

**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 資料**

令和6年3月

沖縄県

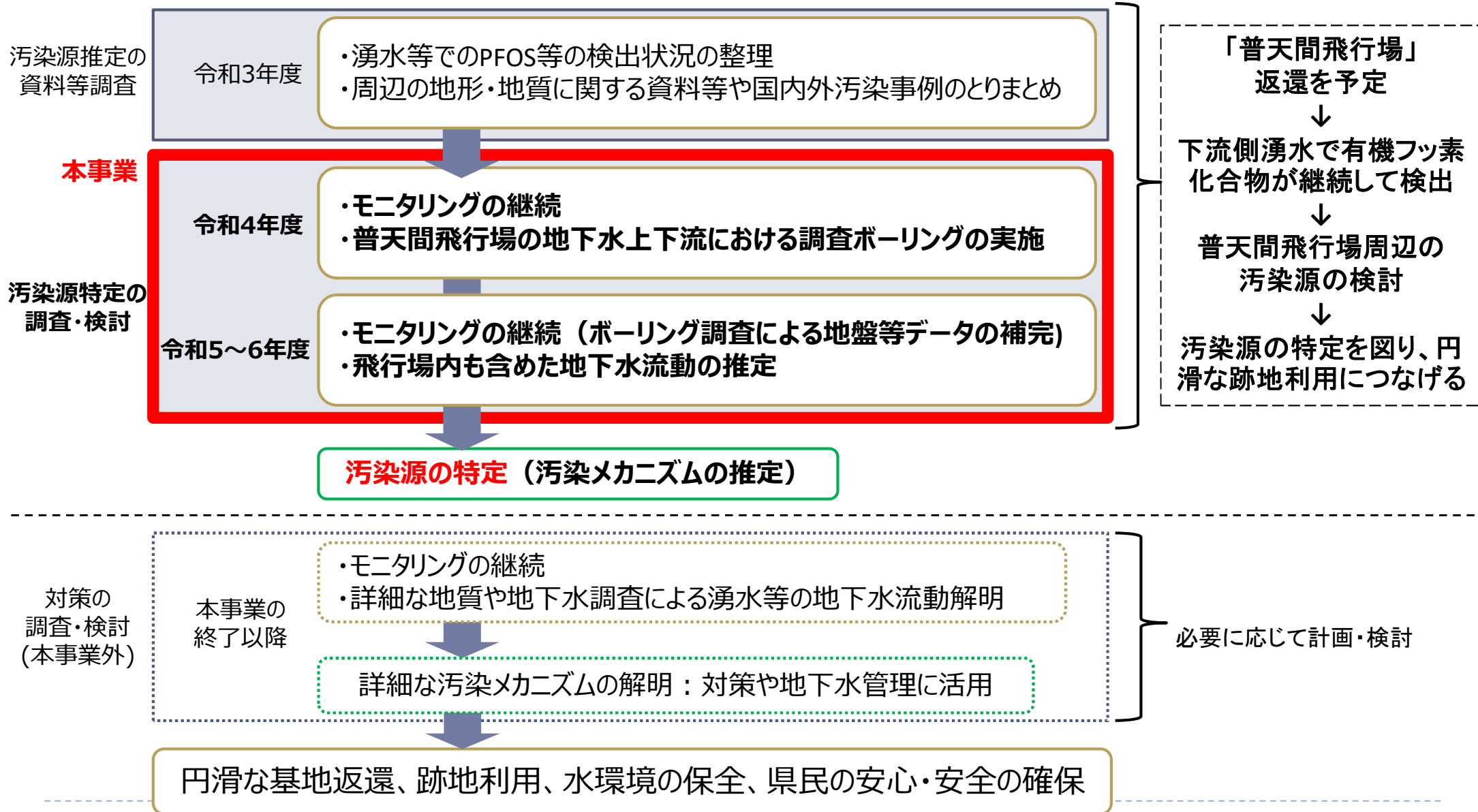
目 次

1. 汚染源検討の経緯と令和5年度の調査・検討事項	1
1-1. 本事業の位置づけ	2
1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)	3
1-3. 汚染源特定に向けた条件	5
1-4. 汚染源特定に向けた方針	6
2. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要	8
2-1. 地質及び観測井戸設置の状況	9
2-2. 各種試験・分析の結果	14
3. PFOS等の定期モニタリング結果	19
3-1. PFOS等の水質モニタリング	20
3-2. PFOS等濃度の特徴	26
4. 汚染源特定に向けた課題に対する令和5年度の検討結果	28
4-1. モニタリング結果とPFOS等使用箇所との関連	29
4-2. シミュレーションを活用した地下水流動の検証	31
5. 汚染源特定に向けた今後の課題	35

1. 汚染源検討の経緯と令和5年度の調査・検討事項

1-1. 本事業の位置づけ

◆事業目的に対する調査・検討の段階



1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)

◆ 普天間飛行場周辺におけるPFOS等の汚染源(推定)

✓ PFOS等※の汚染源と推定される場所を以下の平面図に示す。



① 普天間飛行場内の格納庫、消火訓練施設及びそれら周辺の地表面等

- PFOS等を含む泡消火薬剤の使用・漏洩・流出が確認された場所である。
- 2021年10月までにPFOS・PFOAを含む泡消火薬剤やその廃水は処分されているが、過去に地表面等から地下浸透したPFOS等は、地盤中に残留している可能性がある。

② 普天間飛行場内の吸込穴(PFOS等を含む地表排水を放流)

- PFOS等含有物を含む地表排水の流末に位置する場所である。
- ここから地下浸透したPFOS等は、速やかに地下水面に到達する可能性がある。

← 地表排水側溝
◎ 吸込穴(ポノール)
← 推定地下水流向
● 水質調査地点

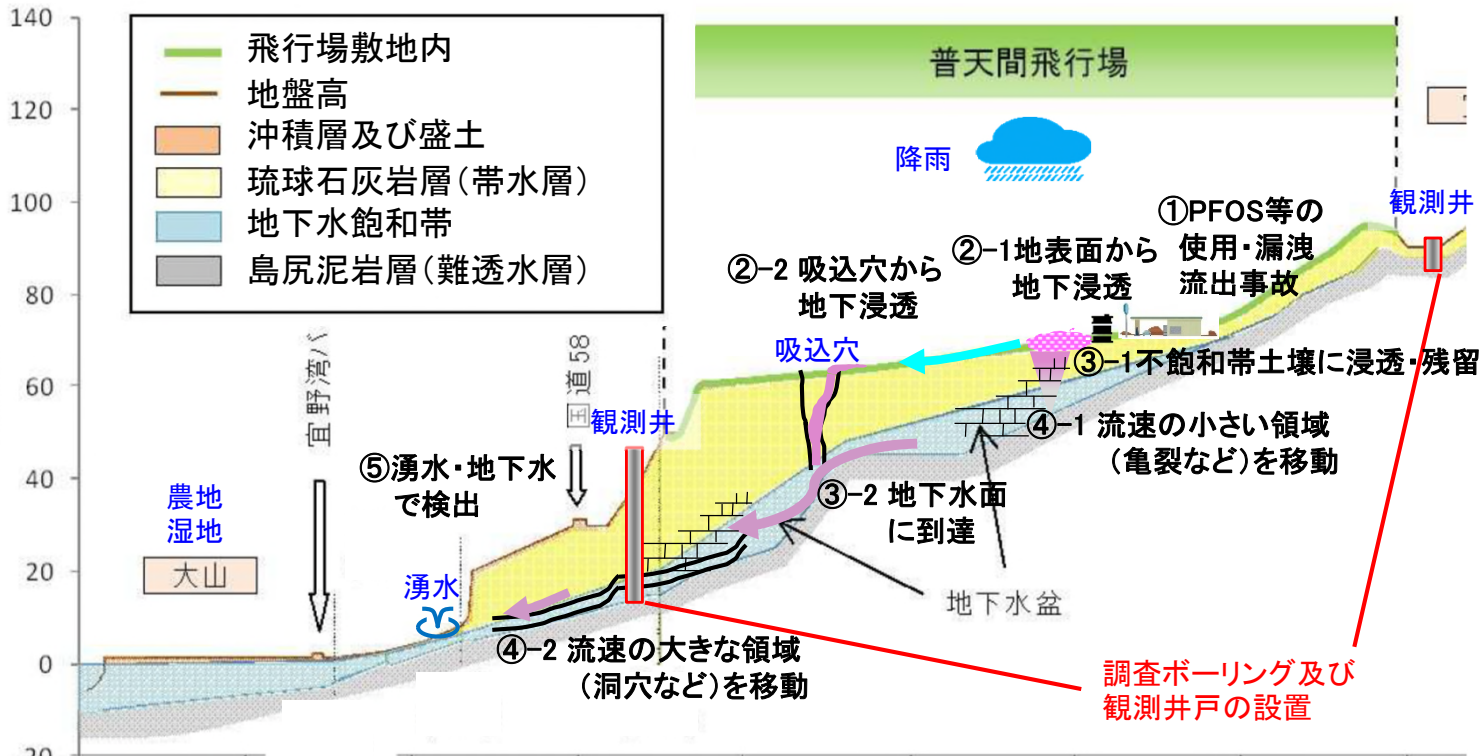
※ 留意点
説明資料では、有機フッ素化合物のPFOS、PFOA、PFHxS、6:2FTSの4物質を「PFOS等」と称す。PFOS・PFOAを他の有機フッ素化合物で代替した泡消火薬剤の使用等や泡消火薬剤以外のPFOS等の用途については、今後も継続して情報を収集する必要がある。

2020年4月流出事故
地理院地図を加工して作成

1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)

◆ 普天間飛行場周辺におけるサイト概念モデル

✓ PFOS等の汚染源と推定される場所から湧水等までの移動経路の概念図を、以下の断面図に示す。



- ① PFOS等の使用・漏洩・流出事故が発生する。
- ②-1 地表面等から地下浸透する。
- ②-2 吸込穴(ポノール)から地下浸透する。
- ③-1 降雨の浸透によって下方へ移動、PFOS等の一部は不飽和帯に残留する。
- ③-2 PFOS等の一部は地下水面に到達する。
- ④ 地下水面に到達したPFOS等は地下水とともに島尻泥岩層上面の形状*や地下水位の影響を受け地盤中を移動する。
- ④-1 流速の大きい領域に到達したPFOS等は数週間程度の短い期間で、下流側の湧水へ到達する。
- ④-2 流速の小さい領域に到達したPFOS等は数十年の期間をかけて下流側の湧水へ到達する。
- ⑤ 湧水・地下水で検出される。

出典) 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

※留意点

普天間飛行場内の島尻泥岩層上面の形状や地下水位については詳細な調査ができないため、飛行場外に比べて不確実性が大きく、今後も継続した検討が必要である。

1-3. 汚染源特定に向けた条件

◆ 汚染源特定に向けて明らかにする項目

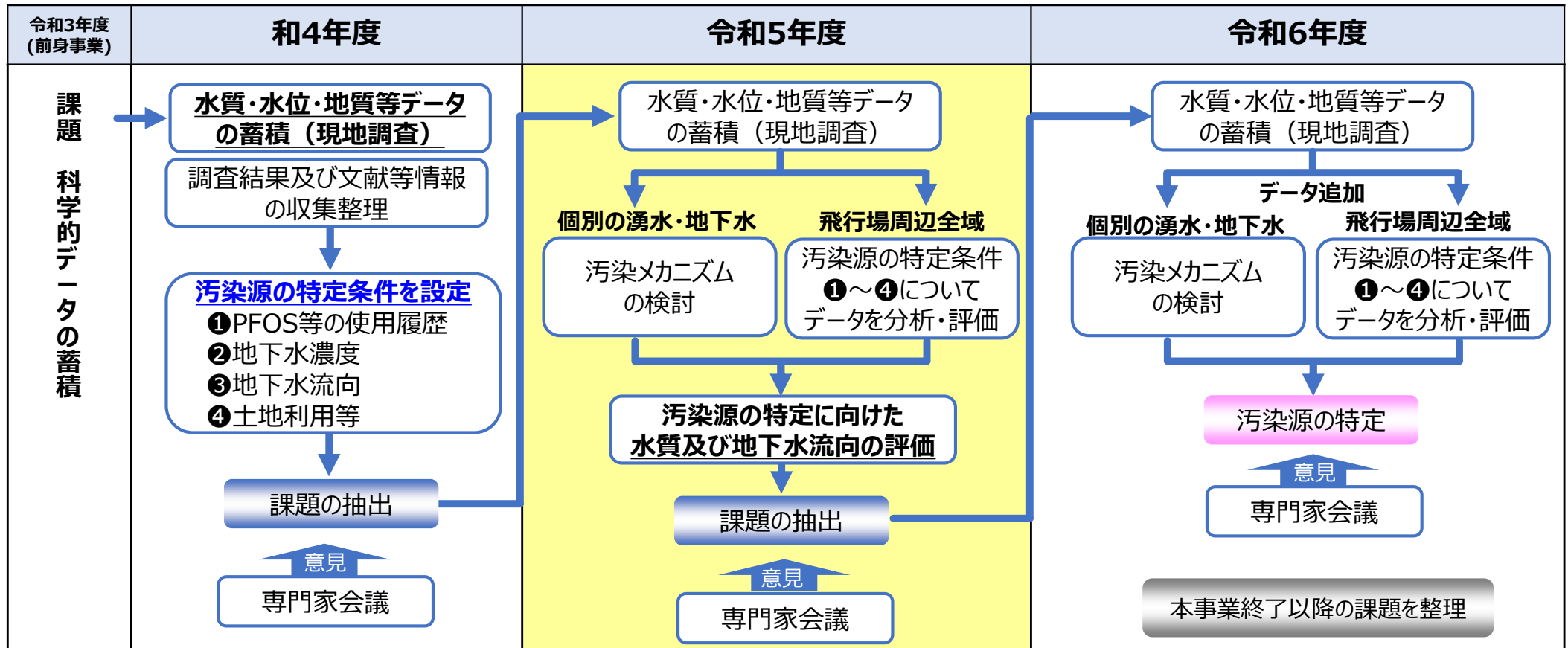
- ✓ 飛行場周辺全域を評価対象として、取得した情報や観測データに基づいた結果で ①～④の項目を満たすことを「汚染源の特定条件」とした。
- ✓ また、湧水におけるPFOS等の長期検出、6:2FTSの変動要因等の汚染メカニズムの推定は継続して検討していく。⇒ **【課題1-1】**

