS 等 4 物質のうち PFOS の割合が最も高く、概ね一定の濃度で推移しているが、今後もデータを蓄積して変動傾向の把握が必要である (図 4.6 参照)。

C 流域下流側の R4-3 孔における PFOS 等濃度の変動は、採水前 50 日間の積算降水量と正の相関があり、降雨の影響で PFOS 等濃度が上昇する傾向がある。また、1 桁を超える範囲で濃度の上昇・低下を繰り返す傾向がある (図 4.7 参照)。

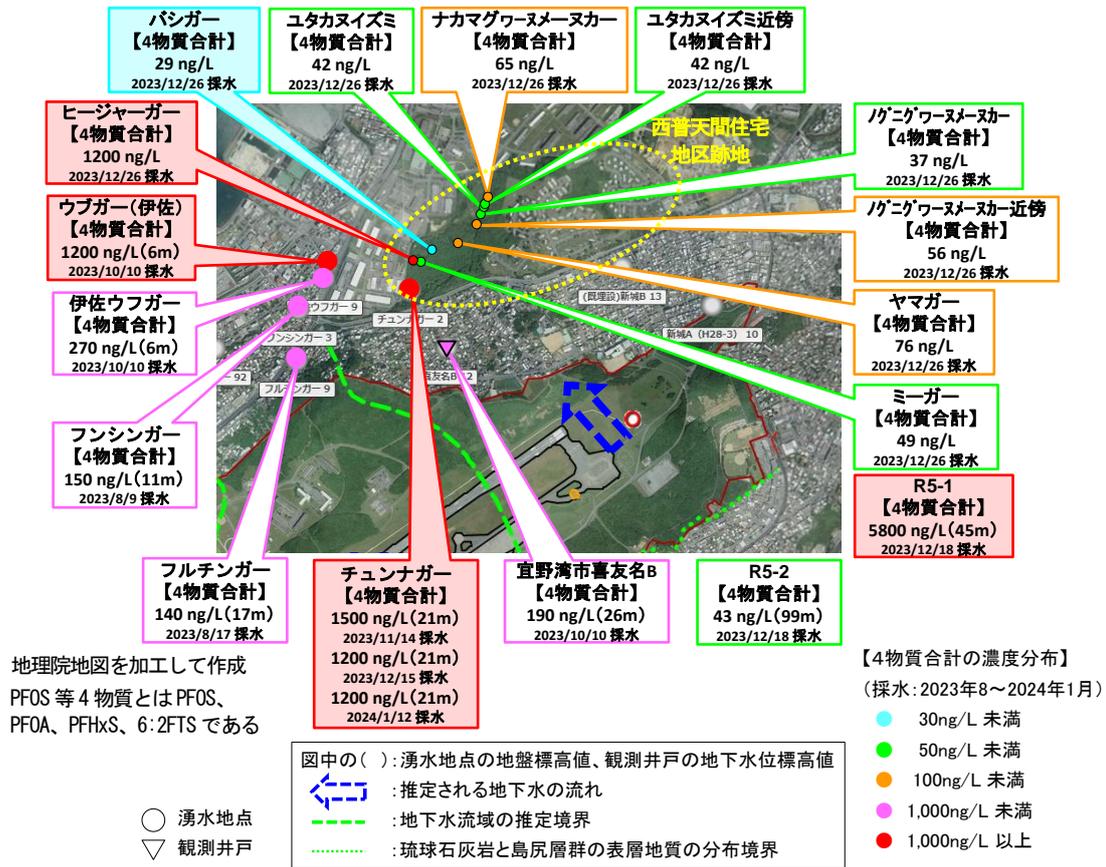


