

令和4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5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 専門家会議の構成.....	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
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.....	6
4.1 PFOS等の検出状況.....	6
4.2 地下水流向の推定.....	12
4.3 PFOS等の長期検出の要因.....	12
5. 汚染源特定に向けた今後の課題.....	13
5.1 汚染源の特定に向けた条件.....	13
5.2 令和5年度の調査方針.....	14

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

1. はじめに

1.1 専門家会議の趣旨及び目的

有機フッ素化合物の一つである 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 50ng/L (以下「暫定指針値」という) 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年度に専門家会議を設置し、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に向けて検討を行っている。

令和4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4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 専門家会議の構成

専門家会議は、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より成る委員をもって構成した。

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4年7月20日(水)	(1) 令和3年度の汚染源検討の結果概要 (2) 事業の基本方針 (3) 令和4年度の実施計画 (4) その他(今後の工程など)
第2回 令和4年11月4日(金)	(1) PFOS等 [*] の定期モニタリング結果 (2) 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要 (3) 汚染源の特定に向けた今後の検討項目と検討方針 (4) その他(今後の工程など)
第3回 令和5年2月3日(金)	(1) PFOS等 [*] の定期モニタリング結果 (2) 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要 (3) 汚染源特定に関する検討と今後の課題 (4) その他(有機フッ素化合物汚染に関する動向、今後の予定など)

※ 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き、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において、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された。

同飛行場周辺にPFOS等の排出源となる施設等は確認されず、現段階でPFOS等含有物の使用等が確認されたのは、同飛行場内における泡消火薬剤であると考えられるため、同飛行場内の泡消火薬剤に含まれるPFOS等が使用や漏洩等により地下水へ移動し、同飛行場北西側（地下水下流側）の湧水で暫定指針値（50ng/L）を大幅に超過して検出されていると仮定され、以下の①～④の汚染メカニズムが想定された。

① PFOS等による汚染発生

- ・普天間飛行場の格納庫や消火訓練施設でPFOS等の使用、漏洩、流出等が生じる（仮定）。

② 地下浸透

- ・環境中に放出されたPFOS等は地表水に含まれ、一部は地表面等や吸込穴（ポノール）から地下に浸透し、一部は河川等へ流出する。
- ・地表面から地下に浸透したPFOS等は、降雨の浸透と共に下方へ移動する。また、一部は不飽和帯（地下水面より上位の地盤）の間隙水中や土壤に吸着して残留する。
- ・吸込穴（ポノール）へ流入したPFOS等を含む表流水は、地盤中の亀裂・間隙へ浸透すると共に、表流水の一部は直接地下水面に到達する。

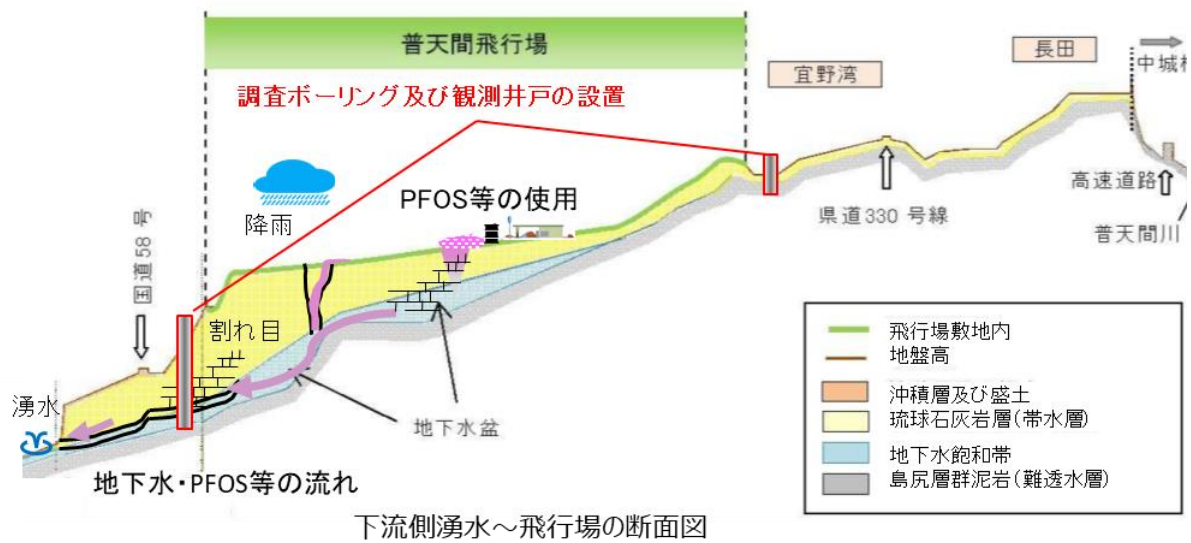
③ 地下水流動（飽和帯）

- ・地下水面に到達したPFOS等は地下水と共に飽和帯（地下水面より下位の地盤）を移動する。
- ・地下水流速の速い飽和帯に到達したPFOS等は、比較的短期間に下流側の湧水地点や地下水へ到達すると推定される。
- ・地下水流速の遅い飽和帯に到達したPFOS等は、年単位の長い時間をかけ下流側の湧水地点や地下水へ到達すると推定される。

④ 湧水・地下水（普天間飛行場北西側）

- ・湧水や地下水で暫定指針値（50ng/L）を超過したPFOS等が検出される。

前述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、普天間飛行場の地下水上下流で調査ボーリング及び観測井戸の設置を行い、汚染源の特定に関する検討を行った。



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 調査ボーリング及び観測井戸の設置位置

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4年度では図3.1に示すC流域とD流域の地下水の上流側に2地点、下流側に2地点の計4地点（R4-1～R4-4）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。