汚染源特定に向けて明らかにする項目		令和4年度までの状況	今後の事業期間で把握すべきデータ
①	PFOS等の使用・保管・漏洩の履歴がある。	✓ 普天間飛行場で履歴あり (令和3年度の資料調査)	✓ 把握済み (今後、新たな情報が得られれば追加検討)
②	飛行場の地下水上流側のPFOS等濃度は指針値未満、地下水下流側のPFOS等濃度は下流側湧水と同レベルで検出される。	✓ 地下水上流側のR4-1、R4-2孔 ⇒指針値未満 ✓ 地下水下流側のR4-3孔 ⇒1,000ng/L以上	✓ 調査密度が少ないエリアでの地下水の水質調査⇒ 【課題1-2】
③	地下水の流れが南東⇒北西方向以外には無いことを示すことができる。	✓ ボーリング調査地点の島尻泥岩層上面標高と透水試験による透水係数 ($10^{-6} \sim 10^{-5} \text{m/s}$) を把握 ✓ 5地点の地下水位観測結果(地下水位等高線)では、地下水流向は 南東⇒北西方向と推定	✓ 調査密度が少ないエリアでの地下水の水位調査 ⇒ 【課題1-2】 ✓ 島尻泥岩層上面形状の精査 (調査データに基づく標高値の抽出) と地盤モデル作成 ✓ 地下水流向の検証 (シミュレーション結果も活用) ⇒ 【課題2】
④	飛行場と観測地点との間に、PFOS等の地下浸透が生じるような土地利用がない。	✓ 飛行場～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。	✓ 把握済み (今後、新たな情報が得られれば追加検討)

1-4. 汚染源特定に向けた方針

◆3カ年事業における令和5年度業務の位置づけ

- ✓ 水質・水位・地質等のデータを蓄積し、E流域の地下水濃度の把握、飛行場周辺の大局的な地下水流向の検証、6:2FTSに着目した汚染メカニズムの検討を行う。
- ✓ その結果を踏まえ、令和6年度で実施する**汚染源の特定**に向けた**効果的な調査地点を提案**する。



1-4. 汚染源特定に向けた方針

◆令和5年度業務の課題と対応

【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

- ✓ 6:2FTSの検出傾向が特徴的な湧水付近をモデルケースとして、地下水位、降水量、PFOS等の濃度変動や島尻泥岩上面の形状、地下水流域内の流向等から汚染メカニズムを検討し、モニタリング結果とPFOS等使用箇所との関連を考察する。

【課題1-2】 地盤・地下水の調査範囲の拡大

- ✓ 普天間飛行場周辺全域のPFOS等濃度や地下水位の状況を確認し、地下水流動シミュレーションで用いる設定データを取得する。調査密度が少ない流域の上下流側や側部において、調査ボーリング及び観測井戸の設置する。

【課題2】 シミュレーションを活用した地下水流動の検証

- ✓ 飛行場内を経由した地下水が下流側の湧水地点に到達していることを検証する。普天間飛行場周辺全域の地下水流向をシミュレーションを用いて推定し、地下水流動を検証する。

2. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要

2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆調査地点位置(調査ボーリング+観測井戸設置)



令和5年度の調査地点
⇒【課題1-2】に対して、調査密度が少なかったE流域とC流域側部に観測井戸を設置

R4-3 : 本事業で設置した観測井戸
R5-4 (青字は令和5年度に設置)

←→ : 推定される地下水の流れ

--- : 地下水流域の推定境界

..... : 琉球石灰岩と島尻層群の表層地質の分布境界

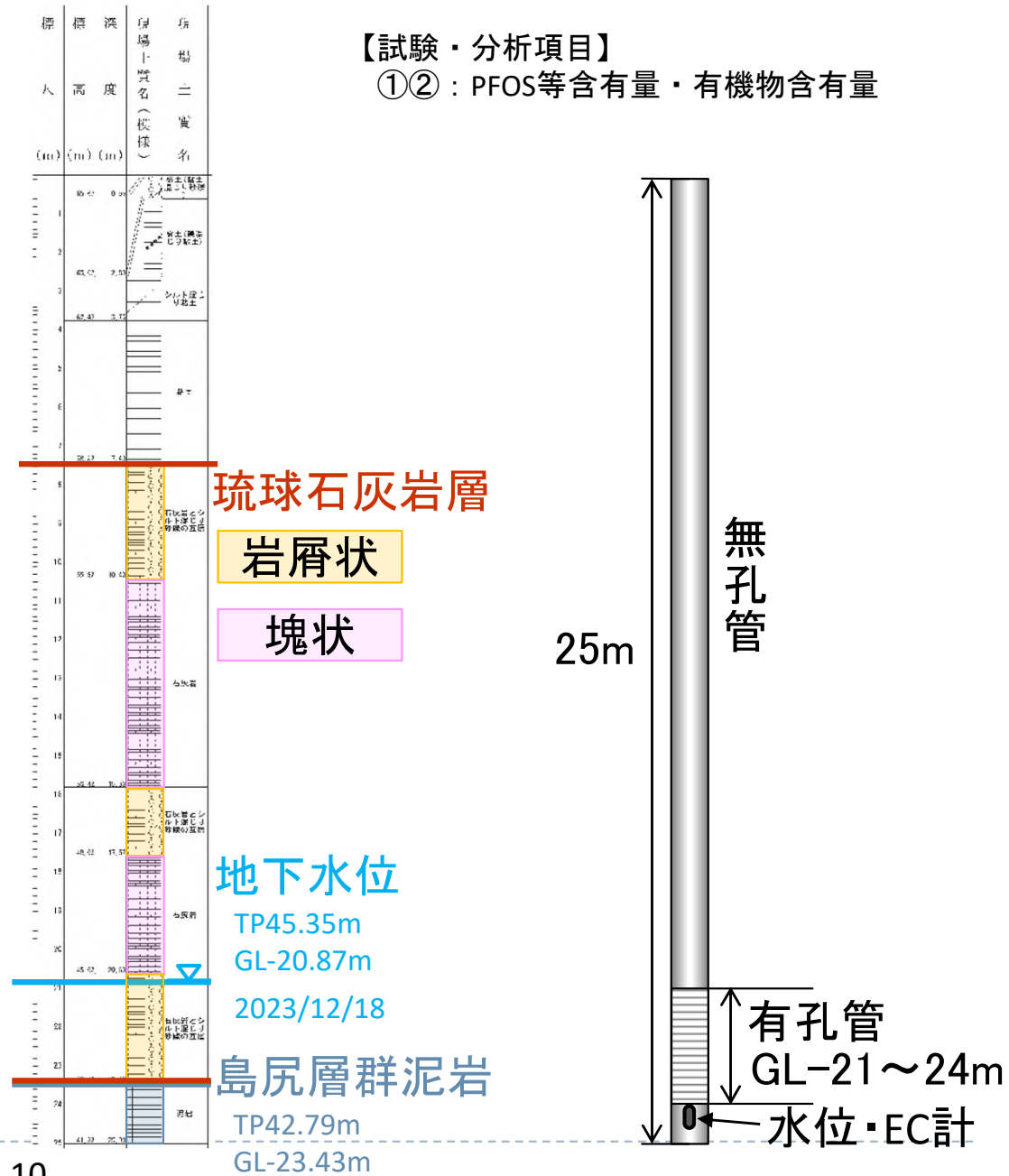
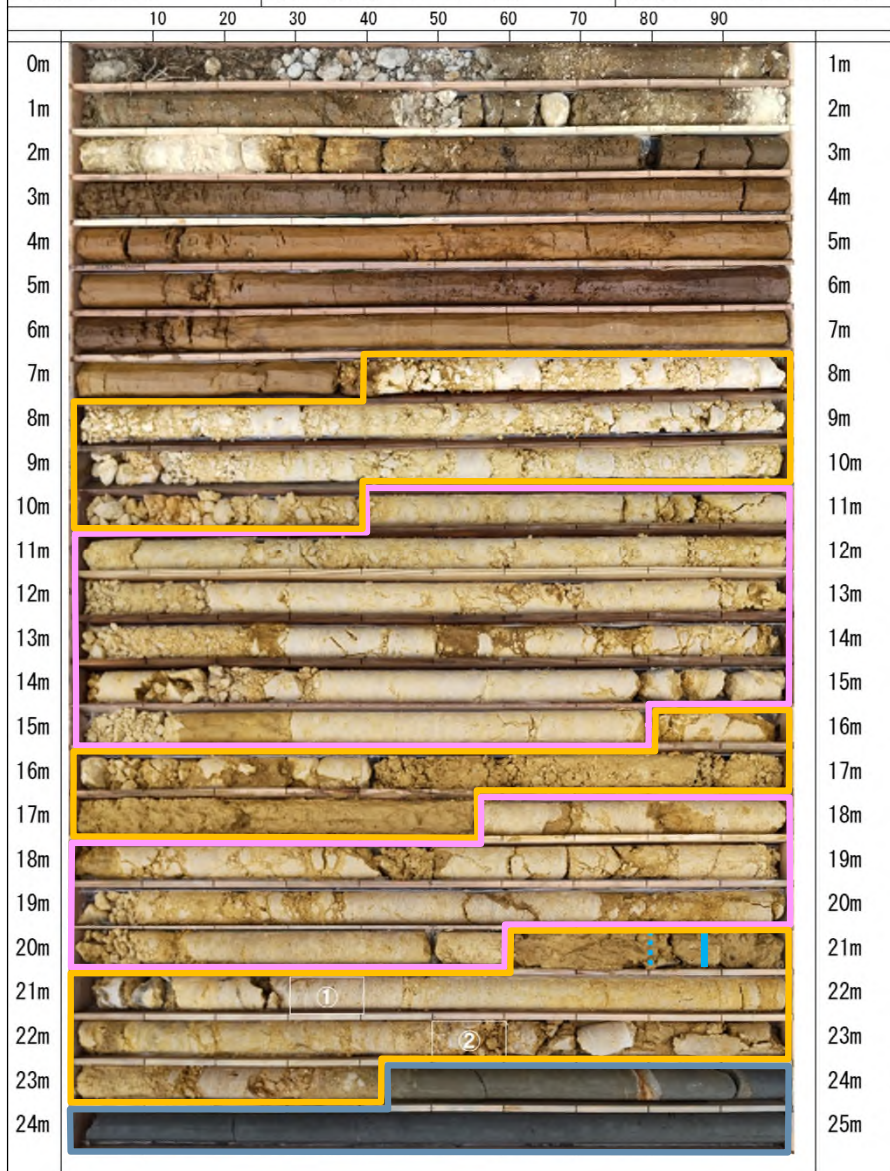
注) 本図の流域界は、参考文献に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

地理院地図を加工して作成

2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

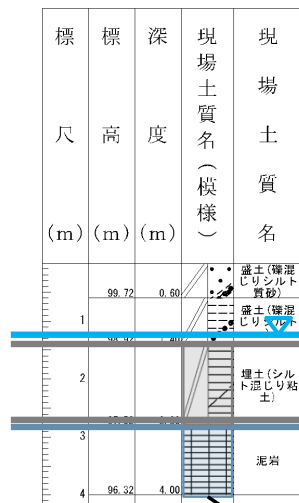
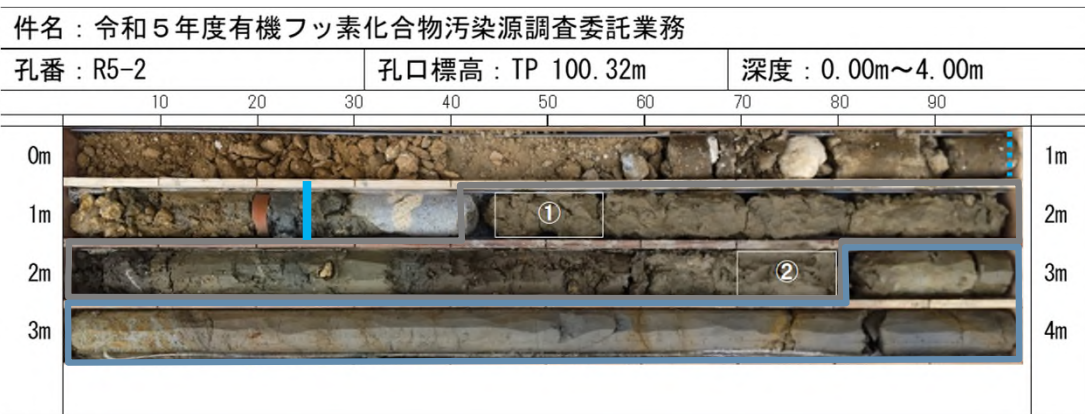
◆ R5-1 孔 (E流域の下流側)

件名：令和5年度有機フッ素化合物汚染源調査委託業務
 孔番：R5-1 孔口標高：TP 66.22m 深度：0.00m～25.00m



2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R5-2孔 (E流域の上流側)



