

【Appendix 2】

【Appendix 5】

「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

事業総括報告書(令和4～6年度)

令和7年3月

沖縄県

< 目 次 >

1. はじめに	1
1.1 本事業の目的.....	1
1.2 本事業の概要.....	1
1.3 本事業の基本方針.....	2
2. 調査結果	4
2.1 PFOS等の使用・漏洩・流出.....	4
2.2 地下への浸透.....	7
2.3 地下水流動（飽和帯）.....	9
2.4 湧水・地下水のモニタリング結果.....	13
2.5 PFOS等の使用状況とモニタリング結果の関連性.....	18
3. 想定した汚染メカニズムの検証と汚染源特定に関する検討	22
3.1 想定した汚染メカニズムの検証結果.....	22
3.2 汚染源特定に関する検討結果.....	22
4. 専門家会議の設置	23
5. 本事業における総括	25
5.1 事業成果の総括.....	25
5.2 本事業で課題として残った事項.....	26
5.3 今後必要とされる事項.....	26

1. はじめに

1.1 本事業の目的

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、円滑な跡地利用につな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年度から令和6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有機フッ素化合物の汚染源特定を図るため、必要な調査や検討を実施した。

令和4年度から令和6年度の3年間にわたる本事業で得られた調査・検討結果の総括について、本報告書により報告する。

1.2 本事業の概要

令和3年度の前身事業も含め、本事業における概要を表 1.2.1 に整理した。

表 1.2.1 事業の概要（令和3年度～令和6年度）

事業	前身事業（汚染源の推定・絞込み）	本事業（汚染源の特定）
実施年度	令和3年度	令和4年度
実施期間	令和3年6月28日～令和4年2月28日	令和4年4月28日～令和5年3月24日
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 水質、地形・地質に関する資料の収集整理 ● 国内外の土壌・水質汚染事例の収集整理 ● PFOS 等含有物の使用等状況の把握 ● 水質モニタリング ● 汚染メカニズムの推定 ● 専門家会議の開催(3回) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 調査ボーリング(4地点) ● 観測井戸の設置(4地点) ● 石灰岩等試料の分析 ● 地下水試料の分析 ● 水質モニタリング、地下水位の連続測定 ● 専門家会議の開催(3回)
事業	本事業（汚染源の特定）	
実施年度	令和5年度	令和6年度
実施期間	令和5年4月24日～令和6年3月29日	令和6年4月30日～令和7年3月21日
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 調査ボーリング(4地点) ● 観測井戸の設置(4地点) ● 石灰岩等試料の分析 ● 地下水試料の分析 ● 水質モニタリング、地下水位の連続測定 ● 地下水流動シミュレーション ● 専門家会議の開催(3回) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 調査ボーリング(5地点) ● 観測井戸の設置(4地点) ● 石灰岩等試料の分析 ● 地下水試料の分析 ● 水質モニタリング、地下水位の連続測定 ● 地下水流動シミュレーション ● 専門家会議の開催(3回)

1.3 本事業の基本方針

令和3年度の前身事業では、普天間飛行場周辺におけるPFOS等の検出状況や地形・地質、地下水に関する既往調査や文献資料を収集・整理した。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考えられ、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。