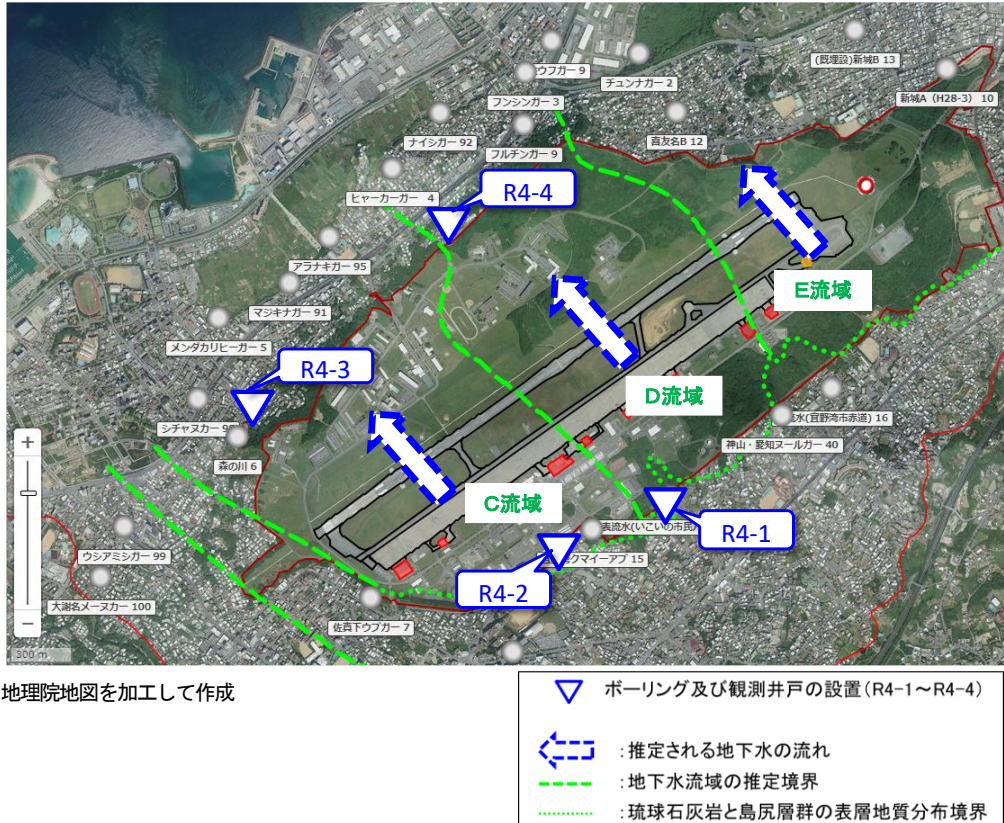


図3.1 調査ボーリング及び観測井戸の設置地点（令和4年度）

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	
R4-1	D流域 上流側	地 質	島尻泥岩上位に石灰岩は確認されず、粘性土と旧谷部の埋土が堆積
		地下水	粘性土上面まで水深4m程度で埋土層内に分布
R4-2	C流域 上流側	地 質	島尻泥岩上位に層厚2m程度の石灰岩（塊状）が分布
		地下水	島尻泥岩上面まで水深0.1m程度で石灰岩層下部（塊状）に分布
R4-3	C流域 下流側	地 質	島尻泥岩上位に層厚12m程度の石灰岩（塊状～岩屑状）が分布
		地下水	島尻泥岩上面まで水深2m程度で石灰岩層下部（岩屑状）に分布
R4-4	D流域 下流側	地 質	島尻泥岩上位に層厚23m程度の石灰岩（塊状～岩屑状）が分布
		地下水	島尻泥岩上面まで水深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

R4-1～R4-4 のボーリングで採取した琉球石灰岩をもとに、PFOS 等を対象とした分析を実施した。
また、石灰岩の透水性を確認するため、室内及び現場透水試験等を実施して透水係数を把握した。

(1) 石灰岩における PFOS 等の濃度

地下水表面以深の石灰岩から PFOS 等は検出されず、石灰岩等への吸着は確認されなかった(表 3.2 参照)。

表 3.2 石灰岩試料における PFOS 等の分析結果

定量下限値 0.5ng/g-dry

分析項目	単位	R4-1		R4-2		R4-3		R4-4	
		D流域上流側		C流域上流側		C流域下流側		D流域下流側	
		埋土上部	埋土下部	塊状石灰岩	岩層状石灰岩	塊状石灰岩	岩層状石灰岩	塊状石灰岩	岩層状石灰岩
PFOS	ng/g-dry	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PFOA	ng/g-dry	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PFHxS	ng/g-dry	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
6:2FTS	ng/g-dry	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

注) 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して行った。

(2) 石灰岩における透水係数

既往の文献資料等で提示されている透水係数($10^{-5} \sim 10^{-3}$ m/s)と比べ、室内透水試験等から得られた透水係数は3桁の差があるが、現場透水試験から得られた透水係数はより既往文献値に近い結果となり、琉球石灰岩の比較的現実的な透水係数と考えられる(表 3.3 参照)。

表 3.3 石灰岩の透水係数(室内及び現場透水試験等)

対象	透水係数 (m/s)	方法
岩層状石灰岩 (粘性土分多い)	$3.0 \times 10^{-8} \sim 2.9 \times 10^{-7}$	室内透水試験、 粒度から推定※1
岩層状石灰岩 (粘性土分少ない)	1.8×10^{-2} 以上	粒度から推定※1
塊状石灰岩	$3.6 \times 10^{-8} \sim 3.5 \times 10^{-6}$	室内透水試験
岩層状～塊状 の石灰岩	$1.7 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-5}$	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