【試験・分析項目】

①②：PFOS等含有量・有機物含有量

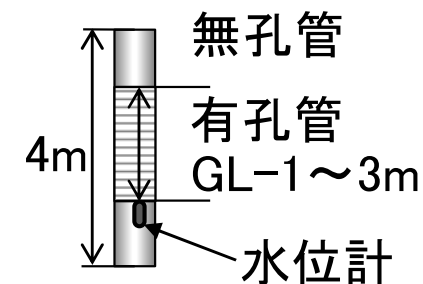
地下水位

TP99.07m
GL-1.25m
2023/12/18

埋土層

島尻層群泥岩

TP97.52m
GL-2.80m

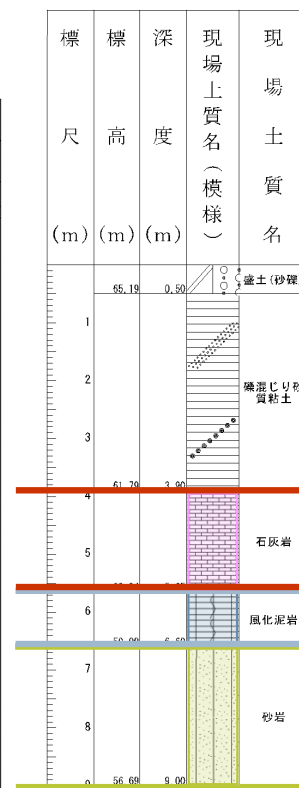
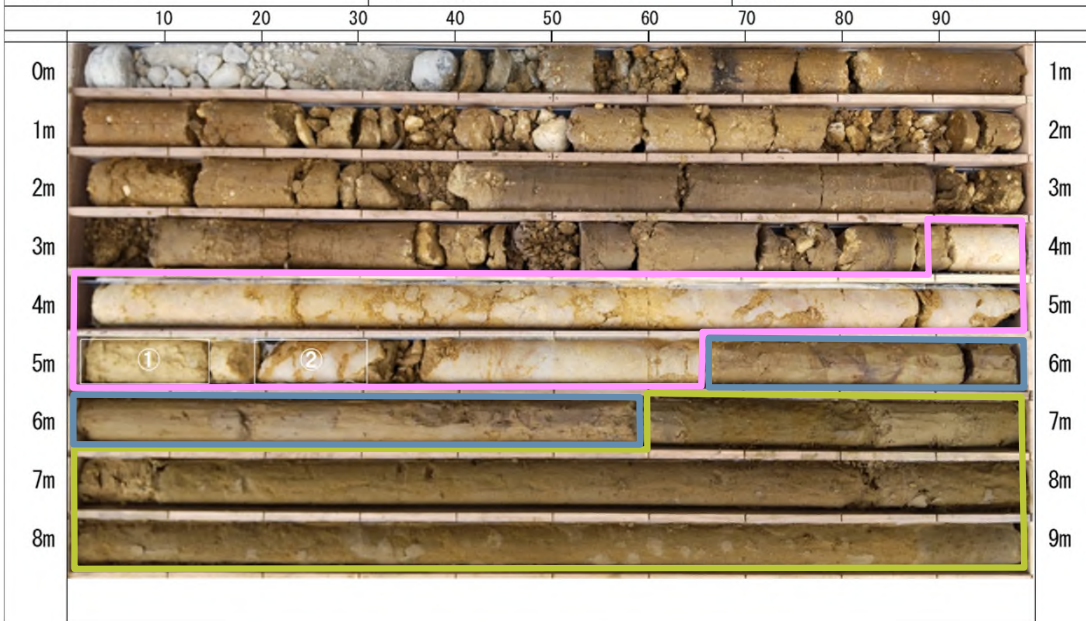


2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R5-3孔(C流域の側部)

件名：令和5年度有機フッ素化合物汚染源調査委託業務

孔番：R5-3 孔口標高：TP 65.69m 深度：0.00m~9.00m



【試験・分析項目】

①②：PFOS等含有量・有機物含有量

地下水なし

2023/12/18時点

琉球石灰岩層

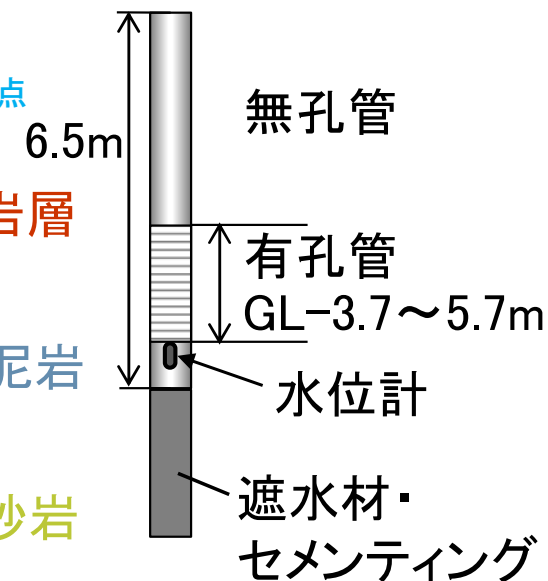
塊状

島尻層群泥岩

TP60.04m

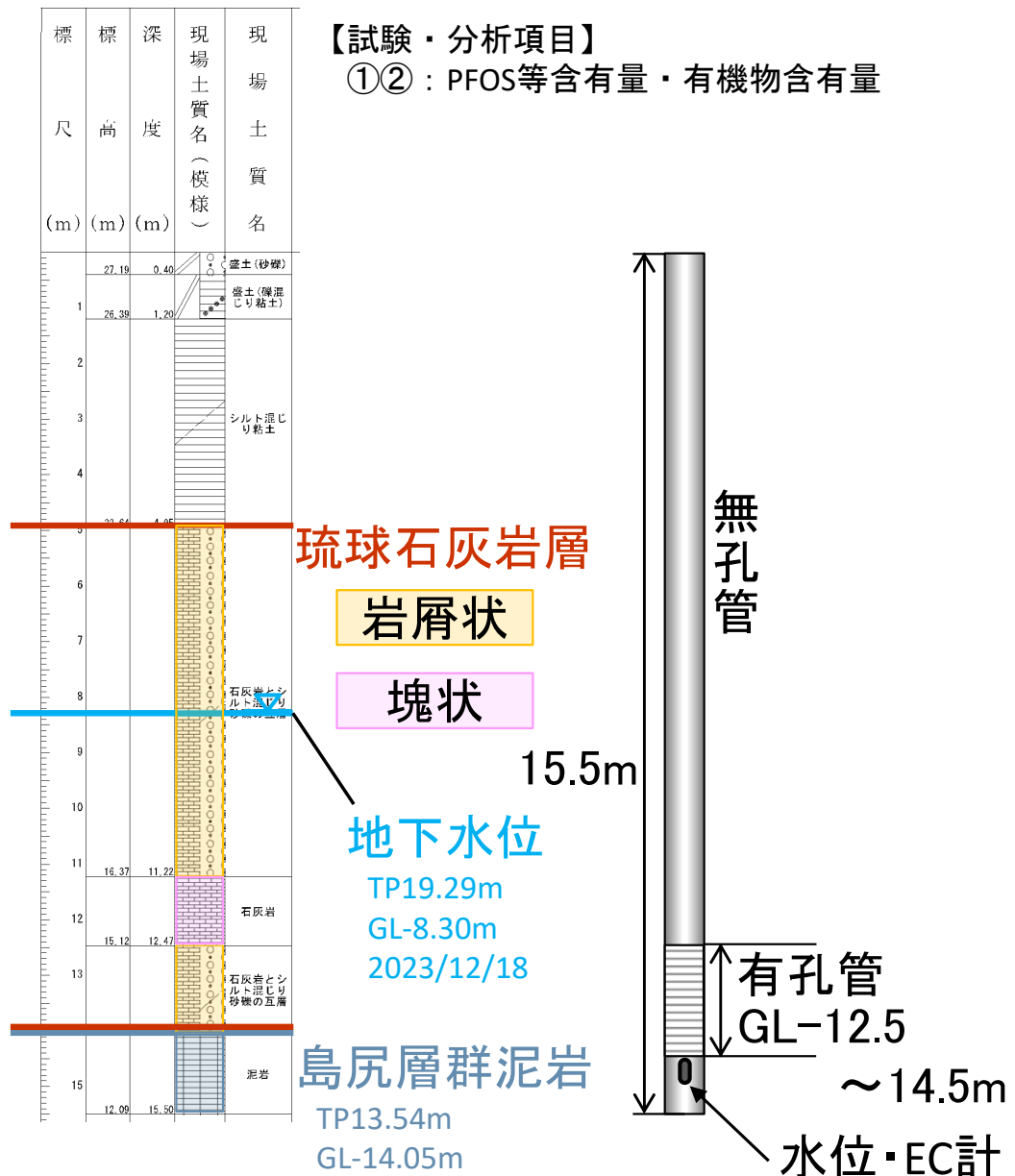
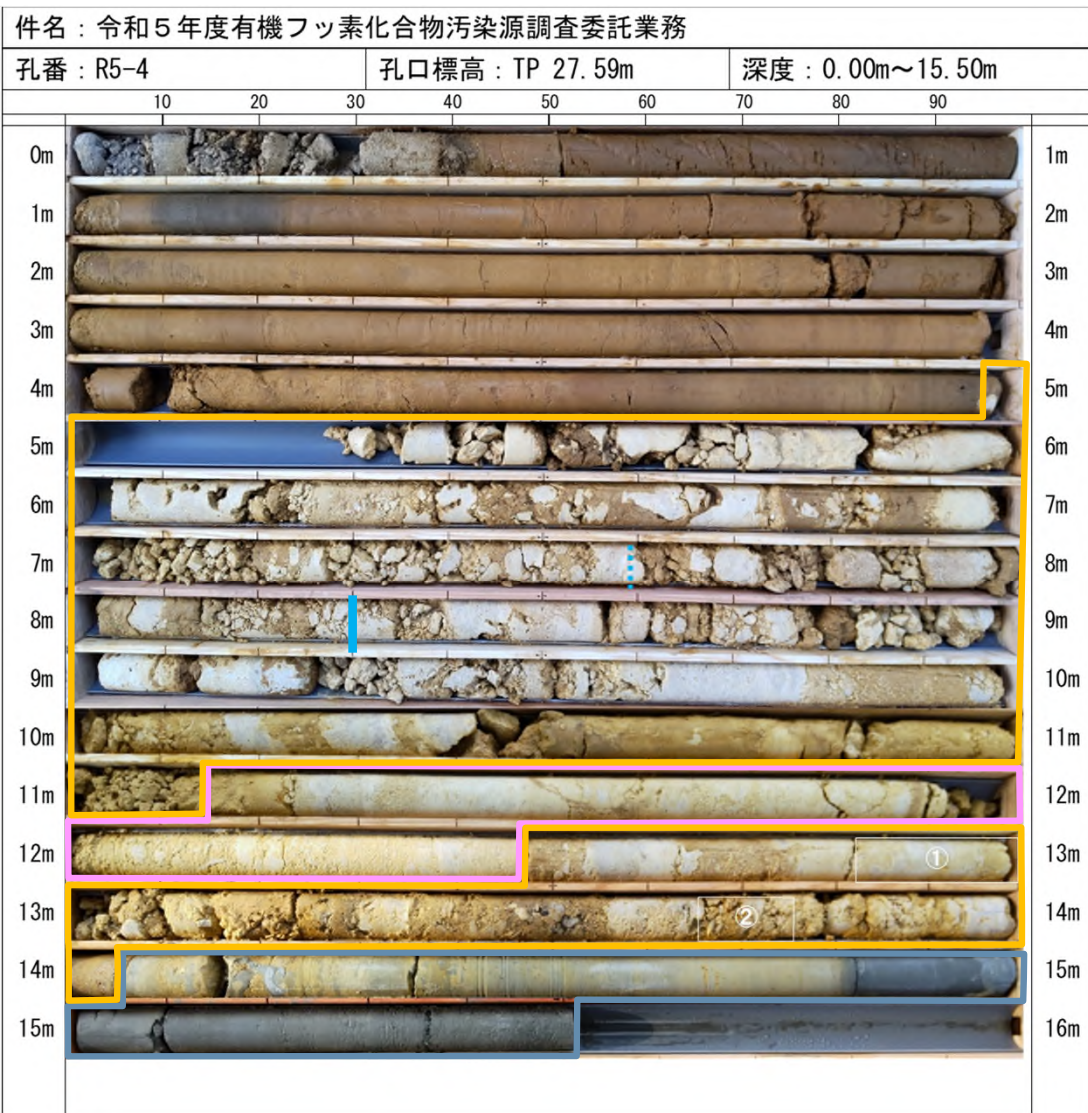
GL-5.65m

島尻層群砂岩



2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R5-4孔(C流域の下流側)

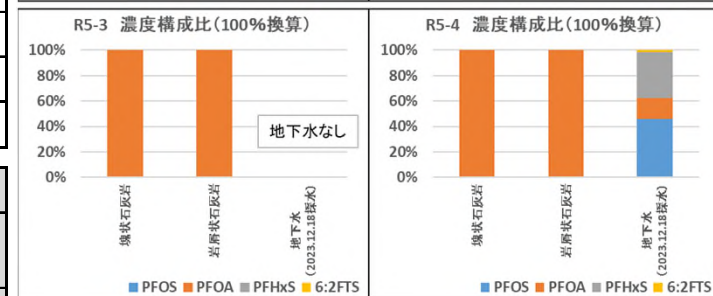
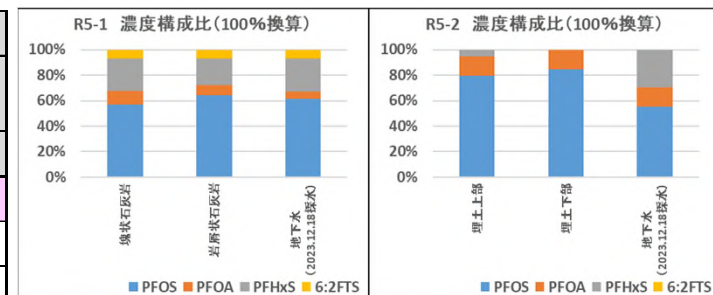


2-2. 各種試験・分析の結果

◆石灰岩試料の分析結果(PFOS等含有量)

- ✓ R5-1孔の石灰岩からPFOS等4物質が検出⇒ 地下水の濃度構成比と同じ
- ✓ R5-2孔の埋土からPFOS・PFOA・PFHxSが検出⇒ 地下水の濃度構成比と異なる
- ✓ R5-3孔とR5-4孔の石灰岩からPFOAが検出⇒ 地下水の濃度構成比と異なる

分析項目	単位	R5-1						R5-2					
		塊状石灰岩 試料深度: 21.30~21.40m			岩層状石灰岩 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			岩層状石灰岩 試料深度: 5.00~5.15m			塊状石灰岩 試料深度: 12.82~13.00m			岩層状石灰岩 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		

注) 令和4年度のPFOS等の分析は石灰岩試料に風乾・破砕・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。