② 地下への浸透

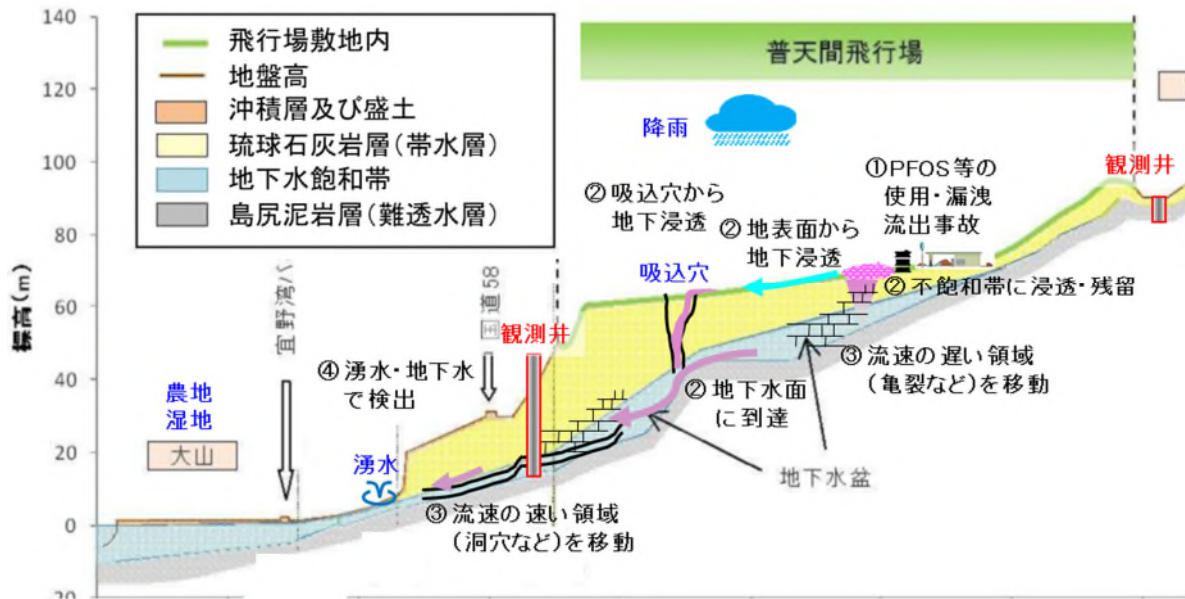
- ・環境中に放出されたPFOS等は地表水に含まれ、一部は地表面等や吸込穴（ポノール）から地下に浸透し、一部は河川等へ流出する。
- ・地表面から地下に浸透したPFOS等は、降雨の浸透と共に下方へ移動する。また、一部は不飽和帯（地下水面より上位の地盤）の間隙水中や土壌に残留する。
- ・吸込穴（ポノール）へ流入したPFOS等を含む表流水は、地盤中の亀裂・間隙へ浸透すると共に、表流水の一部は直接地下水面に到達する。

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）で検出

- ・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。



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 1.3.1 地下浸透した PFOS 等の移動経路の想定

汚染源の特定に向けて、本事業（令和 4 年度～令和 6 年度）では水質、水位、地質等のデータを現地調査により蓄積し、調査結果や文献等の情報をもとに、想定された汚染メカニズムの妥当性を検証した。