図 4.3 西普天間住宅地区跡地と周辺のPFOS等(4物質の合計値)の濃度分布

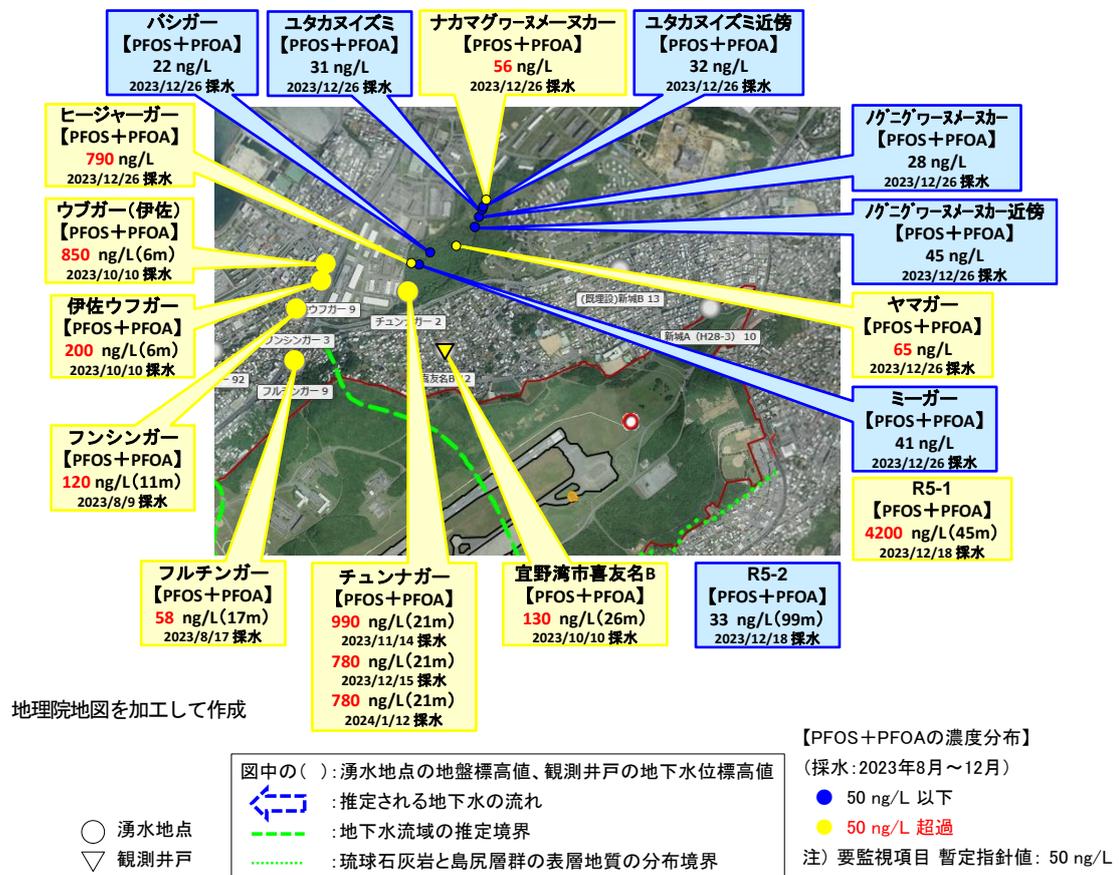


図 4.4 西普天間住宅地区跡地と周辺のPFOS及びPFOA(2物質の合計値)の濃度分布

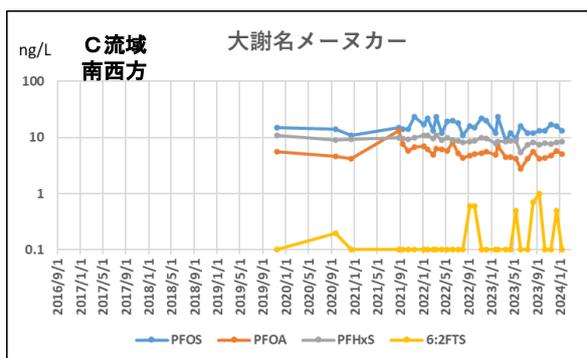
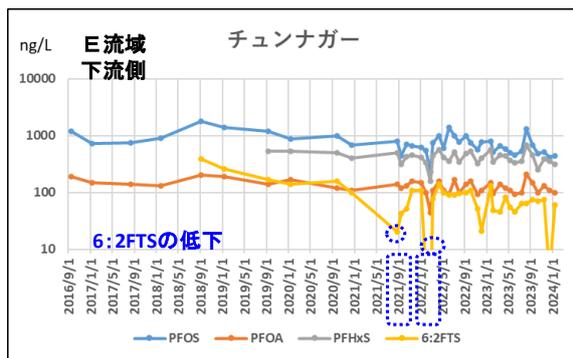