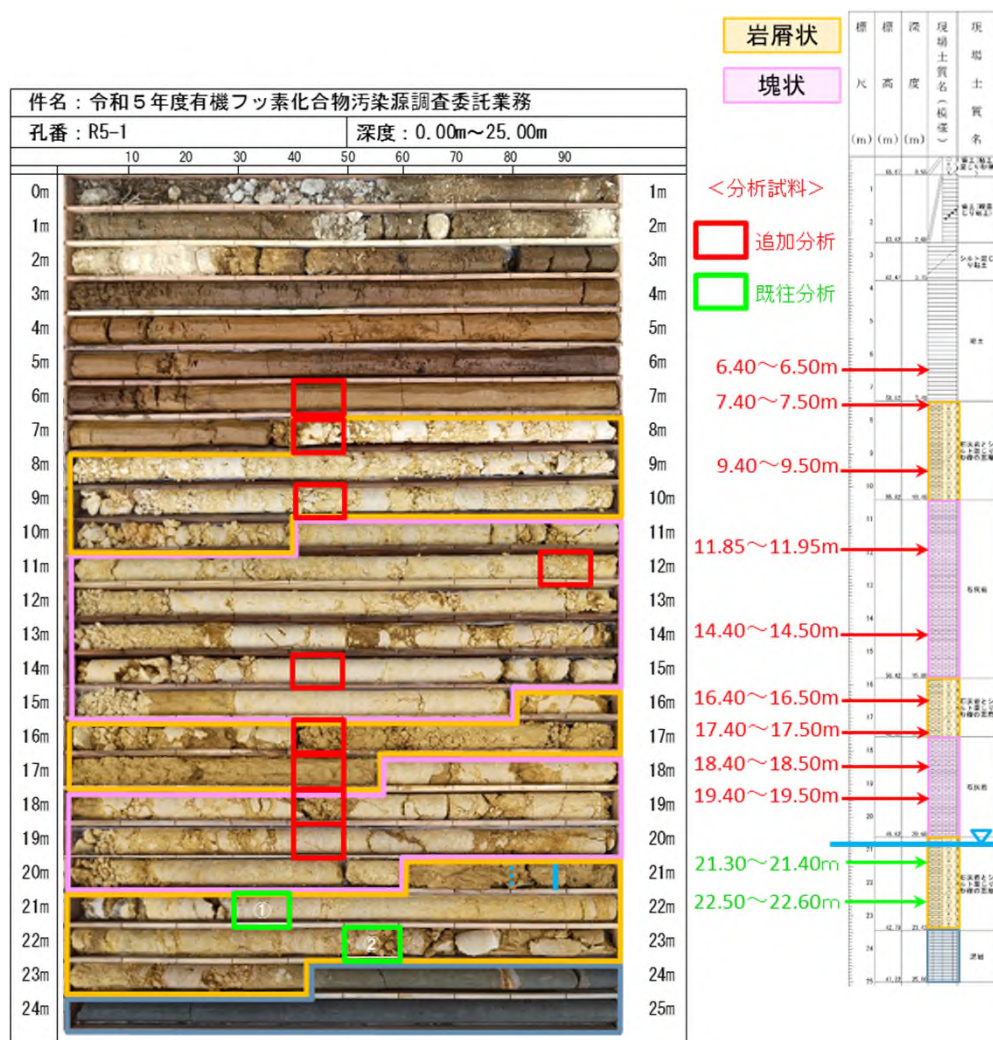
※ 強熱減量550°C・4時間による測定結果を示す。

PFOS等を検出

2-2. 各種試験・分析の結果

◆R5-1孔の石灰岩試料 深度方向の追加分析結果(PFOS等含有量)

- ✓ 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。
- ✓ 粘土層から地下水位までPFOS等濃度は低下するが、地下水位以深で濃度が上昇する。



採取深度 (GL- m)	種類	PFOS			PFOA			PFHxS			6:2FTS ng/g	4物質 合計 ng/g	有機物 含有量 [※] %
		合計 ng/g	直鎖 ng/g	分岐 ng/g	合計 ng/g	直鎖 ng/g	分岐 ng/g	合計 ng/g	直鎖 ng/g	分岐 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

※ 強熱減量550℃・4時間による測定結果を示す。

PFOS等を検出

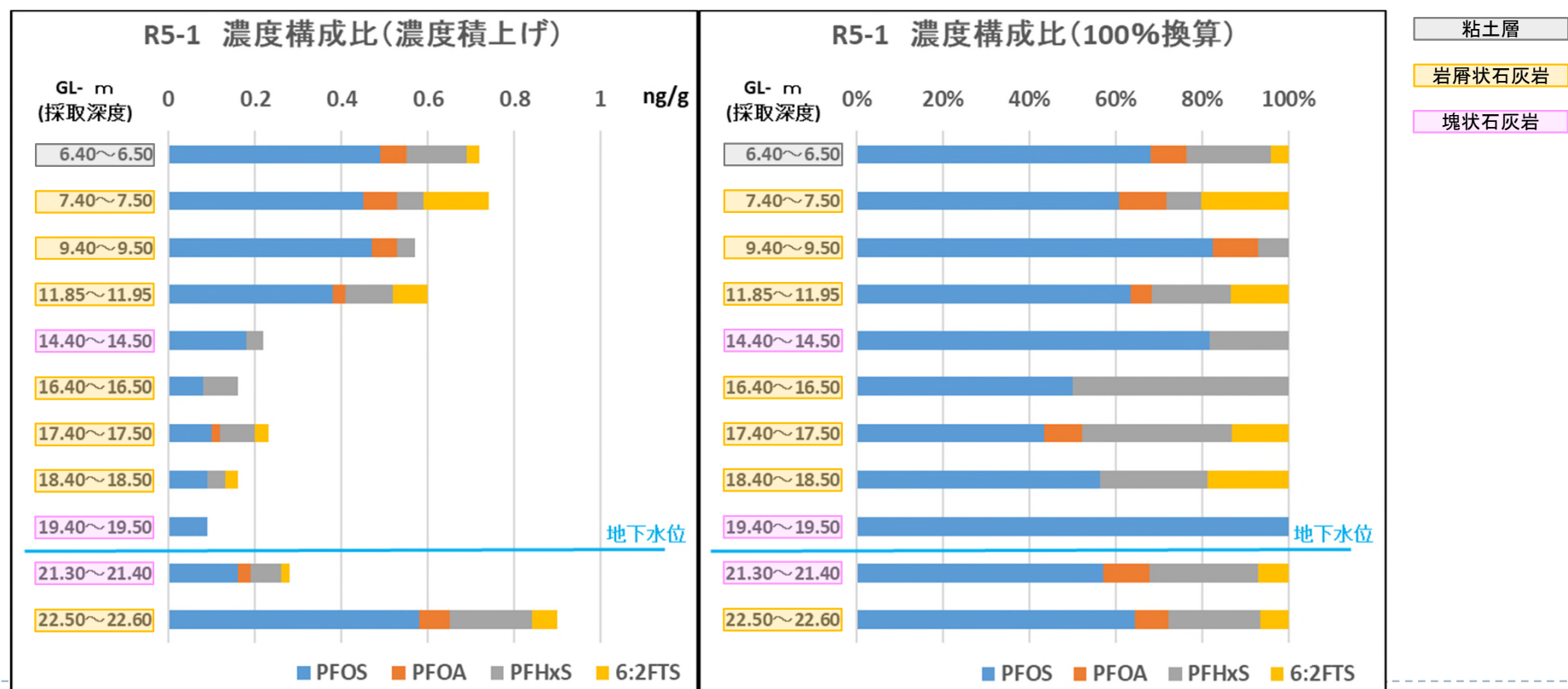
【今後の課題】

地表から地下水(石灰岩中)へのPFOS等の地下浸透の可能性について、普天間飛行場内も含め、石灰岩上位の粘土層の層厚や分布状況を把握する必要がある。

2-2. 各種試験・分析の結果

◆R5-1孔の石灰岩試料 深度方向の追加分析結果(PFOS等含有量)

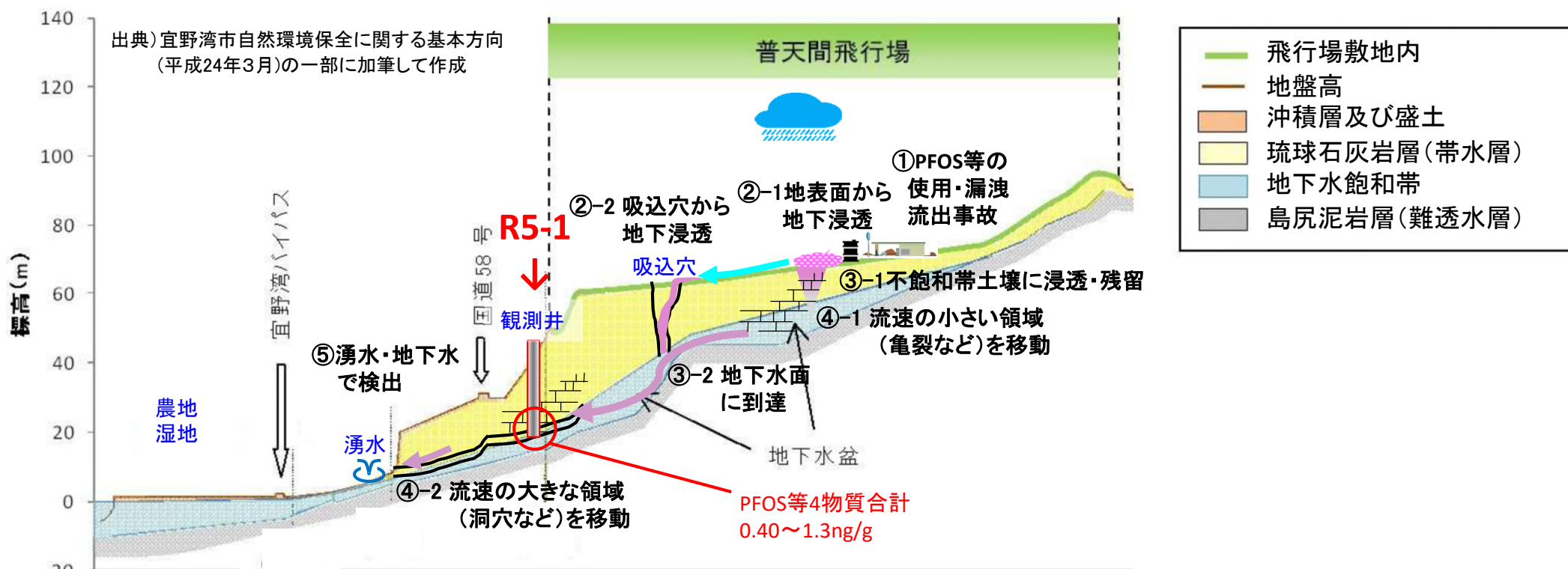
- ✓ 地下水位以浅の「GL-6.4~-6.5m」から「GL-19.4~-19.5m」まで、PFOS等濃度は低下しているが、地下水位以深の「GL-21.3~-21.4m」及び「GL-22.5~-22.6m」では濃度が上昇する。
- ✓ 「GL-21.3~-21.4m」と「GL-22.5~-22.6m」の濃度構成比は同じであるが、地下水位以浅と比べると濃度構成比が異なるため、地下水位以深の石灰岩が上流側から流れ込むPFOS等を含む地下水に浸ることにより、当該の石灰岩の間隙等にPFOS等が残留していた可能性が考えられる。



2-2. 各種試験・分析の結果

◆R5-1孔で検出されたPFOS等の要因

- ✓ R5-1孔の石灰岩（地下水位以深）でPFOS等が0.40～1.3ng/gで検出した要因として、普天間飛行場内で地下浸透したPFOS等が地下水と共に飛行場下流側へ流下し、石灰岩に残留したためと推定される。
- ✓ 塊状より岩層状の石灰岩の方が粘土分や有機物含有量が多く、PFOS等が残留しやすいと考えられる。



2-2. 各種試験・分析の結果

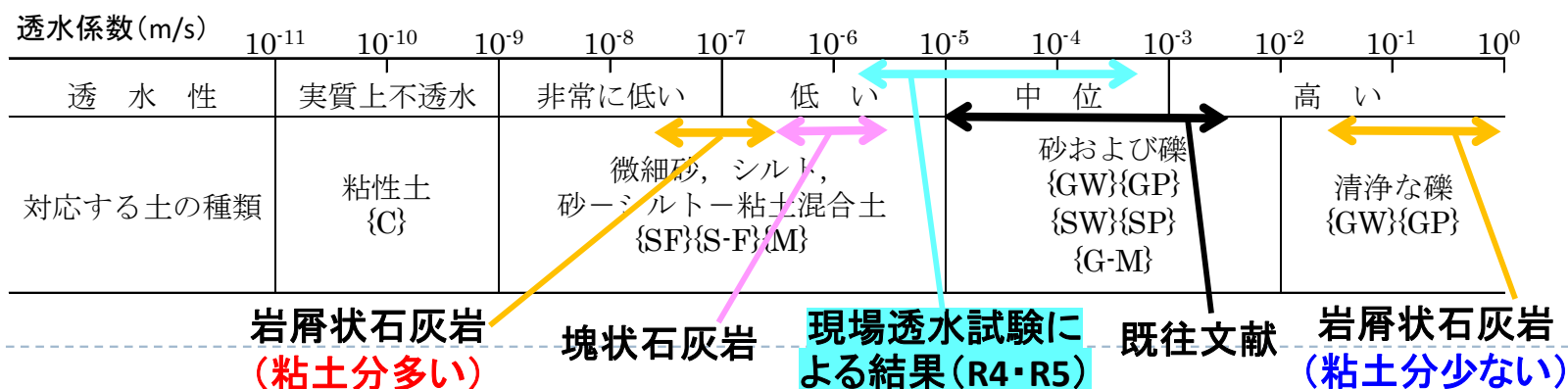
◆石灰岩の透水性に関する試験結果

- ✓ 既往文献値の透水係数 ($10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/s}$) と比べ、粒度試験や室内透水試験での透水係数 ($10^{-8} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ ないし $10^{-2} \sim 10^0 \text{m/s}$) は3オーダー程度の差がある結果となったが、現場透水試験からの透水係数 ($10^{-6} \sim 10^{-4} \text{m/s}$) は1オーダーの差でより既往文献値に近い結果が得られた。

対象	透水係数 (m/s)					方法
	R4-2	R4-3	R4-4	R5年度結果		
岩層状石灰岩 粘土分多い試料 粘土分少ない試料	3.24×10^{-8}	2.89×10^{-7}	2.01×10^{-7}	-	-	室内透水試験
	1.80×10^{-2} 以上	1.80×10^{-2} 以上	3.00×10^{-8}	-	-	粒度から推定※1
	1.80×10^{-2} 以上	1.80×10^{-2} 以上	1.80×10^{-2} 以上	-	-	
塊状石灰岩	3.50×10^{-6}	8.74×10^{-7}	3.55×10^{-7}	-	-	室内透水試験
岩層状～塊状 石灰岩	—	5.53×10^{-6} 1.70×10^{-6}	2.97×10^{-5} 2.18×10^{-5}	- 4.37×10^{-4}	- 4.82×10^{-4}	現場透水試験※2
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