粘性土分多く コア形状を保つ
粘性土分少なく 砂礫状に崩れる
岩層状石灰岩



固結し短棒状で採取される
塊状石灰岩

※1: 粒度試験から得られた 20% 粒径 (D20) からクレージャ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 (定常法及び非定常法による結果)

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 4 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 4 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 等が 1,000ng/L を超える濃度で検出される地点は、C 流域と E 流域に分布していた (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)。

(2) PFOS 等の経時変化と構成比 (湧水地点)

PFOS、PFOA、PFHxS は 6:2FTS と比べると濃度変動が小さく、経時的な変化は認められるものの概ね一定の濃度で継続して検出されている (図 4.3 参照)。

1 桁を超える濃度変動を示す 6:2FTS は、C 流域と D 流域の地下水下流側で 2020 年 9 月に濃度の上昇やその構成比が 2 倍以上に上昇、2021 年 9 月には低下したが、E 流域では特徴的な濃度の上昇や構成比の変化は確認されなかった (図 4.3～図 4.4 参照)。

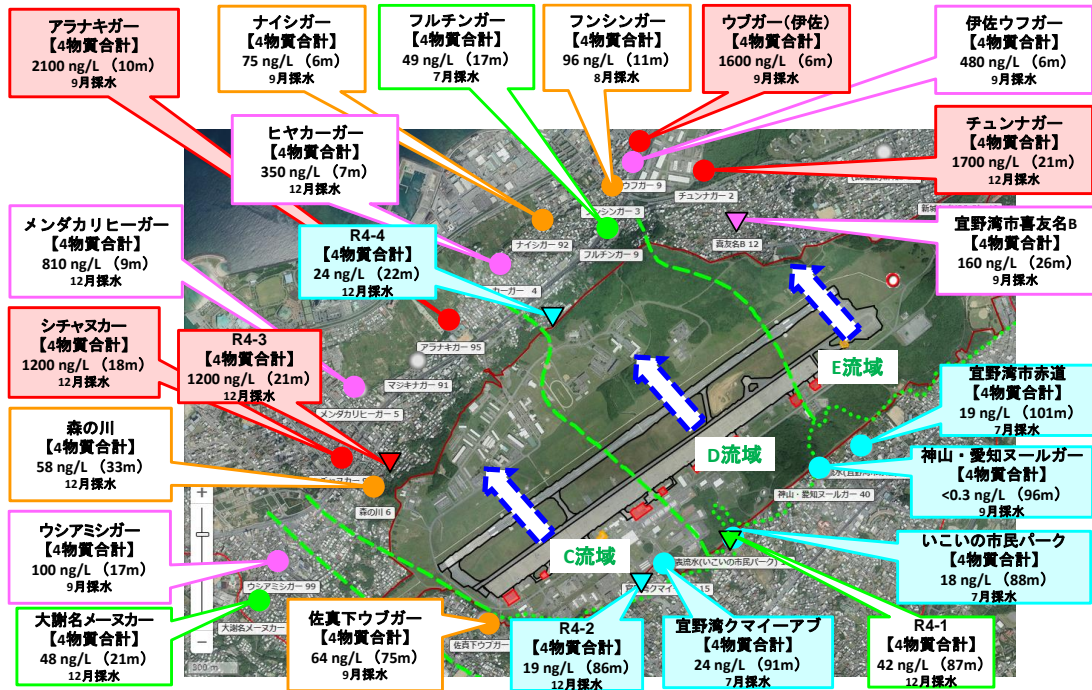
特に C 流域の「シチャヌカー」では 2020 年 9 月以降、4 物質の中で 6:2FTS の構成比が 70%以上と最も大きくなり、「森の川」では 2021 年 9 月～2022 年 6 月にかけて 6:2FTS の構成比が大きく変動していた。

なお、C 流域南西方の流域や C 流域における普天間飛行場の地下水下流側では、6:2FTS は検出されない又は一時的に検出されてもその構成比は 2%未満である。

(3) PFOS 等の経時変化と構成比 (観測井戸)

新設の観測井戸で最も高い濃度を示す R4-3 では、測定を開始した 2022 年 10 月から 12 月にかけて PFOS 等の濃度が 1,200ng/L まで上昇したが、2023 年 1 月には 130ng/L に濃度が低下した (図 4.5 参照)。

また、C 流域下流側の R4-3 では PFOS の構成比が 60%以上で検出、6:2FTS も検出しているが、C 流域上流側の R4-2 や D 流域上下流側の R4-1 と R4-4 では PFOS の構成比が 50%以下で検出、6:2FTS は不検出のため、R4-3 とは異なる構成比を示している (図 4.6 参照)。