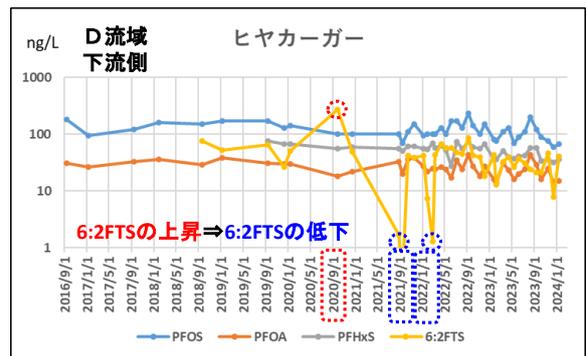
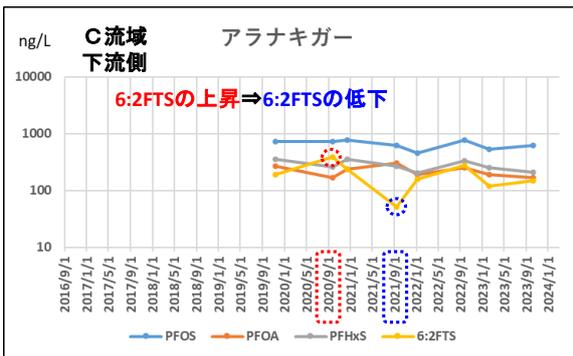
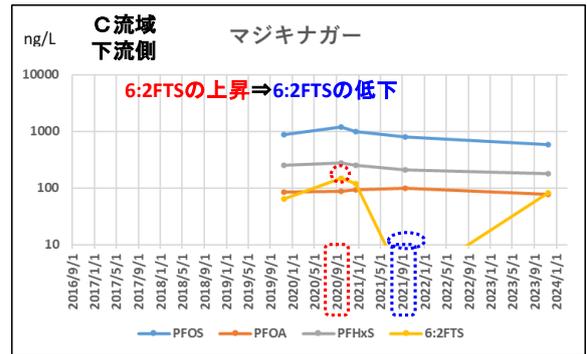
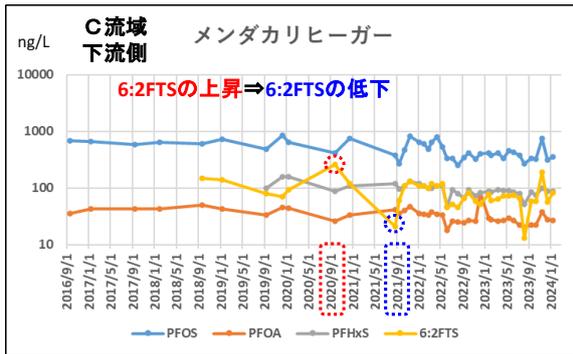
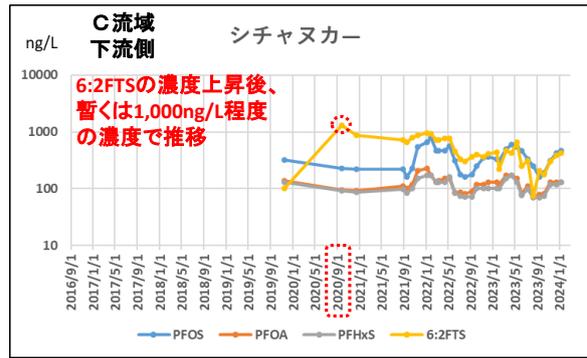
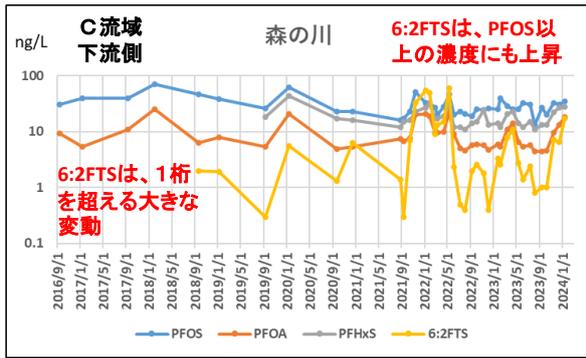