※1: 粒度試験から得られた20%粒径(D20)からクレーガーの表を用いて透水係数を推定

※2: 観測井戸での揚水による試験(上段に定常法による結果、下段に非定常法による結果)

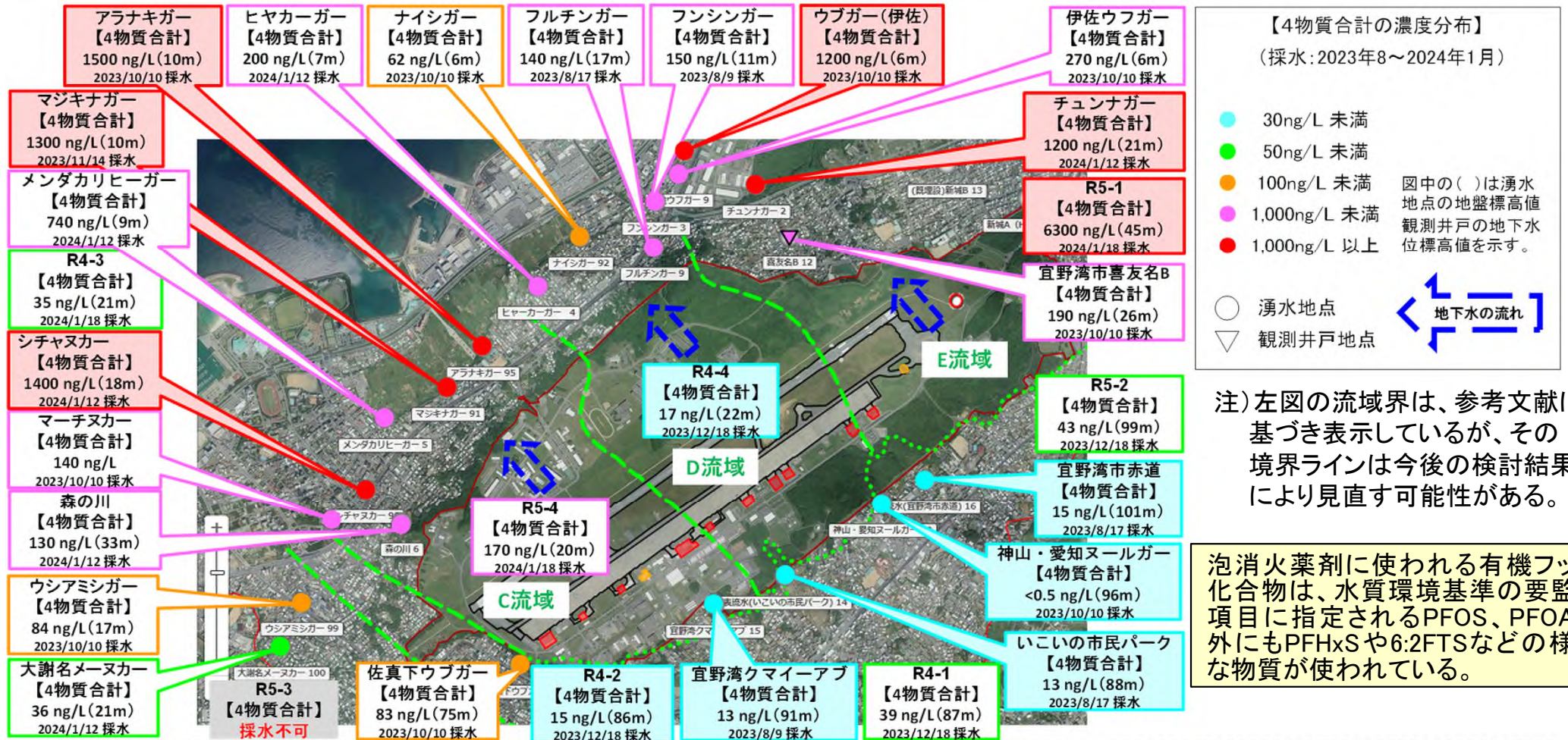


3. PFOS等の定期モニタリング結果

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等(4物質の合計値)の濃度分布(2023年8月~2024年1月採水)

✓ 普天間飛行場周辺の上流側は50ng/L未満、飛行場内を經由した後の下流側のC流域とE流域では1,000ng/L以上の濃度で検出する地点が分布している。

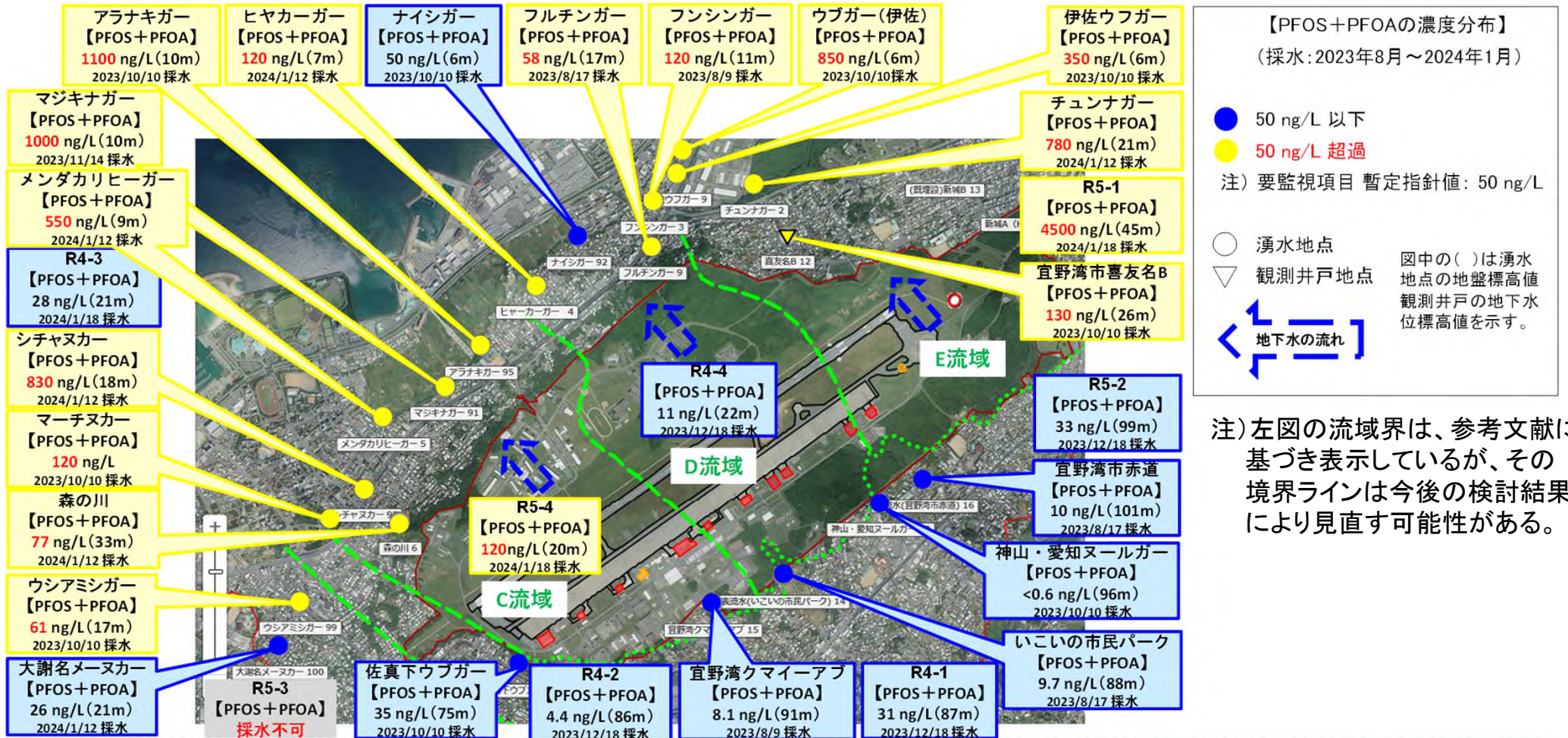


地理院地図を加工して作成

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS+PFOAの濃度分布(2023年8月~2024年1月採水)

✓ 普天間飛行場周辺の上流側で50ng/Lを超過する地点は確認されないが、一部の地点を除き、下流側では50ng/Lを超過する地点が確認される。

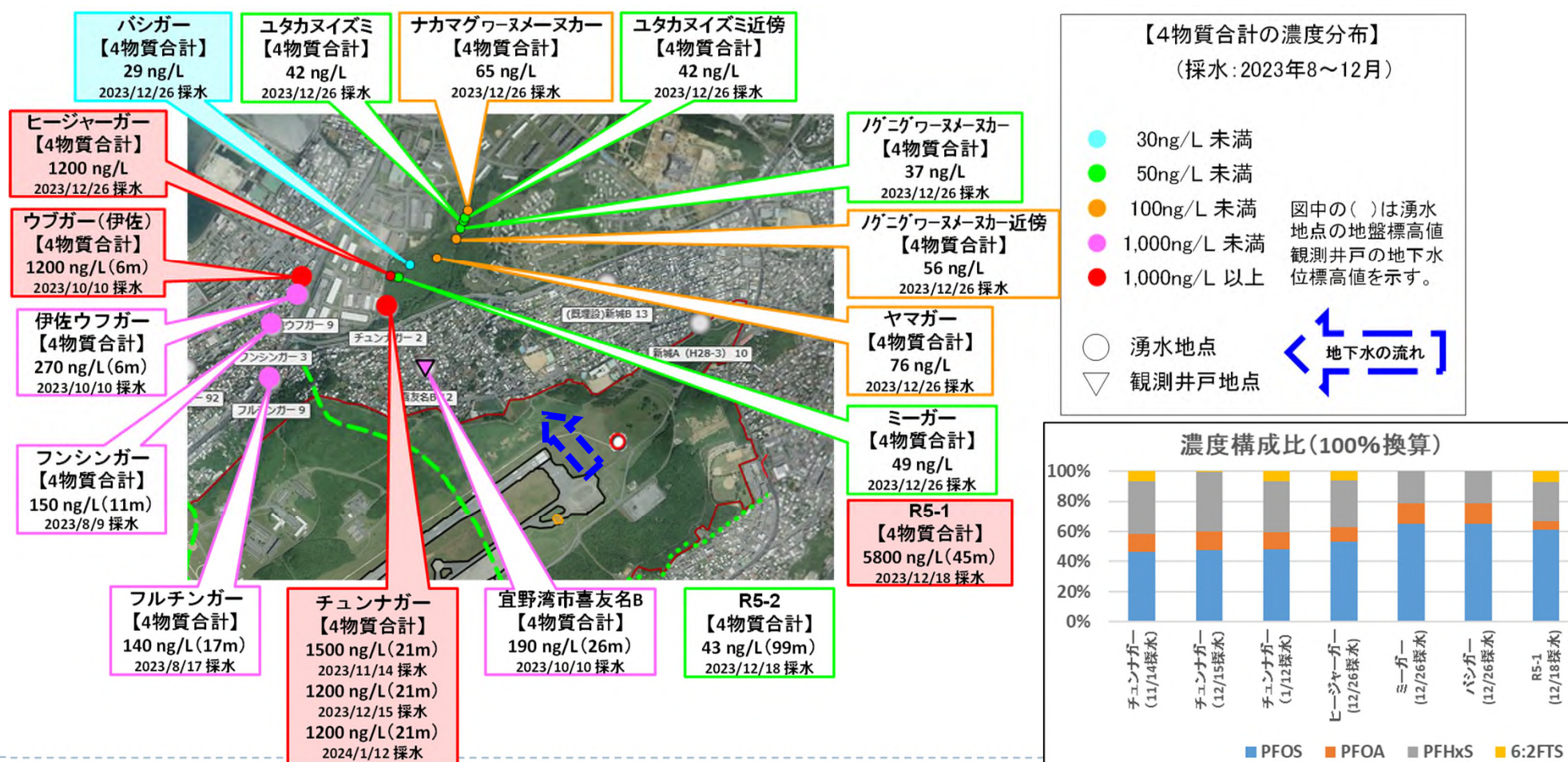


地理院地図を加工して作成

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆E流域でのPFOS等(4物質の合計値)の濃度分布(2023年8~12月採水)

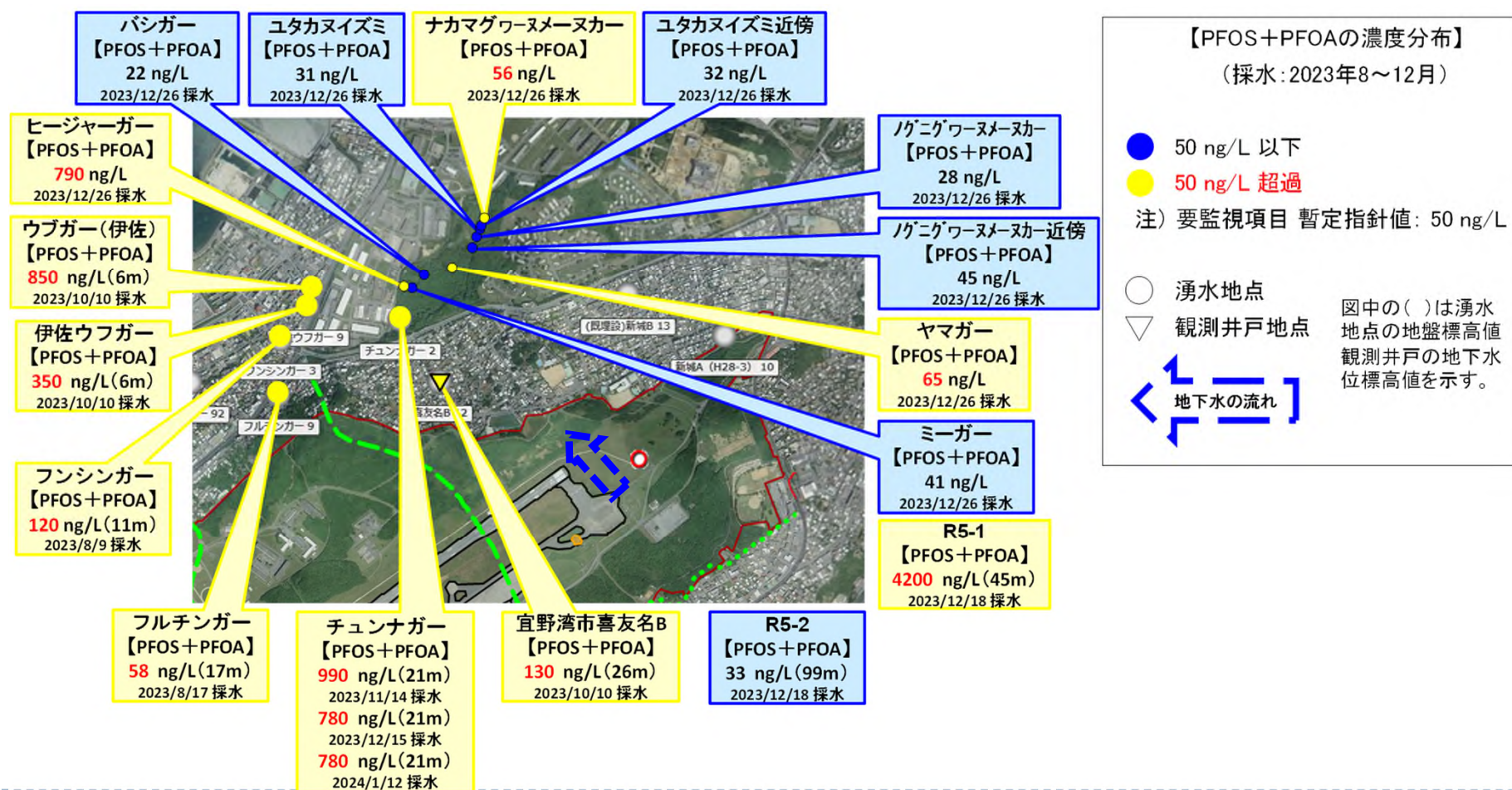
- ✓ チュンナガーと同様に1,200ng/Lの濃度を示す湧水を西普天間内のヒージャーガーで確認、チュンナガーやR5-1孔同様の構成比を示すため、上流側のR5-1孔を経由した湧水と推定される。
- ✓ 西普天間内のその他北東側の湧水は、100ng/L未満の濃度で分布していた。