地理院地図を加工して作成

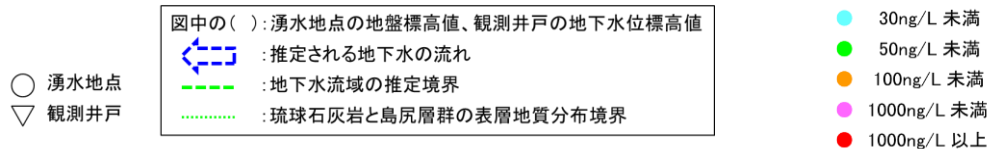
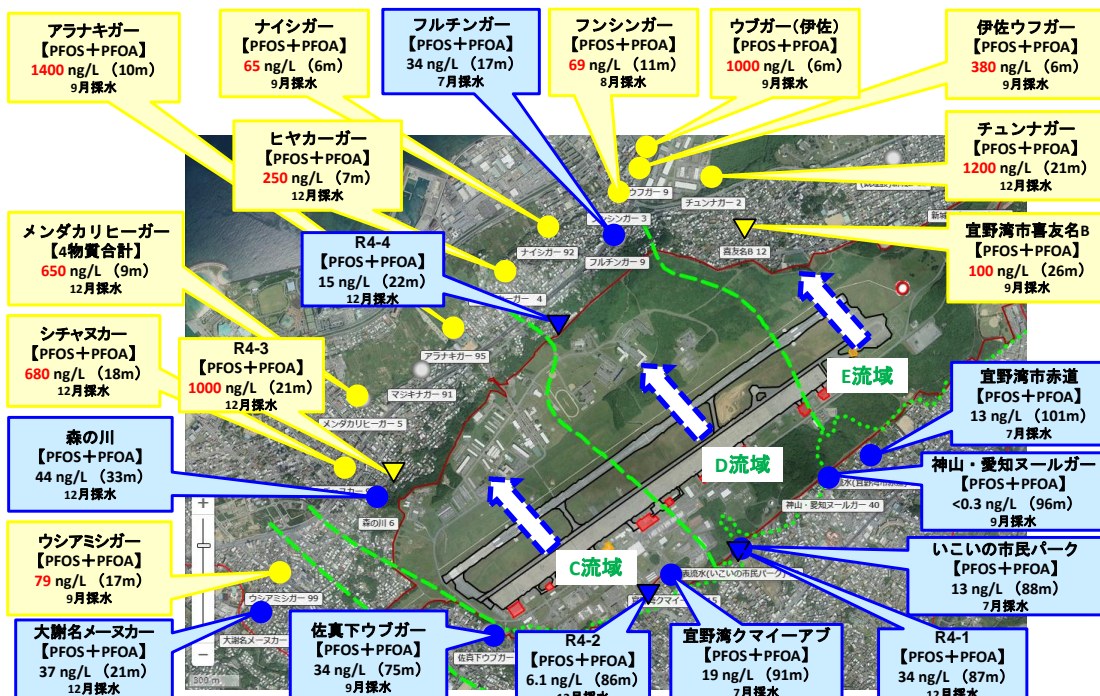