図 4.5 PFOS 等濃度の経時変化 (代表の湧水地点)

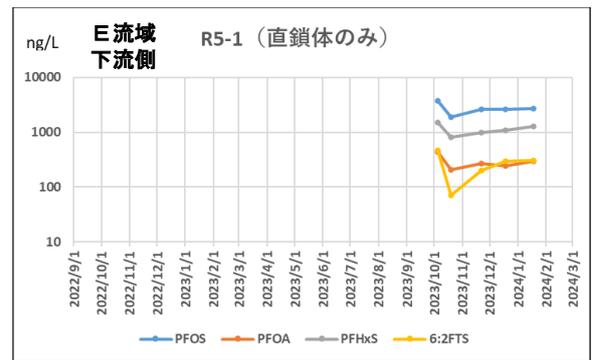
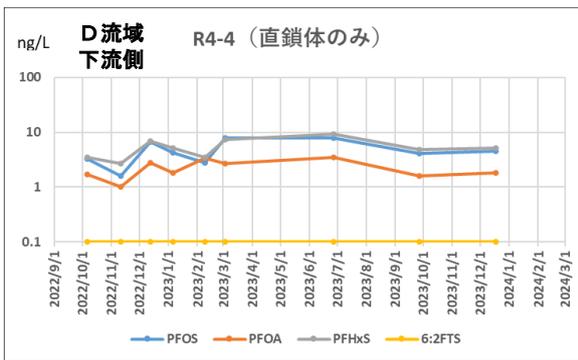
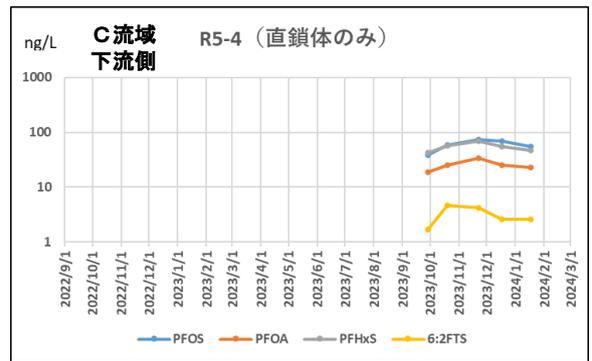
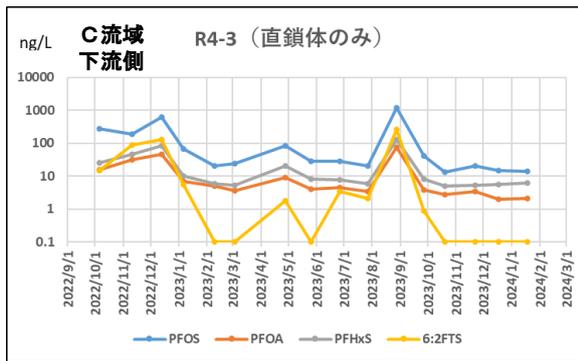
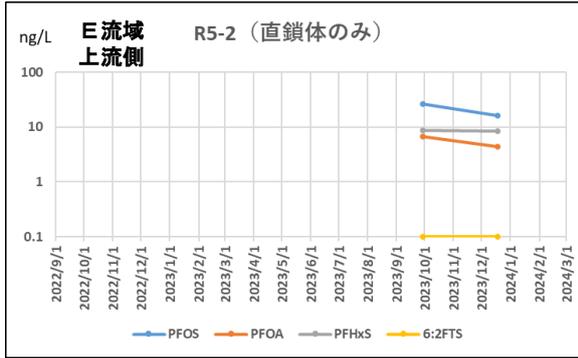
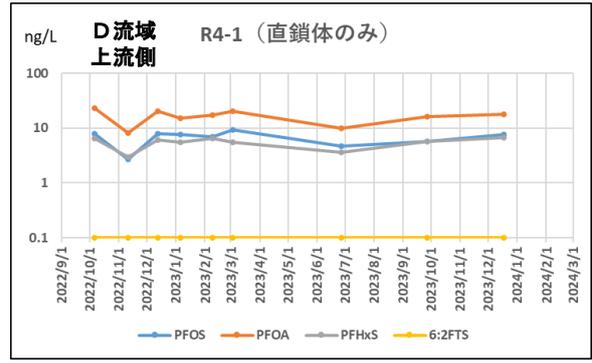
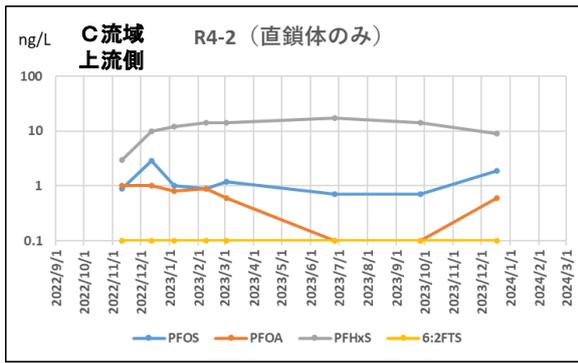


図 4.6 PFOS 等濃度の経時変化 (観測井戸)