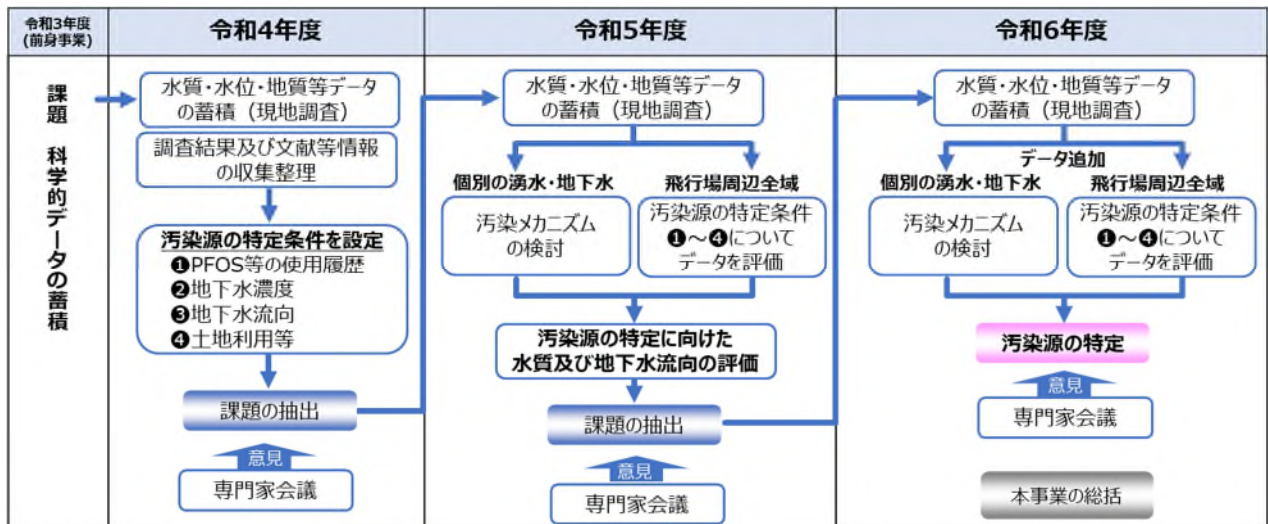


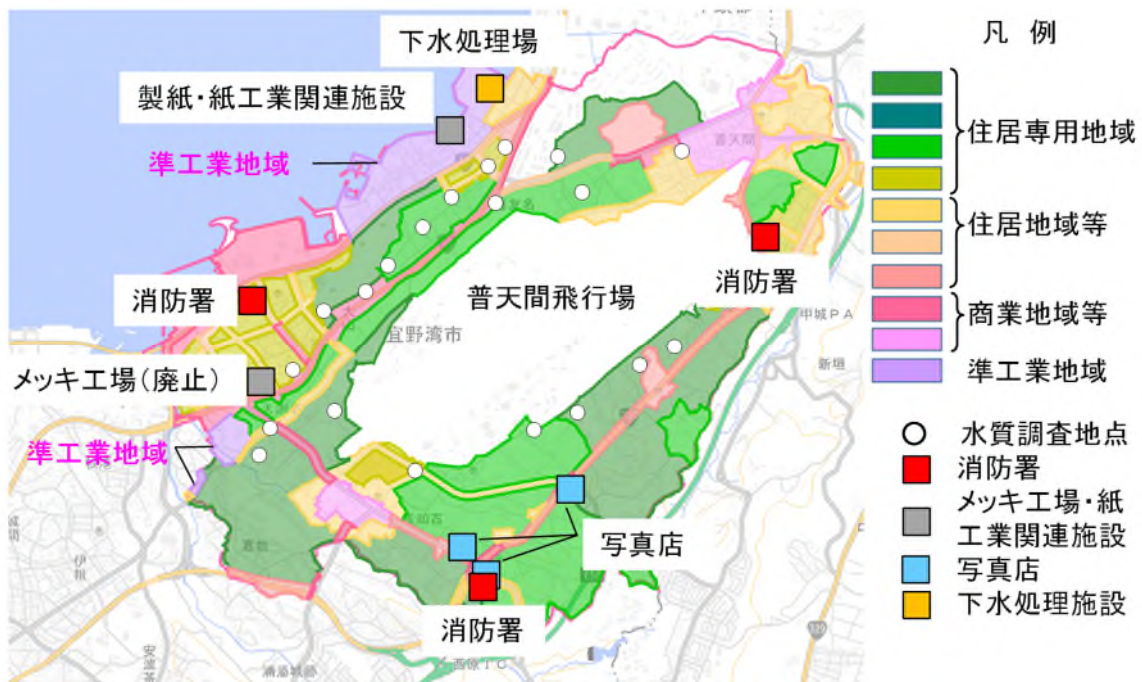
図 1.3.2 3年間の事業における基本方針

2. 調査結果

2.1 PFOS 等の使用・漏洩・流出

(1) PFOS 等の排出源

普天間飛行場周辺では、同飛行場、宜野湾市消防署、写真店、製紙・紙工業関連施設、金属メッキやエッチング関連施設、下水処理場がPFOS等の排出源となり得る箇所に該当し、そのうちPFOS等の水質調査地点より地下水の上流側には、普天間飛行場、宜野湾市消防署、写真店が確認された。



用途地域マップ (<https://cityzone.mapexpert.net/>) を加工して作成

図 2.1.1 普天間飛行場周辺における PFOS 等の排出源となり得る箇所

(2) PFOS 等含有物の使用等状況

PFOS 等の排出源となり得る箇所の PFOS 等含有物の使用等の状況を一般公表されている資料等から確認した。

宜野湾市消防署の泡消火薬剤については、宜野湾市消防本部へヒアリングを行い、泡消火薬剤の使用履歴が無いことを確認した。

写真感光剤、表面処理剤、金属メッキについては、水質汚濁防止法に係る特定事業場の情報から PFOS 等含有物の使用等に関する情報は確認されなかった。

PFOS 等が含まれる可能性がある航空機の作動油や洗浄剤については、普天間飛行場での使用が考えられるが、これらの使用等に関する情報は確認されなかった。

普天間飛行場の泡消火薬剤については、米軍の公表資料や流出に係る調査結果資料等から消火訓練施設や格納庫で泡消火薬剤の使用、保管、流出事故の発生が確認された。

表 2.1.1 普天間飛行場周辺で使用等される可能性のある PFOS 等含有物

PFOS 等含有物	排出源と 考えられる場所	使用等の履歴	使用等に関して確認した資料
泡消火薬剤	普天間飛行場	使用・保管・廃水流出 の履歴あり	米軍公表資料 流出に係る調査結果 他
	宜野湾市消防署	使用履歴なし	宜野湾市消防本部へのヒアリング
航空機の作動 油や洗浄剤	普天間飛行場	不明	米軍からの「沖縄防衛局への覚書」 に対する疑義照会
写真感光剤	写真店	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳
表面処理剤	製紙・紙工業関連施設	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳
金属メッキ	金属メッキや エッチング関連施設	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳

表 2.1.2 普天間飛行場で使用された泡消火薬剤と消火訓練等^{※1}

泡消火薬剤の使用年代	消火訓練 ^{※2}	普天間飛行場での事故等
1970年代～2015年頃 ・古いタイプの泡消火薬剤を使用 (レガシーPFOS 泡消火薬剤)	<ul style="list-style-type: none"> ・2014年 5回 ・2015年 3回 ・2016年2月まで 2回 	<ul style="list-style-type: none"> ・2005～2009年に少なくとも3回、計 2,700Lの泡消火薬剤を含む水^{※3}が 流出
2016年頃～2021年8月 ・新しいタイプの泡消火薬剤(モ ダンフルオロテロマー泡消火 薬剤)への入替え期間 ・古いタイプの泡消火薬剤も残存	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>2016年3月以降、消火 訓練には水を使用</u> ・2016年3月以降 4回 ・2017年 5回 ・2018年 4回 ・2019年 2回 ・2020年 1回 ・2021年8月まで 2回 	<ul style="list-style-type: none"> ・2019年8月、PFOS等を含む泡消火薬 剤378Lがタンクから漏出 ・2019年12月に95,000～114,000Lの 泡消火薬剤を含む水^{※3}が発生し、一 部が飛散または雨水管に流出 ・2020年1月、泡消火薬剤128Lのう ち少量が飛行場外へ流出 ・2020年4月に227,100Lの泡消火薬 剤を含む水^{※3}が発生し、そのうち 143,830Lが飛行場外へ流出 ・2021年8月にPFOS等を含む水^{※3} 64,000Lを下水へ放出
2021年9月～ ・新しいタイプの泡消火薬剤への 入替え完了(2021年9月)	<ul style="list-style-type: none"> ・2021年10月まで 1回 	<ul style="list-style-type: none"> ・2021年10月7日、地下貯水槽に貯 留していたPFOS等を含む水^{※3} 360,000Lを防衛省が引取りを完了

※1 米軍、米国会計検査院、宜野湾市の公表資料、新聞報道、雑誌記事等から作成。

※2 消火訓練は宜野湾市が米軍側から実施の報告を受けた件数であり、消火訓練が中止になったものもある。

※3 宜野湾市の公表資料、新聞報道、雑誌記事等には、流出した泡消火薬剤を含む水やPFOS等を含む水の性状について詳しい記載はないが、放出された泡消火薬剤やそれらの除去で使用した水の混合水が考えられる。

(3) 流出事故時の泡消火薬剤の成分

2016年以前に普天間飛行場で使用されていた古いタイプの「レガシー-PFOS 泡消火薬剤」の成分はPFOSが主体であったが、2016年頃からPFOSおよびPFOAを主成分としない新しいタイプの「モダンフルオロテロマー泡消火薬剤」へ入替えが開始されている。

2020年4月の事故で流出した泡消火薬剤は、6:2FtSの親物質である6:2-FtTAoS主体の「モダンフルオロテロマー泡消火薬剤」と考えられるため、6:2-FtTAoSの標準液や事故時に採取した泡サンプル、湧水（シチャヌカー）を対象に分析・検証を行った（図2.1.2参照）。

分析の結果、新しいタイプの泡消火薬剤の主成分である6:2-FtTAoSは、環境中に放出された後、地下水や湧水に至るまでに酸化され、6:2FtSへと変化して検出されたと推定される。