図 4.1 地下水流域界と PFOS 等 (4 物質の合計値) の濃度分布



地理院地図を加工して作成

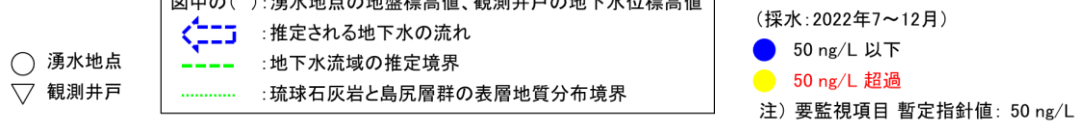


図 4.2 地下水流域界と PFOS 及び PFOA (2 物質の合計値) の濃度分布

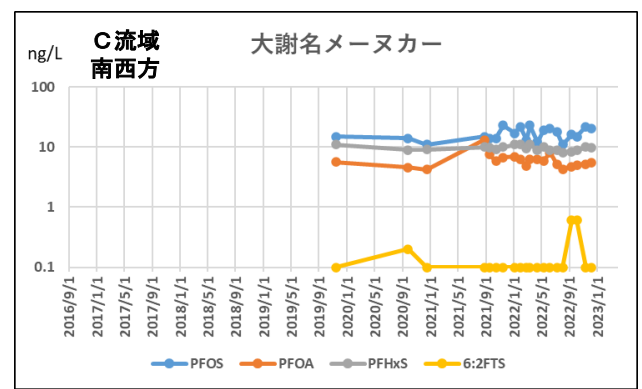
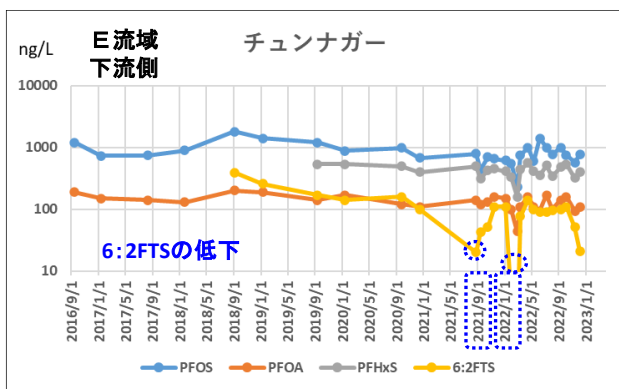
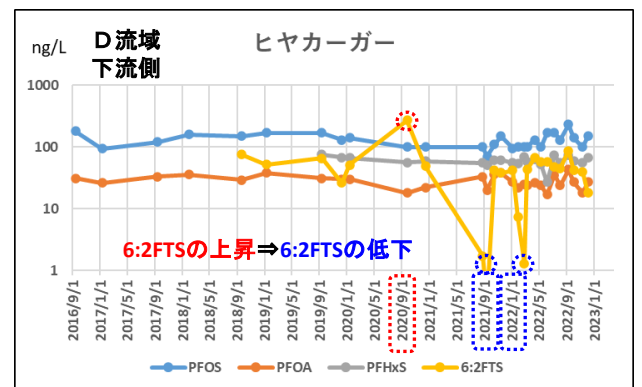
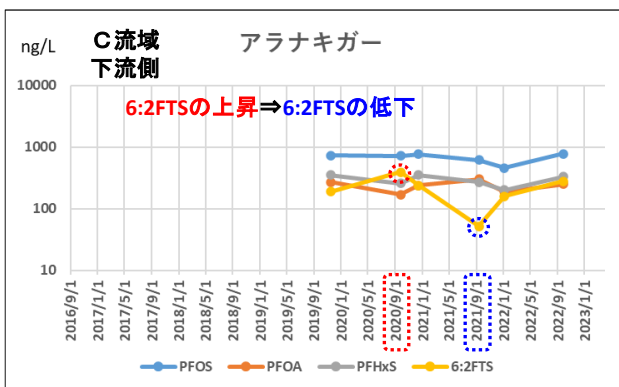
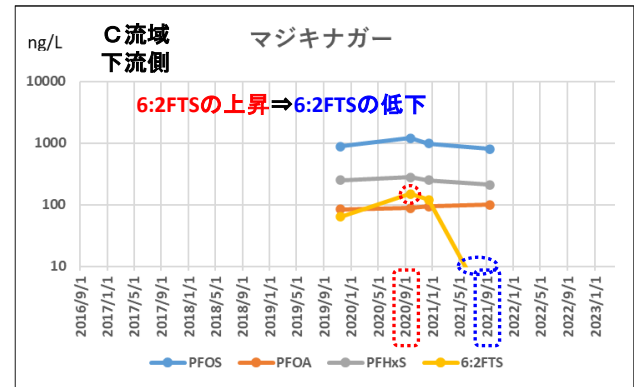
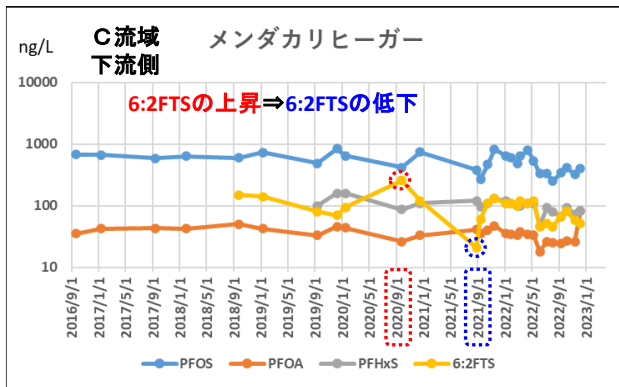
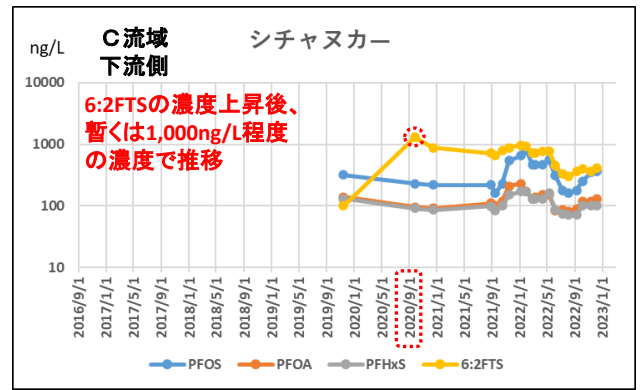
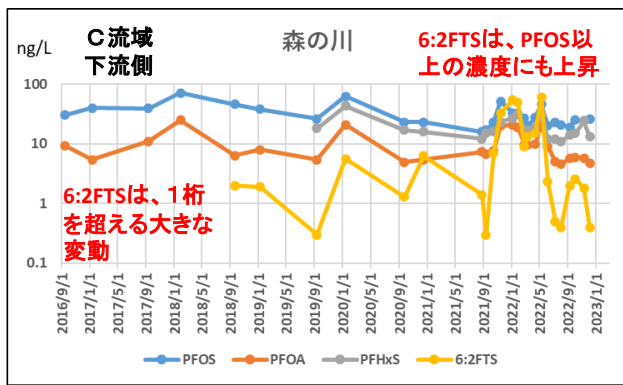


図 4.3 PFOS 等濃度の経時変化 (代表の湧水地点)