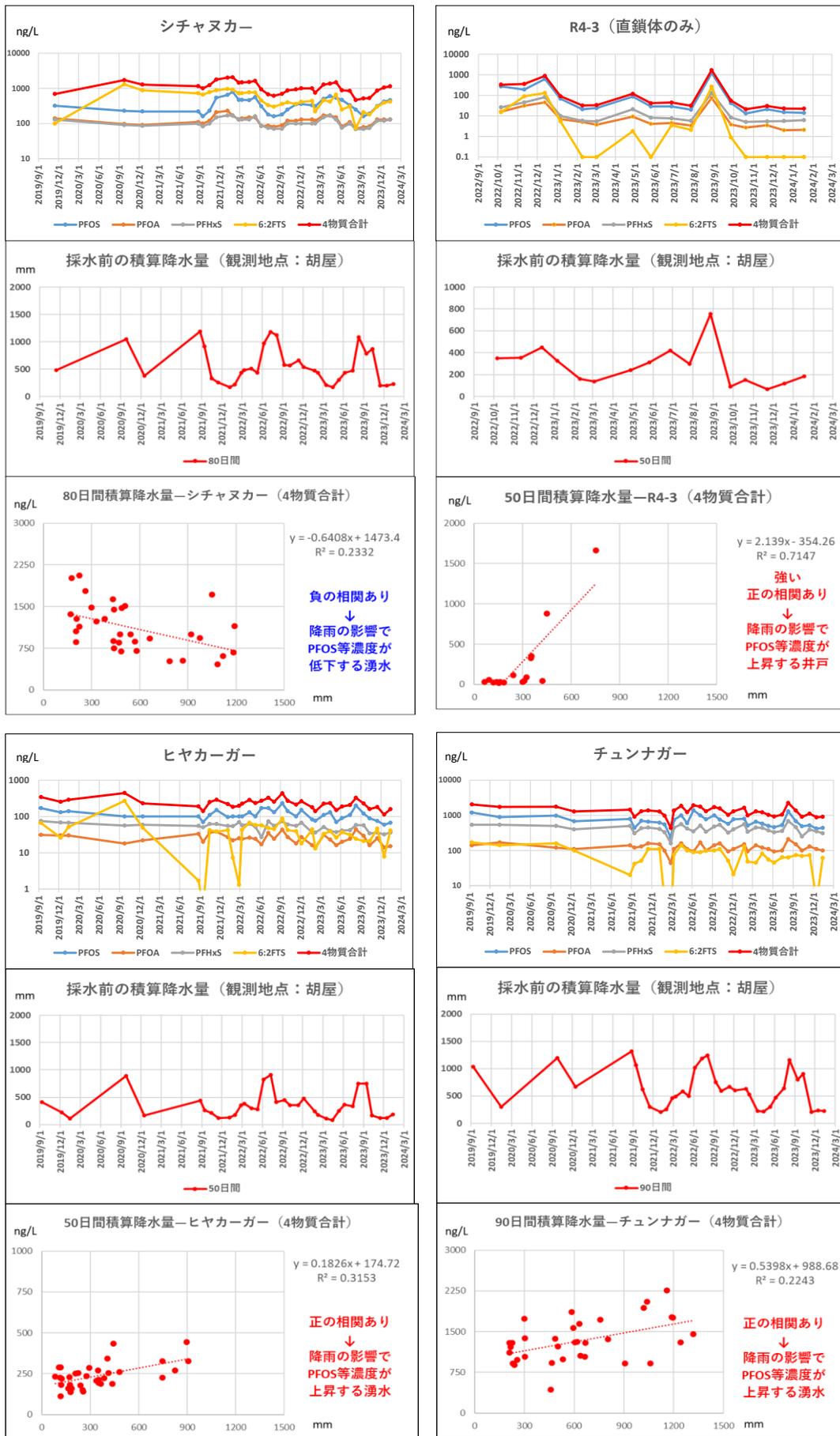


図 4.7 PFOS 等濃度と積算降水量の相関

(4) PFOS 等濃度の構成比による汚染経路の推定

汚染源やPFOS等の移動経路の違いにより、PFOS等4物質の構成比は異なってくると想定され、C流域やD流域の地下水下流側の多くの地点では構成比に類似性が認められない。一方、E流域下流側の伊佐ウフガー～R5-1孔では類似した構成比を示し、現地形を見る限りR5-1孔⇒チュンナガー⇒伊佐ウフガーないしウブガー(伊佐)へ地下水が流下している可能性がある(図4.8参照)。

また、西普天間住宅地区跡地内のヒージャーガーは、チュンナガーやR5-1孔と類似した構成比を示すため、最も上流側に位置するR5-1孔を経由した湧水と推定される(図4.9参照)。

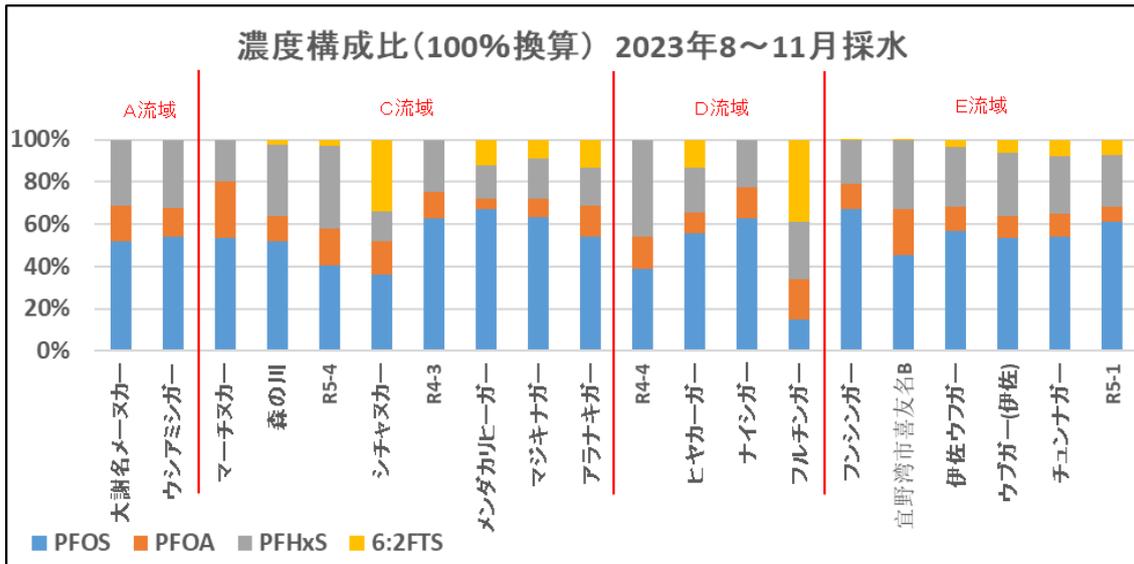


図4.8 PFOS等の構成比(地下水下流側)