3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆E流域でのPFOS+PFOAの濃度分布(2023年8~12月採水)

- ✓ チュンナガーと同様に790ng/Lの濃度を示す湧水を西普天間内のヒージャーガーで確認。
- ✓ 西普天間内のヤマガーとナカマグウメーヌカーでも50ng/L以上の濃度を示すが、その他の湧水は50ng/L以下の濃度で分布していた。

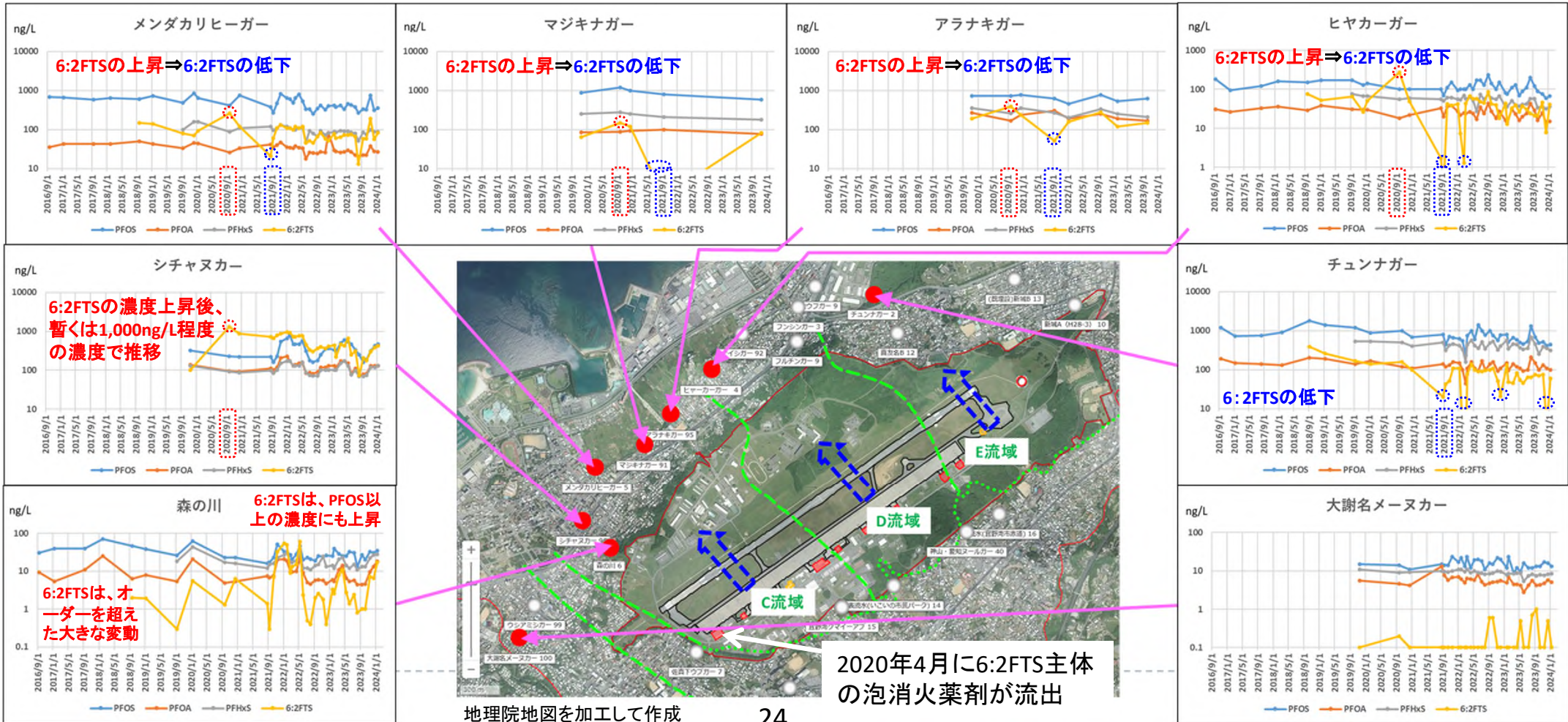


3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等の経時変化(下流側の湧水)

注)2016年からの継続した経時変化を把握するため、2016年から測定している直鎖体のみの濃度をもとに経時変化を作成(分岐異性体は含まず)

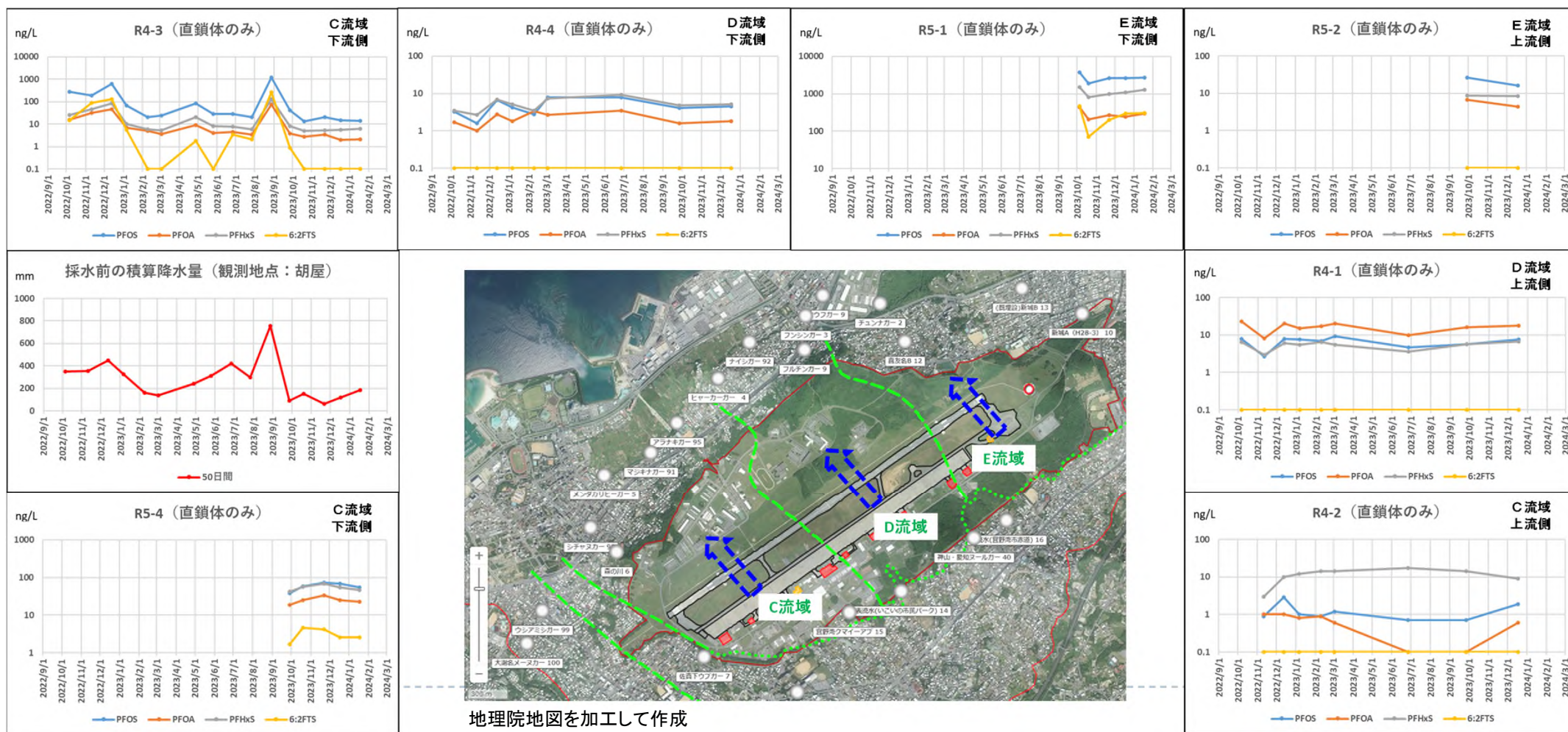
- ✓ オーダーをまたぐ濃度変動を示す6:2FTSと比べ、PFOS、PFOA、PFHxSは濃度変動が小さく、経時的な変化は認められるものの概ね一定の濃度で推移。
- ✓ C～D流域の下流側の複数地点では2020年9月に6:2FTS濃度の上昇、2021年9月には低下を確認。D～E流域では2022年1～2月に一時的な6:2FTS濃度の低下を確認。



3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等の経時変化(観測井戸の地下水)

- ✓ R4-3孔の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性を示し、オーダーをまたぐ範囲で濃度の上昇・低下を繰り返す傾向がある（降水量：増加 ⇒ PFOS等濃度：上昇）。
- ✓ 普天間飛行場周辺のボーリング地点における地下水のPFOS等濃度は、ほとんどの地点で概ね一定の濃度で推移しているが、今後データを蓄積して変動傾向の把握が必要である。