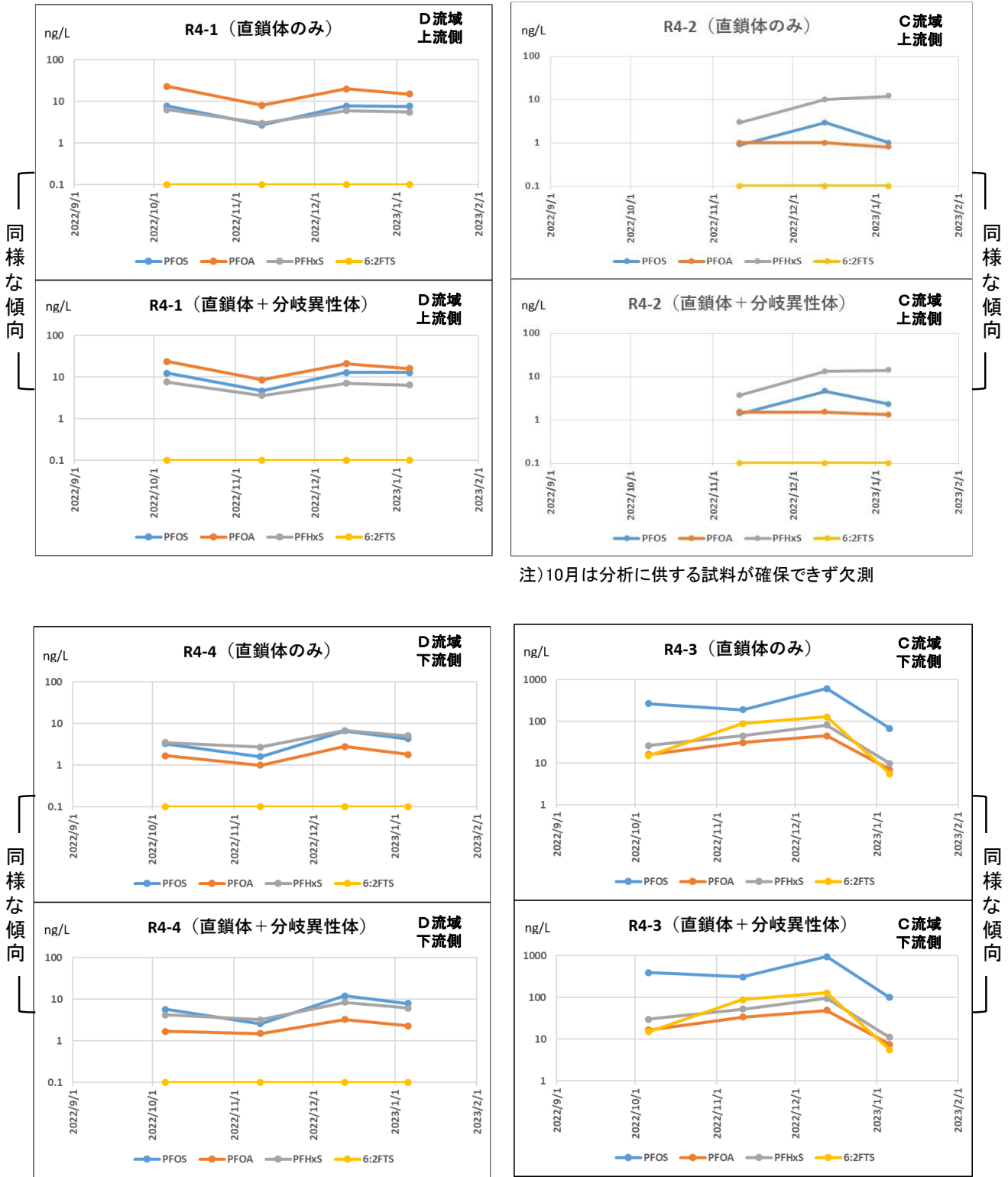
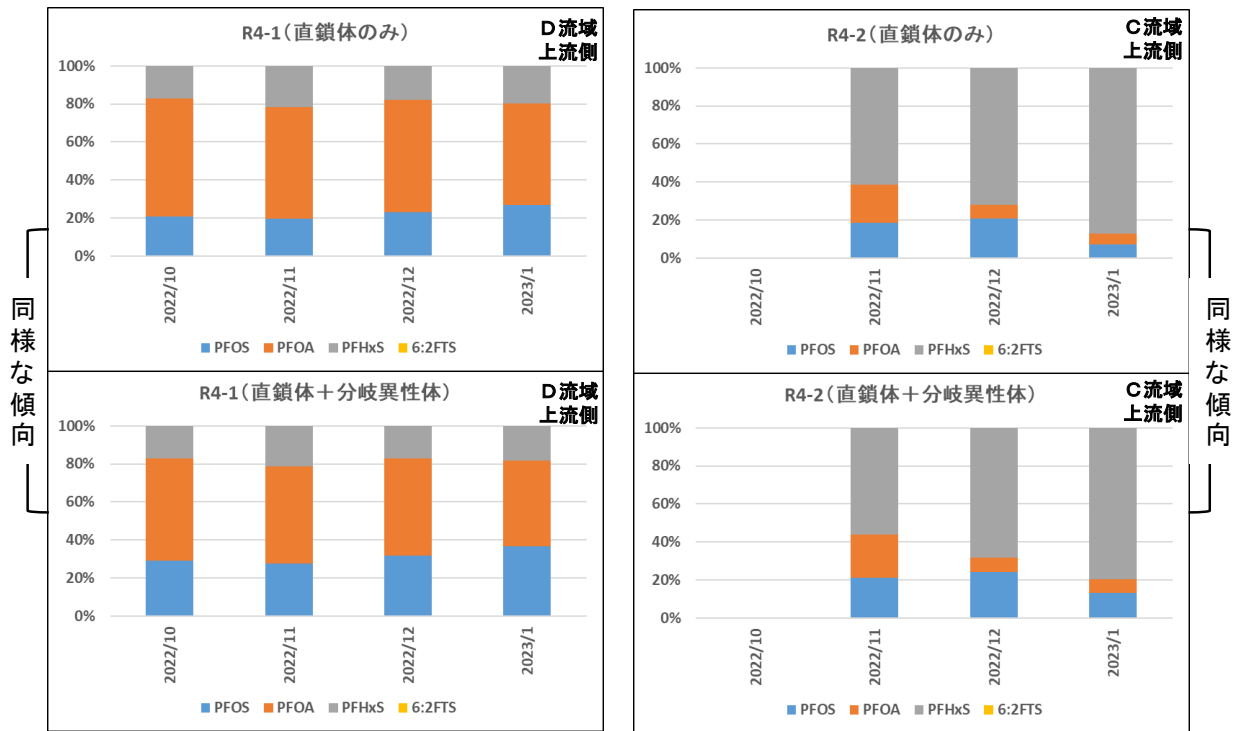


図 4.5 PFOS 等濃度の経時変化 (新設の観測井戸)