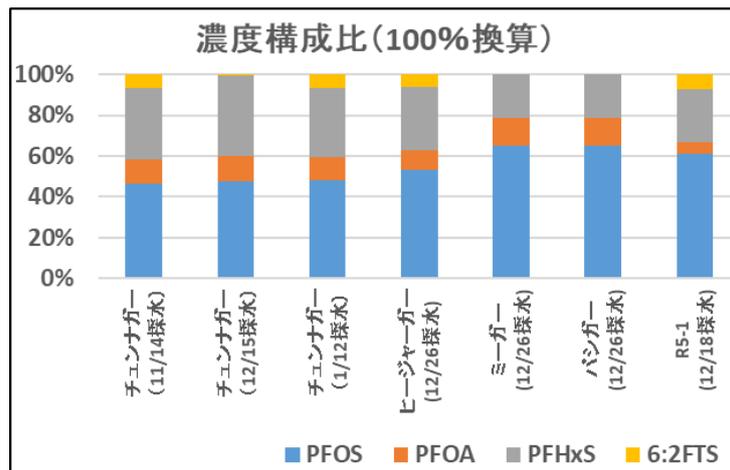


図4.9 PFOS等の構成比(西普天間住宅地区跡地の湧水とR5-1孔)

4.2 地下水流向の推定

普天間飛行場周辺の地下水流向について、三次元的に評価するため概略的な地下水流動シミュレーションを試みた。シミュレーションでは普天間川、尾根部、比屋良川及び海岸線で囲まれた普天間飛行場周辺を評価対象とし、大局的な地下水流向の把握を目的とした（図4.10参照）。

令和5年度のシミュレーションでは、地下水は南東（山側）から同飛行場内の帯水層を通り、北西（海側）に向かって流動して、地形や地下水位データから推定した地下水流向と大局的には同じ方向を示す結果が得られた（図4.11参照）。

しかし、現時点ではシミュレーションから得られた地下水位標高の計算値と実際に測定した観測値に差が生じているため、令和6年度では追加データを入手・反映させた地盤モデルに更新して、シミュレーション精度の向上を図る必要がある。

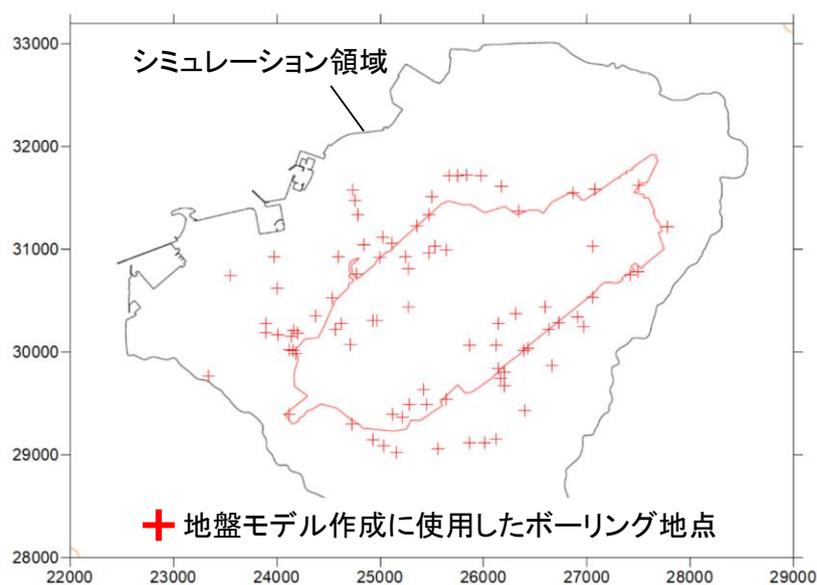


図 4.10 普天間飛行場周辺のシミュレーション領域

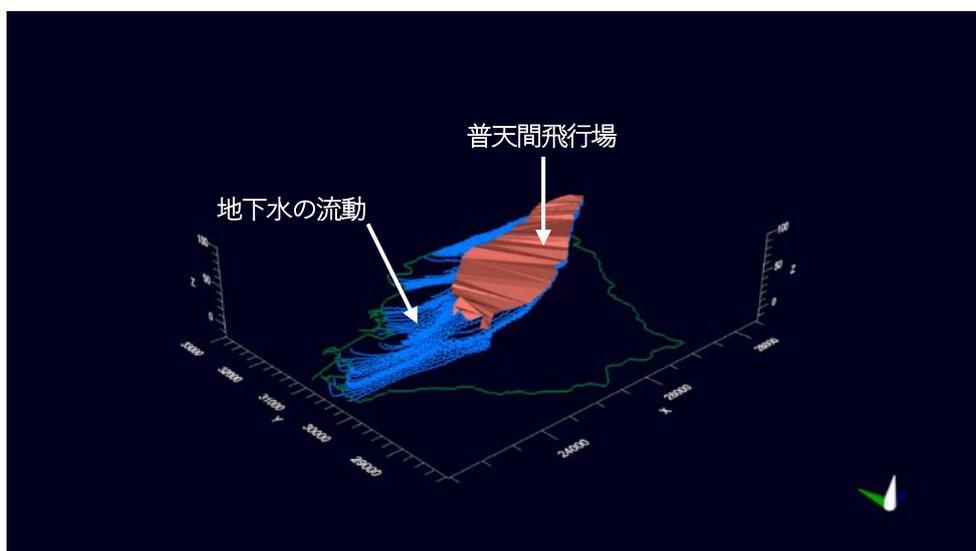


図 4.11 地下水流動の三次元イメージ図

4.3 PFOS 等の長期検出の要因

普天間飛行場周辺の地下水下流側の湧水では、PFOS 等が同飛行場の上流側と比べて高い濃度で依然として推移しているため、その長期検出の要因を推定するために文献等資料の収集・整理を行った。