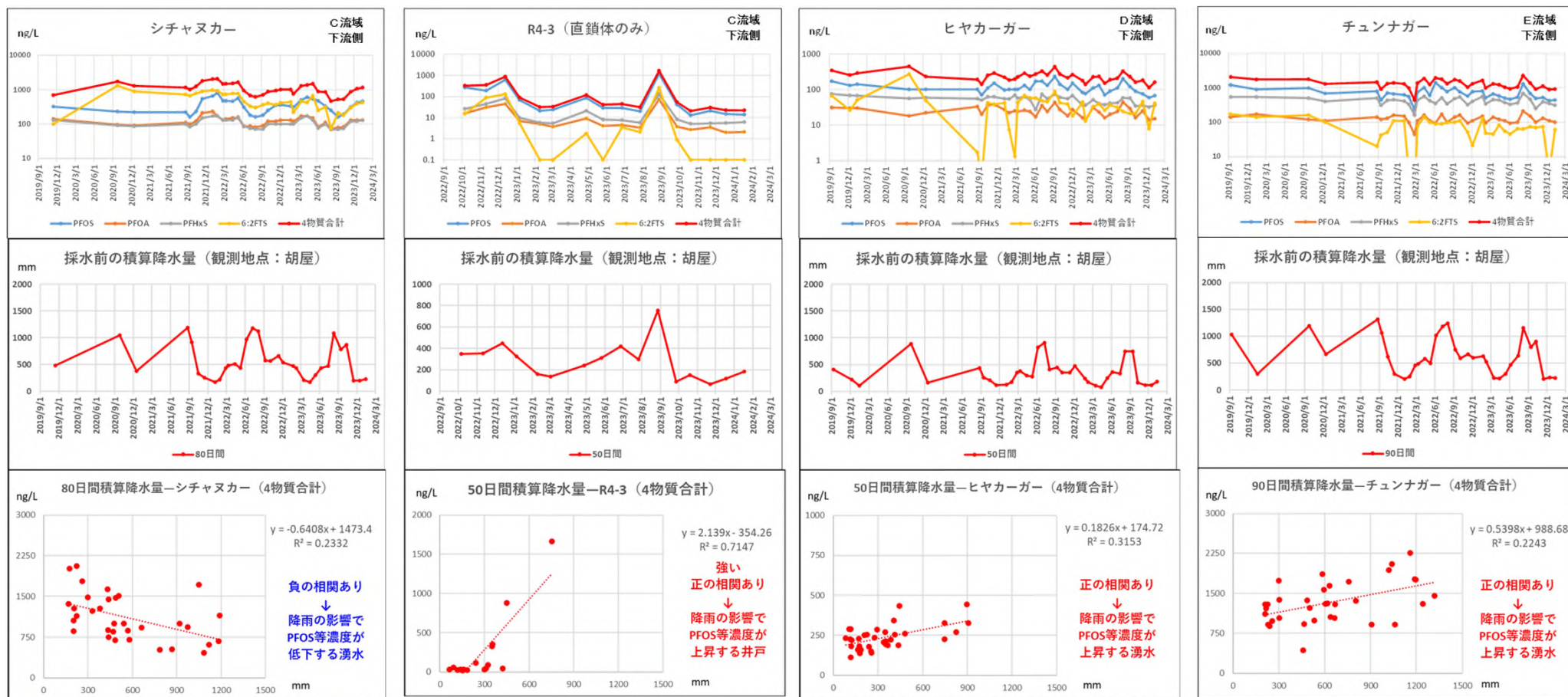


地理院地図を加工して作成

3-2. PFOS等濃度の特徴

◆積算降水量とPFOS等濃度の相関関係

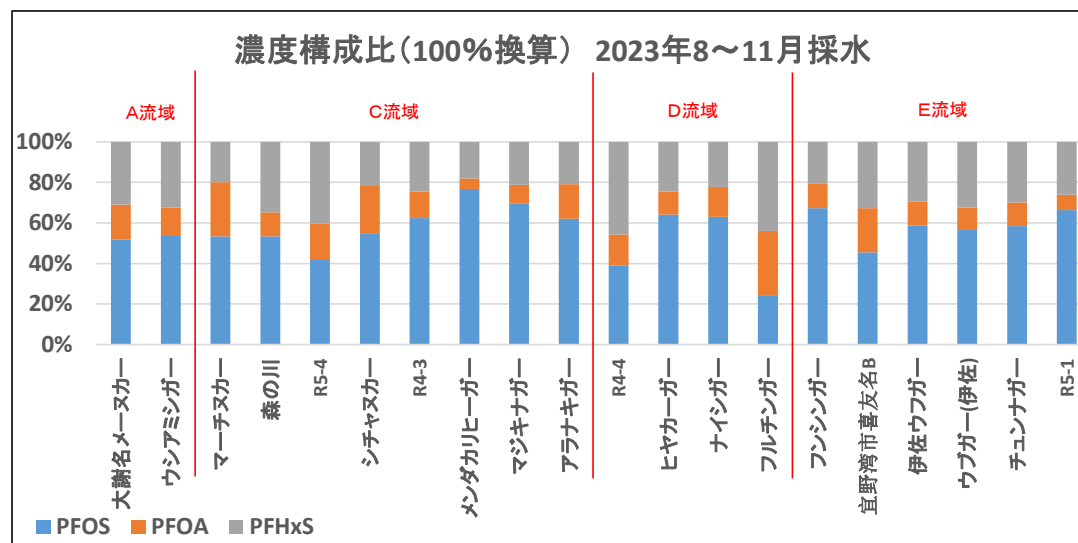
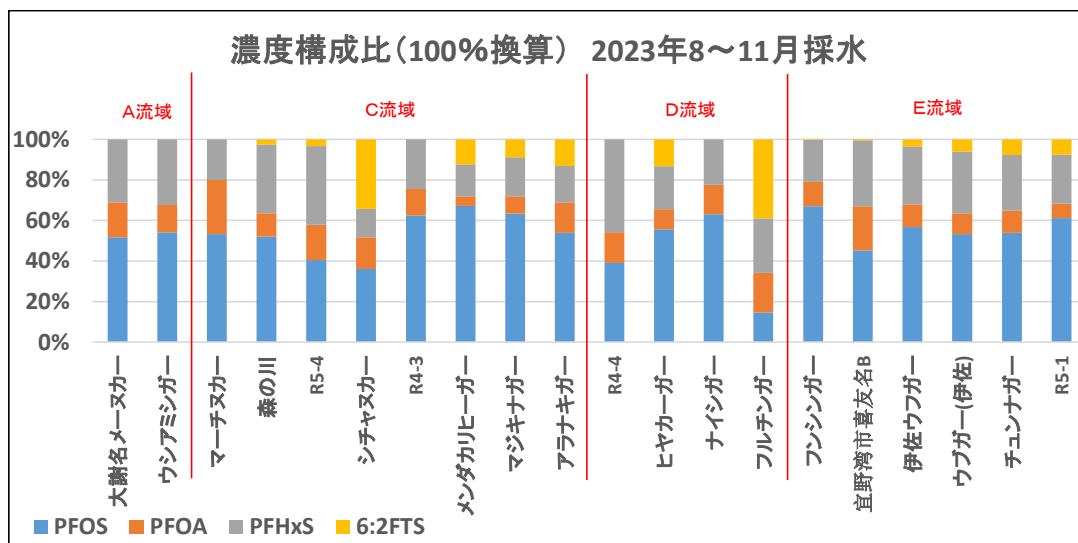
- ✓ 地点毎にPFOS等濃度の変動は、採水前50～90日間の積算降水量に相関する傾向がある。
- ✓ 下流側では、降雨の影響でPFOS等濃度が上昇する地点(汚染源経由の雨水が流込み易い)、と低下する地点(汚染源経由の雨水が流込み難い)が認められる。



3-2. PFOS等濃度の特徴

◆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、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。
- ✓ 森の川の6:2FTSを除く3物質の構成比は、西側のウシアミシガーに類似するが、上流側に汚染源が存在するため（6:2FTSが継続して検出）、4物質の構成比では異なる。
- ✓ 喜友名B～フンシンガーは類似した構成比を示し、現地形を見る限り、喜友名B⇒フンシンガーへ地下水が流下している可能性がある。
- ✓ R5-1孔～伊佐ウフガー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。



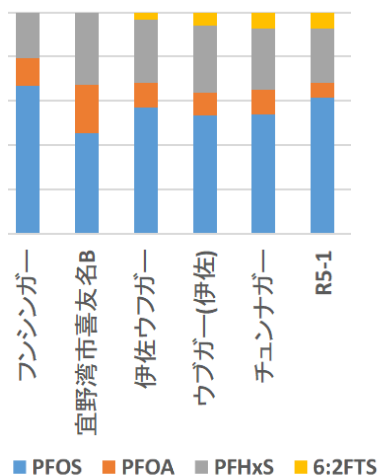
4. 汚染源特定に向けた課題に対する令和5年度の検討結果

4-1. モニタリング結果とPFOS等使用箇所との関連

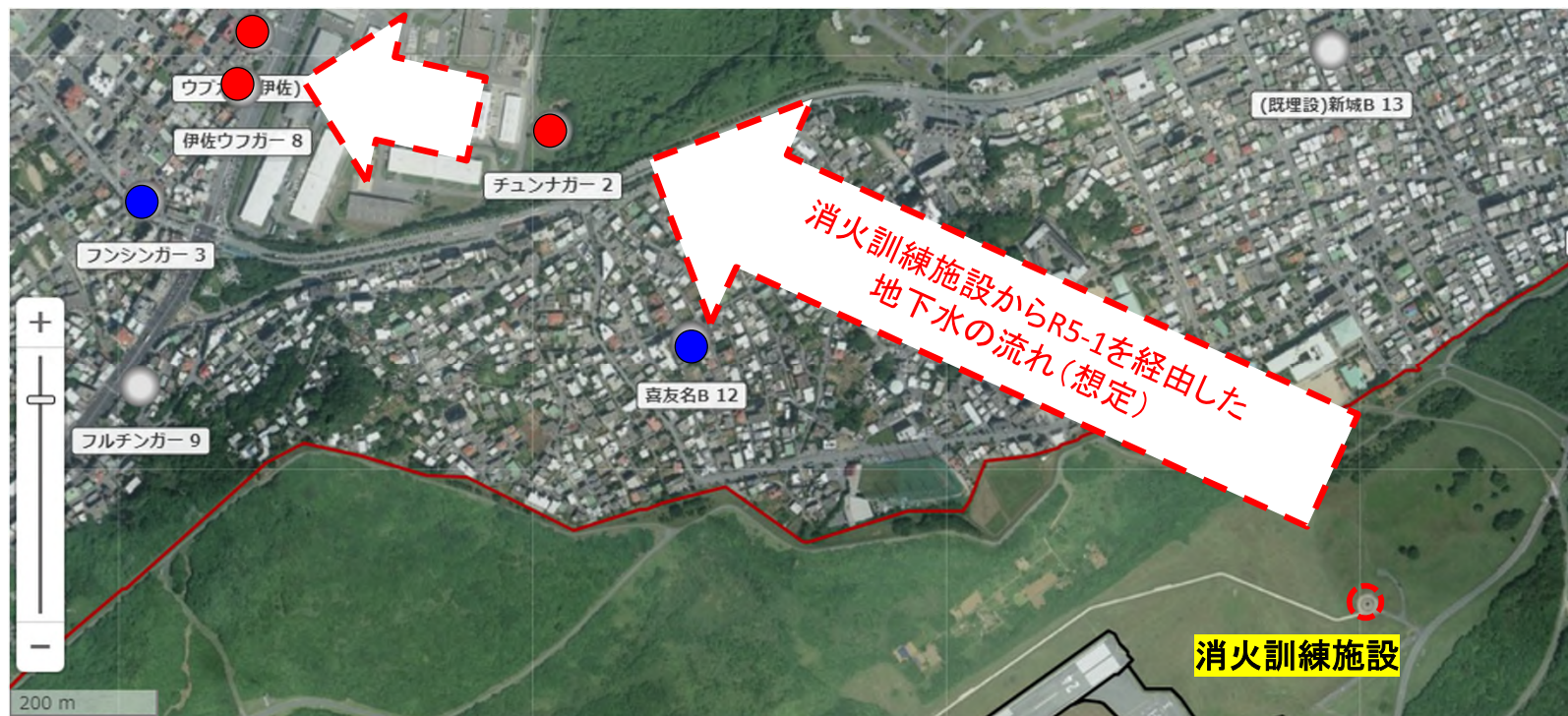
◆ 消火訓練施設の下流側でのPFOS等濃度 (E流域)

- ✓ 消火訓練施設の下流側地下水であるR5-1孔において、6,300ng/LのPFOS等を確認。
- ✓ 下流側の湧水に向かうにつれ、チュンナガー、ウブガー(伊佐) または伊佐ウフガーと濃度が低下する。
- ✓ 構成比はPFOSが主体で6:2FTSも含む。下流側へ向かうにつれ、6:2FTSの割合が低下する傾向がある (喜友名BはPFOAの割合が多く、R5-1孔とは異なる系統と推測される)。

PFOS等4物質の構成比



注) 表記したPFOS等の構成比は2023年10月に採水した結果を示す。但し、フンシンガーはデータがないため、2023年8月に採水した結果を示している。



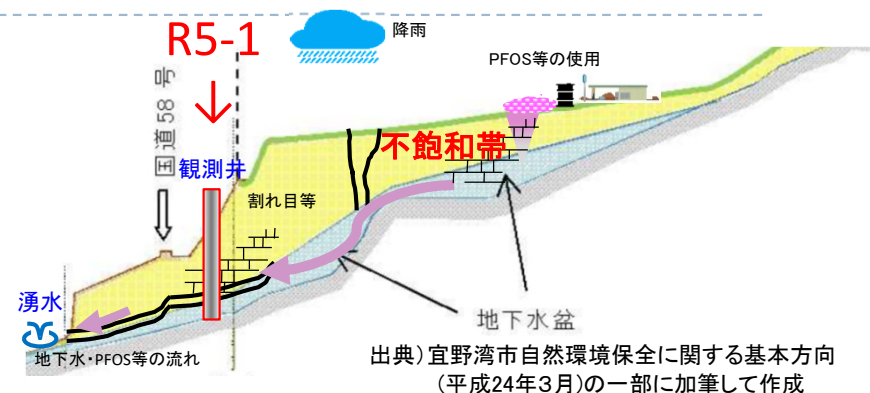
(出典: 地理院地図に加筆)

PFOS、PFOA、PFHxS、6:2FTSの4物質合計濃度

4-1. モニタリング結果とPFOS等使用箇所との関連

◆PFOS等の長期検出の要因

- ✓ 泡消火薬剤等に含まれるPFOS等が、**不飽和帯土壌に残留**しており、特に降雨や地下水位の上昇等の際にPFOS等が継続的に溶出する可能性が考えられる。
- ✓ 最近の既往研究にて、**不飽和帯でのPFASの残留**が指摘されている。



下流側湧水～飛行場の断面図

対象箇所	推定される現象	海外の参考事例
飛行場内のPFOS等の使用や漏洩箇所直下の不飽和帯土壌	<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。 	<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。 (出典：ハーバード大学所属のBridgerほか、2023) ✓ 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。 (出典：ニューカッスル大学所属のBekeleほか、2020)

不飽和帯：地下水面以浅の土壌

飽和帯：地下水面以深の土壌

4-2. シミュレーションを活用した地下水流動の検証

◆地下水流動シミュレーションの目的と評価対象（令和5年度）

【目的】

2次元で作成した流線網では評価できない深さ方向の地下水流動も考慮して、普天間飛行場周辺全域の大局的な地下水流動を検証する。

実測値とシミュレーション結果を比較し、これまでの調査結果の整合性の検討や、次年度に向けた効果的な調査地点の検討にも活用する。

【使用した主なデータ】

- ・地表標高
- ・石灰岩層上面標高
- ・島尻泥岩層上面標高
- ・地下水位（観測井戸）
- ・現場透水試験値
- ・年平均降水量（設定：2,000mm）

【使用したプログラム】

MODFLOW-USG（開発：米国地質調査所）

Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu, and Hughes, J.D., 2013

◆留意点

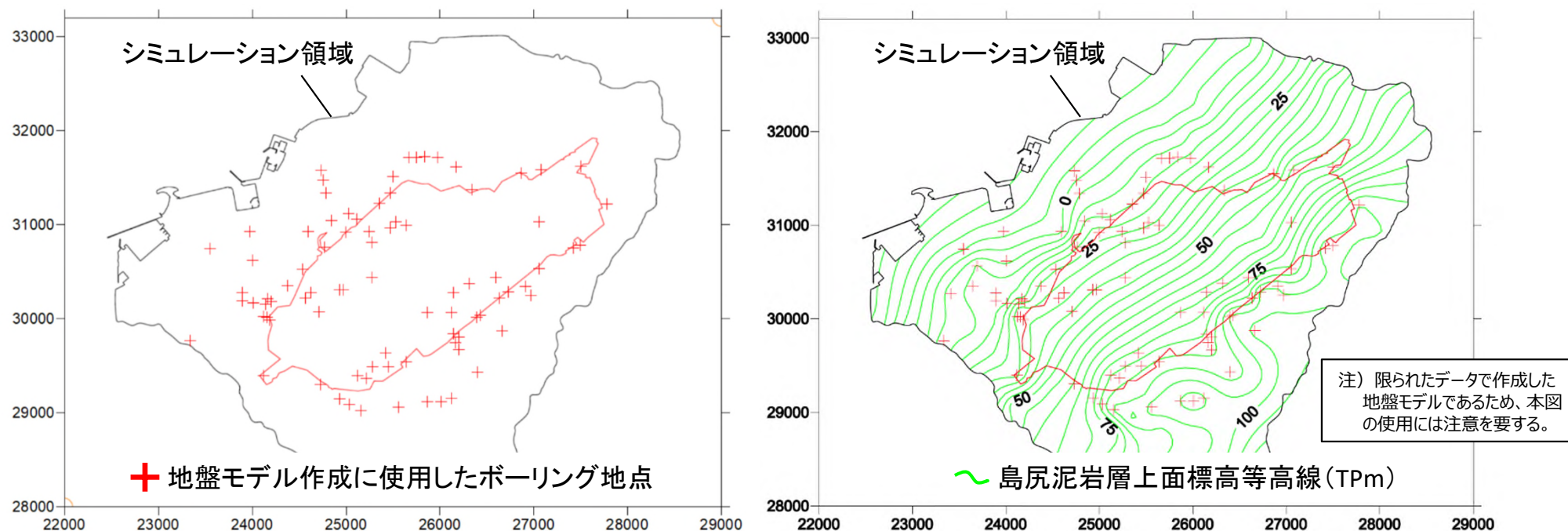
- ・定常条件での解析とした。
- ・石灰岩中の亀裂や流域界等の微地形は設定しない。
- ・PFOS等濃度は再現対象としない。