注) 10月は分析に供する試料が確保できず欠測

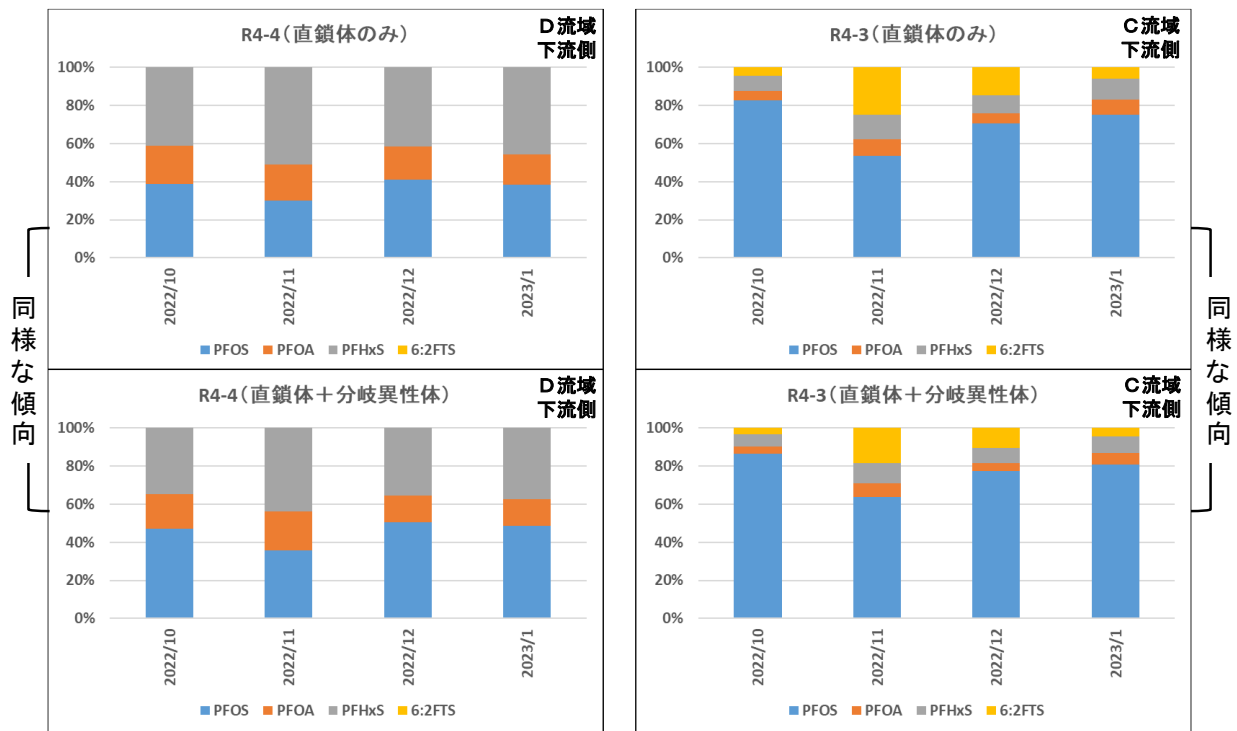
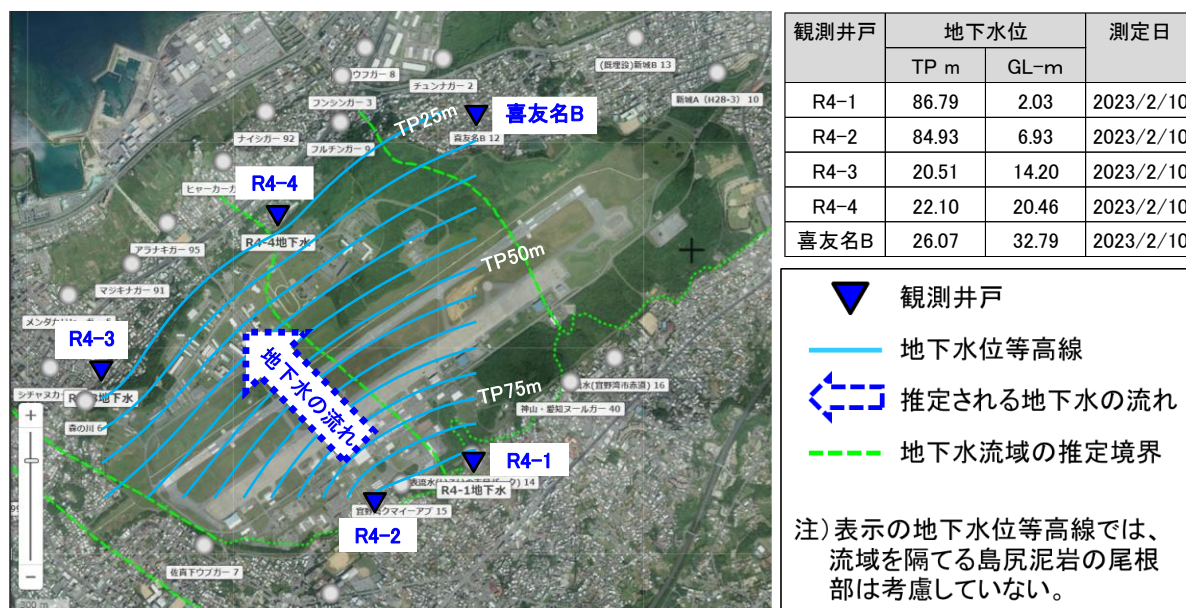


図 4.6 PFOS 等の構成比 (新設の観測井戸)

4.2 地下水流向の推定

普天間飛行場周辺の観測井戸（R4-1～R4-4、喜友名B）における地下水位データをもとに作成した地下水位等高線より、地下水は概ね南東⇒北西に向かう流れと推定される（図4.7参照）。



地理院地図を加工して作成

図 4.7 普天間飛行場周辺の地下水位分布図

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において、同飛行場の上流側と比べて高い濃度の PFOS 等が継続して検出しているため、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・整理を行ったが、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面以浅の土壌）に PFOS 等が残存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、地表から深さ数メートルまでの土壌に PFOS 等が長期間にわたり吸着し続けている。 ●不飽和帯に吸着した 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となるが、6:2FTS は比較的移動しやすいため、早期に地下水下流側の湧水で検出される。
根拠資料から得られた事項	<ul style="list-style-type: none"> ●オーストラリアの空軍基地における土壌調査の事例では、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。^{※1} ●62 サイトで実施した約 1400 地点の土壌分析結果を集計したところ、有機フッ素化合物は土壌中の空気-水界面に吸着し、深度方向に指数関数的に濃度が低下する。長鎖化合物（炭素数 7 以上）は地表面での濃度が高いが、短鎖化合物（炭素数 6 未満）は地下でも地表面と同程度の濃度で検出する傾向があった。^{※2}