表 4.1 に示すとおり、不飽和帯（地表から深さ数メートルの地下水位以浅の土壌）に PFOS 等が残留している可能性も考えられる。

表 4.1 推定される PFOS 等の長期検出の要因

対象箇所	普天間飛行場内の不飽和帯土壌
推定される現象	<ul style="list-style-type: none"> ●PFOS 等含有の泡消火薬剤の漏洩後、地表面～深さ数mまでの土壌に PFOS 等が長期間にわたり残留し続けている。 ●不飽和帯に残留した PFOS 等は土壌間隙水に溶出し続け、降雨の影響で地下水面へ浸透する。 ●6:2FTS を含む泡消火薬剤への切替えは近年である。6:2FTS は比較的移動しやすく早期に下流側湧水で検出されるとともに、使用期間が短く地下水中での拡散も限定的であるため、他の PFOS 等と比べて濃度変動は大きくなる。
海外の参考事例	<ul style="list-style-type: none"> ●Cape cod 基地(米国)での不飽和帯のモデル解析では、泡消火薬剤放出 40 年後の時点で、放出された PFAS 合計量の 57%が不飽和帯に残留（空気-水界面への界面吸着）、数百年単位で濃度低下しない解析結果が示された。^{※1} ●空軍基地(オーストラリア)での土壌調査事例では、深さ 3m までに有機フッ素化合物の大部分が留まり、3m以深では 6:2FTS ほか一部の物質のみが主に検出されている。^{※2}

※1) Bridger J. Ruyle et al.: Centurial Persistence of Forever Chemicals at Military Fire Training Sites, 2023, Environmental Science & Technology 57, 21, 8096-8106

※2) Bekele et al.: Separation and Lithological Mapping of PFAS Mixtures in the Vadose Zone at a Contaminated Site, Frontiers in Water, 2020, doi: 10.3389/frwa.2020.597810

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

本事業では、普天間飛行場周辺における有機フッ素化合物の汚染源の特定に向けて、令和4年度までの専門家会議で重要とされた、地質や地下水水位及び水質データの収集に努めてきた。

令和5年度では、以下の事項が把握できた。

- ・泡消火薬剤の使用等履歴がある消火訓練施設（普天間飛行場内）が位置するE流域の下流側において、PFOS 及び PFOA 濃度の暫定指針値を大きく超える地下水が確認された。
- ・C流域やE流域での定期モニタリングの対象としていない湧水での測定結果から、PFOS 等を含む地下水分布が明らかになってきた。
- ・濃度変動と積算降水量との関係から、PFOS 等の濃度変動については採水前 50～90 日間の積算降水量の影響を受けている湧水がある。

今後は、上記の事項と普天間飛行場内での活動との関連を裏付けるため、地質や地下水水位及び水質データの収集を継続し、シミュレーションも活用して地下水流動を検証していく方針である。

5.1 汚染源の特定に向けた条件

令和5年度までの調査結果から把握した内容に基づき、汚染源の特定に必要と考えられる条件等を表5.1に整理した。引き続き、今後の調査において①～④項目に関する条件を満たすことができれば、汚染源の特定につながると考えられる。

表 5.1 汚染源の特定に向けた条件

把握する項目		令和5年度までに把握した内容	今後把握すべきデータ等
①	PFOS 等の使用・保管・漏洩の履歴が有る。	普天間飛行場内で使用等の履歴あり。(令和3年度の専門家会議で検討)	既知の情報については把握済みであるが、今後新たな情報が得られれば追加検討する。
②	飛行場の地下水上流・下流側で PFOS 及び PFOA 濃度に有意な差が有る。	上流側は暫定指針値 50ng/L 以下、下流側は 50ng/L 超過の濃度を示す。(地下水下流側で令和5年度に設置した観測井戸において、6,000 ng/L を超過する地点有り)	C流域での調査密度が少ないエリアや最も高い PFOS 等濃度が確認されたE流域の下流側エリアにおいて、地下水の水質調査を実施し、PFOS 等濃度を把握する。【課題1-2】
③	南東⇒北西方向以外の地下水の流れが無い。	観測井戸の地下水水位データに基づく地下水水位等高線から、地下水流向は南東⇒北西方向と推定。 飛行場北西側の地下水は、飛行場を上流とする流れとなっていることを地下水流動シミュレーションで検証。	調査密度が少ないエリアで地盤や地下水の水位調査を実施し、水位データの把握と島尻泥岩上面形状の精査を行う。【課題1-2】 地盤モデルの精度を向上させ、地下水流動の再検証に努める。【課題2】
④	飛行場と観測地点との間に高濃度な PFOS 等の地下浸透が生じる土地利用が無い。	普天間飛行場と R4-3 孔の間は主に住宅地、R5-1 孔は飛行場直近に位置しており、PFOS 等の使用や埋設の履歴は確認されない。	既知の情報については把握済みであるが、今後新たな情報が得られれば追加検討する。