4-2. シミュレーションを活用した地下水流動の検証

◆地盤モデルの作成

- ✓ 地盤モデルは、主に下記のデータを使用して作成した。
- 地表面形状：国土地理院 基盤地図情報（数値標高モデル）DEM5 A・DEM5B
- 地質の情報：普天間飛行場内外の87地点のボーリング柱状図※
- 地層の区分：表層粘性土層、石灰岩層、島尻泥岩層の3層

※ ボーリングデータが無い場所では石灰岩層、島尻泥岩層の上面標高が地表面と整合するように、周辺のボーリングデータや「平成28年度米軍基地地図情報データベース化業務 地下水基盤面等高線図（沖縄県）」を元に補正

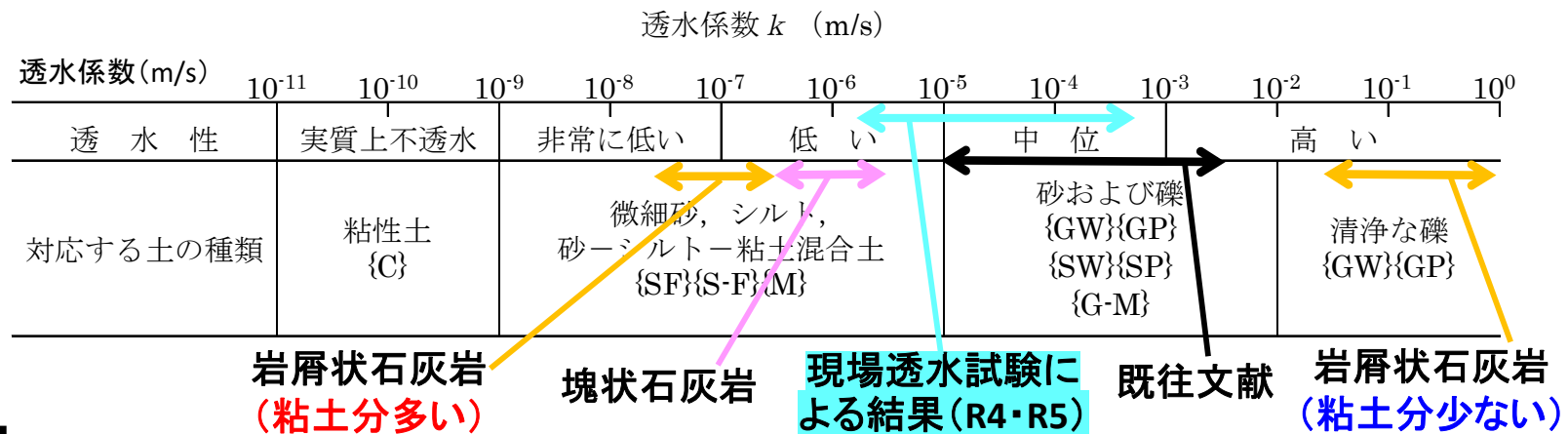


4-2. シミュレーションを活用した地下水流動の検証

◆ 主なパラメーター

【石灰岩層の透水係数】

- ✓ 解析で使用する透水係数は、現場透水試験値 ($10^{-6} \sim 10^{-4} \text{m/s}$) をもとに設定した。
 - ・水平方向の透水係数 $\Rightarrow K_x = K_y = 10^{-4} \text{m/s}$
 - ・鉛直方向の透水係数 $\Rightarrow K_z = 10^{-4} \text{m/s}$
- ✓ 透水係数を1オーダー上下させる感度解析を行った結果、地下水流速は変化した、地下水の流れのパターンに影響する変化は認められなかった。なお、異方性を考慮するために $K_z = 10^{-5} \text{m/s}$ のケースも行ったが、地下水面の形状に違いは認められなかった。



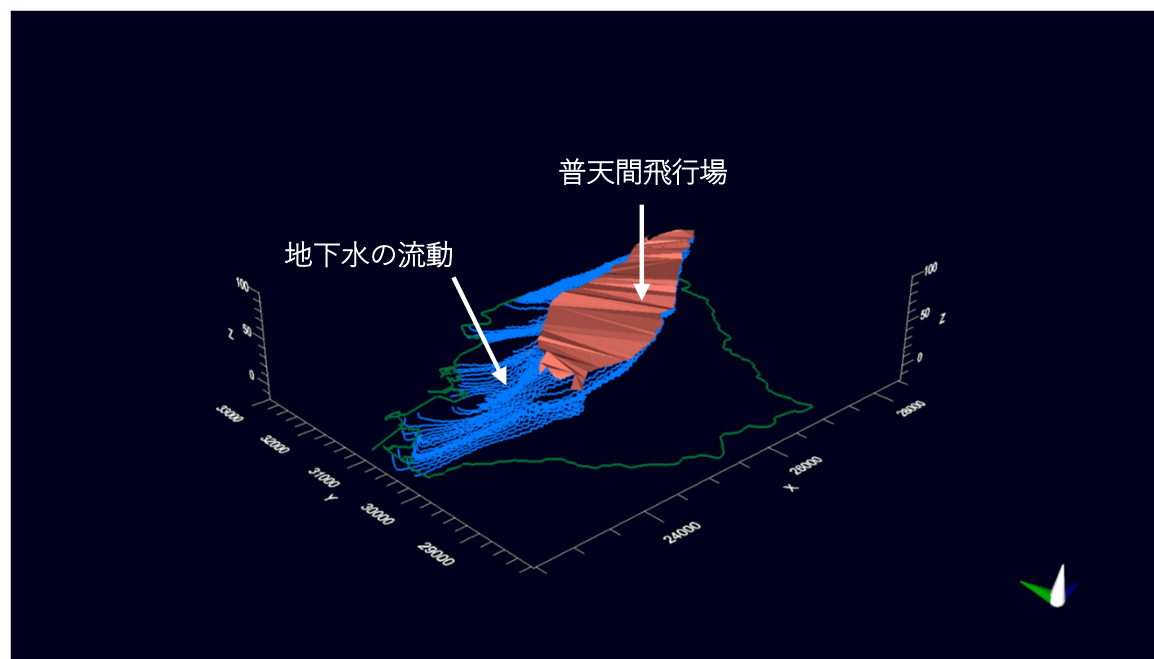
【涵養量】

- ✓ 年間100mmの降水（年間降水量2,000mmの5%）が地下水に涵養すると仮定した。
- ✓ 涵養量をキャリブレーション・パラメーターとすることで地下水位が大きく変化するが、南東（山側） \Rightarrow 北西（海側）へ向かう地下水の流動状況に変化はなかった。

4-2. シミュレーションを活用した地下水流動の検証

◆地下水面の解析結果

- ✓ 地下水面は、南東（山側）⇒北西（海側）に向かって傾斜しており、概ね地表面や島尻泥岩層上面形状と一致した勾配を示した。
- ✓ 涵養量の最適値は、110mm/year となった。
- ✓ 飛行場より地下水下流側の観測井戸では、地下水位標高の観測値と計算値の差が8~22m程度あり、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。



地下水流動の三次元イメージ図

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

◆汚染源の特定条件①～④の評価(令和5年度の総括)

- ✓ 汚染源の特定条件とした①～④については、令和5年度までの調査で概ね把握済みである。
- ✓ 令和6年度では②および③の条件について、データの補完や精度の向上を図る調査を行う。

⇒【課題1-2】【課題2】【課題3】

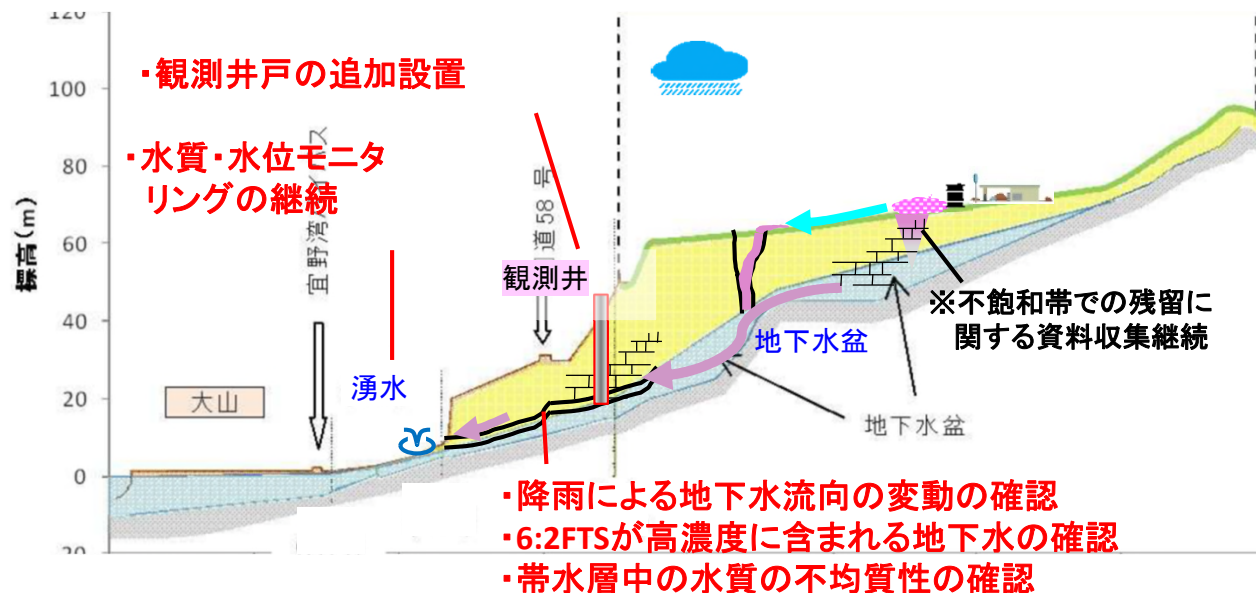
汚染源特定に向けて明らかにする項目		令和6年1月までの状況	今後の事業期間で把握すべきデータ
①	PFOS等の使用・保管・漏洩の履歴がある。	✓ 普天間飛行場で履歴あり (令和3年度の資料調査)	✓ 把握済み (今後、新たな情報が得られれば追加検討)
②	飛行場の地下水上流側のPFOS等濃度は指針値未満、地下水下流側のPFOS等濃度は下流側湧水と同レベルで検出される。	✓ 地下水上流側のR4-1、R4-2、R5-2孔 ⇒指針値未満 ✓ 地下水下流側のR4-3、R5-1孔※ ⇒1,000ng/L以上(最大6,300ng/L) ※ E流域の飛行場直近で湧水の最大濃度の3倍以上を上回る地下水を確認	✓ 概ね把握済み ✓ 調査密度が少ないエリアでの地下水の水質調査を行い補完(C流域・アラナキガー、マジキナガー上流側) ⇒【課題1-2】 ✓ R5-1孔～チュンナガー・西普天間地区での地下水の水質調査(E流域) ⇒【課題3】
③	地下水の流れが南東⇒北西方向以外には無いことを示すことができる	✓ 飛行場北西側の地域の地下水は、 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	✓ 概ね把握済み ✓ 地盤モデルの精度を向上させ、地下水流動を再検証(シミュレーション結果も活用) ⇒【課題2】
④	飛行場と観測地点との間に、PFOS等の地下浸透が生じるような土地利用がない。	✓ 飛行場～R4-3孔の間は主に住宅地、R5-1孔は飛行場直近に位置し、PFOS等の使用や埋設の履歴は確認されない。	✓ 把握済み (今後、新たな情報が得られれば追加検討)

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

◆ 汚染メカニズムの推定

- ✓ シチャヌカーで検出される6:2FTSの構成比が大きい地下水の移動経路を確認するため、R4-3～R5-4孔の間で調査を実施する。合わせて、琉球石灰岩を帯水層とする同一の地下水盆内の水質の違い、島尻泥岩層上面形状との関係を確認する。
- ✓ 降水直後の地下水位変動や、採水前の積算降水量とPFOS等濃度の変動傾向を把握するため、湧水・地下水のモニタリングを継続する（1時間毎～1週毎の採水なども検討）。

⇒【課題1-1】



出典) 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

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

◆シミュレーションにおける地盤モデルの精度向上

- ✓ 地下水位の実測値と計算値に差があるなど、今回実施したシミュレーション結果は定性的な結果となっている。
- ✓ 不足している地質情報（島尻泥岩層上面標高、帯水層の厚さ、石灰岩層の透水係数）の追加や既往調査結果を精査して地盤モデル精度の向上が必要である。

⇒【課題 2】

◆地下水流向とPFOS等濃度の整合性確認

- ✓ シミュレーションで消火訓練施設の地下水下流側と評価された、R5-1孔と西普天間地区の湧水では、PFOS等濃度に大きな差がある。
- ✓ R5-1孔とチュンナガー・西普天間地区の中間地点で、PFOS等濃度及び島尻泥岩層上面標高を確認し、地下水流向とPFOS等の検出状況、既往調査で想定されている等高線との整合性を確認する。

⇒【課題 3】

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

◆ 令和6年度の調査地点案



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

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

◆3カ年事業における令和6年度業務の位置づけ

- ✓ 水質・水位・地質等のデータを蓄積し、飛行場周辺における地下水濃度の把握、大局的な地下水流向の再検証、6:2FTSに着目した汚染メカニズムの検討を行い、**汚染源を特定**する。
- ✓ その結果を踏まえ、本事業終了以降の課題を整理する。