※1) 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

※2) Brusseau et al.: PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites, 2020, *Science of the Total Environment*, 740: 140017

5. 汚染源特定に向けた今後の課題

令和3年度に開催した専門家会議では、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推定及び絞込みについて検討したが、汚染源の特定に向けては裏付けとなる科学的なデータが不足しており、地質や地下水位及び水質データを蓄積していくことが重要とされた。

そのため、令和4年度の専門家会議においては、同飛行場周辺の地下水流向把握に係る調査の追加や文献等情報の収集整理の結果をもとに汚染源の特定に向けた検討を行っており、より詳細な検討を行うため今後も引き続き地質や地下水位及び水質データを蓄積するとともに、シミュレーション等を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

汚染源の特定に向けた条件を表5.1に示すが、現段階では①～④の条件が揃うことを調査データ等で示すことができれば、汚染源の特定につながると判断される。

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・下流でPFOS及びPFOA濃度の差が有る。	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)	【課題1】 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。
③ 南東⇒北西方向以外の地下水の流れが無い。	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。 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。	【課題1】 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・流速の評価に努める。
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地点の間は、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。

5.2 令和5年度の調査方針

本事業は、令和4年度からの3年事業を予定しており、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目的となっていることから、本事業の2年目となる令和5年度については、下記の(1)～(2)で挙げた課題を中心とした調査及び検討を計画・実施していく方針である。

(1) 地盤・地下水の調査範囲の拡大【課題1】

普天間飛行場全域の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取得のために、**図5.1**に示すとおり調査密度が少ない流域の上下流側や側面部において、調査ボーリング及び観測井戸の設置を検討する。なお、必要に応じて島尻泥岩上面標高を詳細に確認する調査ボーリングの実施についても検討を行う。

同飛行場周辺における水質モニタリングを今後も継続して行い、PFOS等の濃度変動のデータを蓄積するとともにPFOS等の濃度や構成比から、降雨量、地下水位変動、PFOS等の使用状況との関連性を考察する。また、必要に応じて観測対象としていない新たな湧水地点や既設の観測井戸における水質調査の実施も検討する。

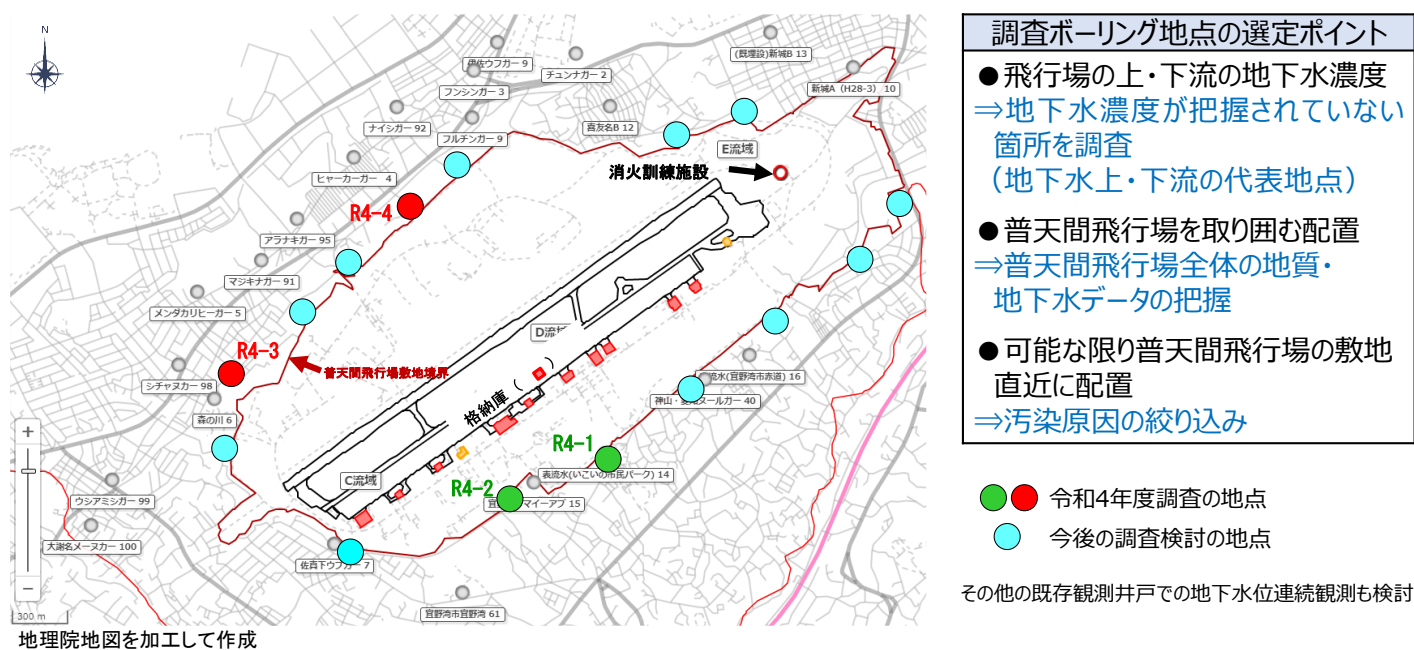


図5.1 調査ボーリング及び観測井戸の設置地点案

(2) シミュレーションによる地下水流動の評価【課題2】

資料調査や調査ボーリングで把握された地下水位、琉球石灰岩や島尻泥岩等の地盤情報をもとに地盤モデルを作成し、地下水流動シミュレーションを行うことで、飛行場内を含めた普天間飛行場周辺の地下水流向を推定して、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の検証に努める。

以上