5.2 令和6年度の調査方針

本事業は、令和4年度からの3ヵ年事業として遂行され、普天間飛行場周辺における有機フッ素化合物の汚染源の特定が主な目的となることから、本事業の3年目となる令和6年度については、下記の(1)～(2)で挙げた課題を中心に調査・検討を計画し、実施していく方針である。

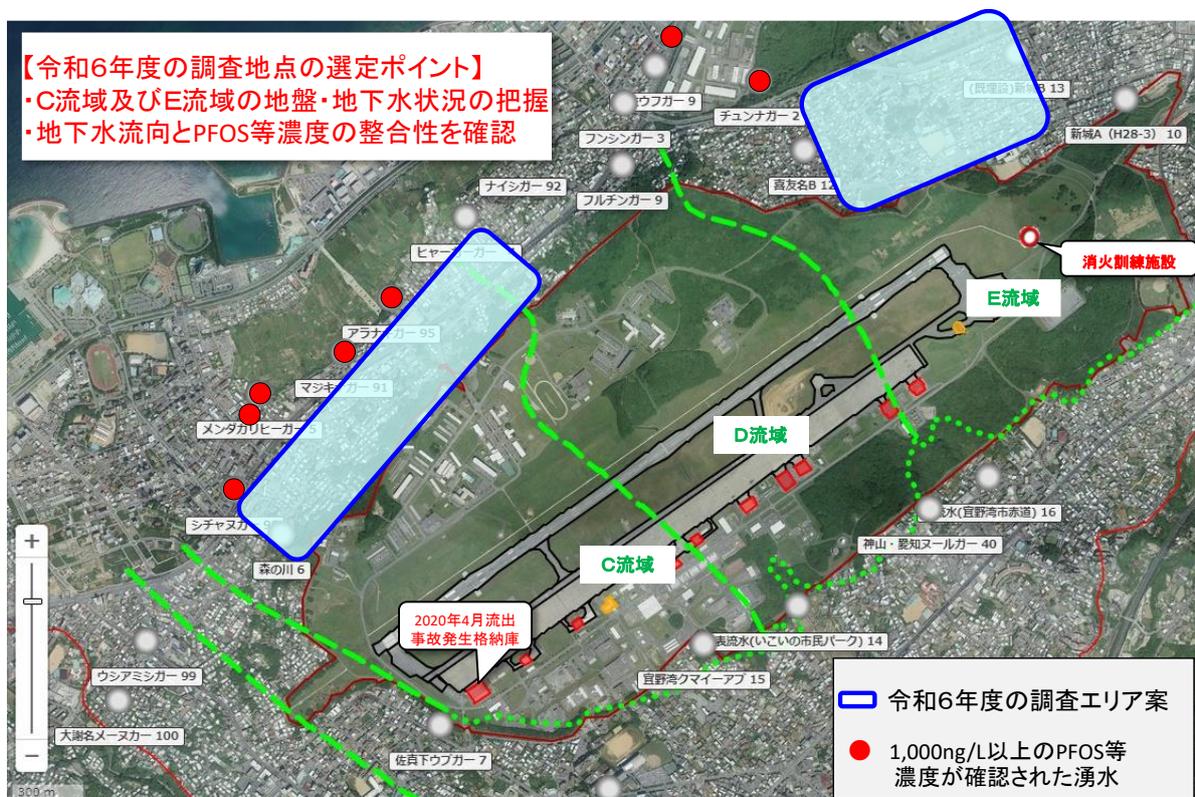
(1) C流域及びE流域における地盤・地下水状況の把握【課題1-2】

2020年9月に6:2FTS濃度が一時的に上昇または継続して検出されているC流域の湧水地点における地下水の上流側のエリアや、最も高いPFOS等濃度が確認されたE流域下流側のエリアにおいて、調査ボーリング及び観測井戸の設置を検討し、地盤・地下水状況を把握する(図5.1参照)。

なお、必要に応じて島尻泥岩層上面標高を詳細に確認することを目的とした調査ボーリングの実施についても検討を行う。

(2) シミュレーションによる地下水流動の検証【課題2】

地下水流向について、三次元的に評価するための地下水流動シミュレーションを引き続き行う。既往調査や新たな調査ボーリングから島尻泥岩層上面標高や石灰岩の分布に関する情報を収集・整理し、地下水流向とPFOS等濃度の整合性を確認しながら地盤モデルの精度を向上させ、普天間飛行場内を經由した地下水が下流側の1,000ng/Lを超える濃度を示す湧水地点に到達していることの検証に努める。



注)本図の流域界は、参考文献に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

地理院地図を加工して作成

図5.1 調査ボーリング及び観測井戸の設置地点案

以上