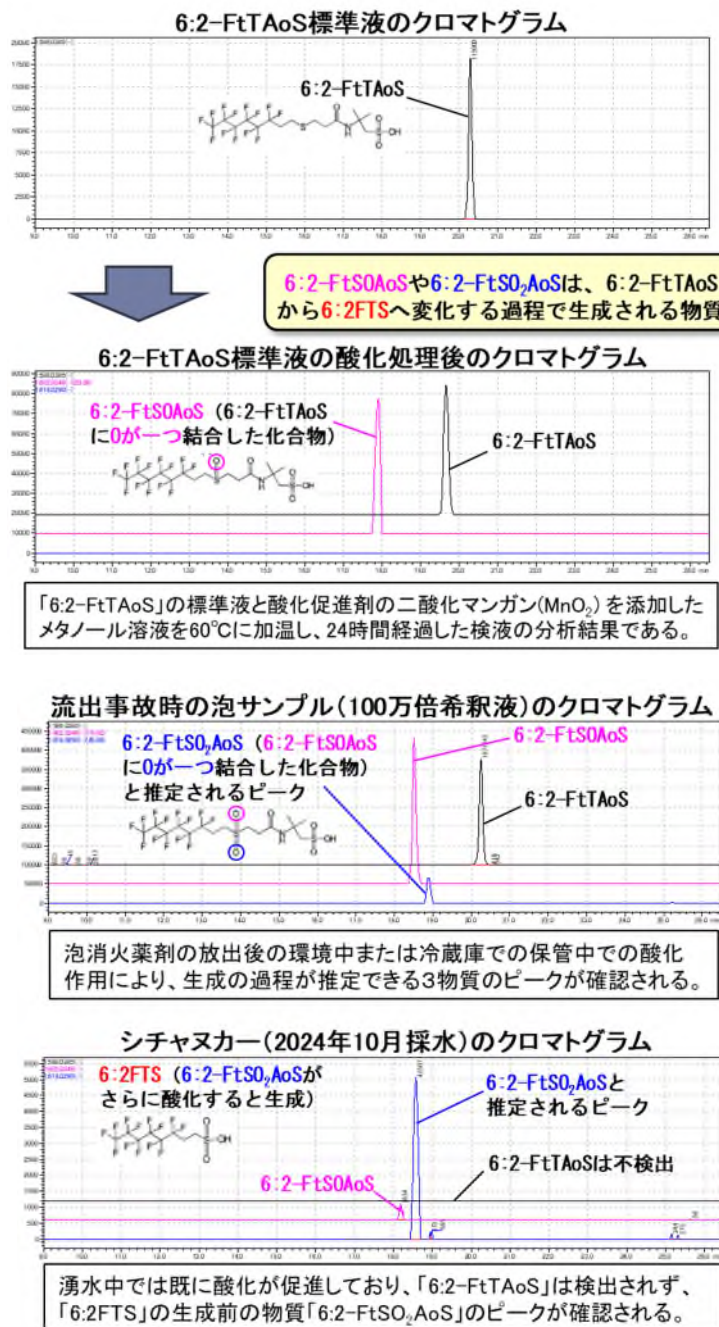


図2.1.2 各種試料の分析で得られたクロマトグラム

2.2 地下への浸透

(1) 地表部から地下への浸透

既存資料などを収集・整理した結果、PFOS 等の汚染源となり得る場所は、図 2.2.1 に示すとおり、泡消火薬剤の使用等が確認された普天間飛行場内の「①格納庫や消火訓練施設」と考えられ、「②地表排水の流末に位置する吸込穴（ポノール）」も泡消火薬剤の漏洩や流出があった場合は、地下へ浸透する場所となり得ると考えられる。

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。日本政府は、格納庫地下貯水槽に残る未処理の汚染水を全て防衛省が引き取り、焼却処分すると 2021 年 10 月 17 日に発表しているが、過去に使用等された PFOS 等を含む泡消火薬剤が地表面等から地下浸透して、土壌中や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）

地表排水の流末に位置する場所である。事故等により、PFOS 等を含む泡消火薬剤が流出した場合は、速やかに地下水面に到達する可能性がある。



図 2.2.1 普天間飛行場内の PFOS 等の汚染源と推定される場所

(2) 不飽和帯での残留

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 2.2.1 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 等が残留している可能性が考えられる。

表 2.2.1 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降下浸透する。 ●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、早期に下流側湧水で検出されるとともに、他の PFOS 等と比べて濃度変動も大きくなる。
根拠資料から得られた事項	<ul style="list-style-type: none"> ●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。^{※1} ●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-水界面での残留）、数百年単位で濃度低下しない解析結果が示された。^{※2} ●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-水界面に残留し、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。^{※3}

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

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

2.3 地下水流動（飽和帯）

（１）調査ボーリング及び観測井戸の設置

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）に区分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年度から令和6年度にかけて図2.3.1に示す計12地点で調査ボーリング及び観測井戸の設置を行った。

また、C流域とD流域の境界部の地質状況を確認するため、その境界付近の1地点において地質調査ボーリングを行った。

地下水流域	飛行場からの位置	調査地点（令和4年度～令和6年度）
C流域	地下水 上流側	R4-2 孔
	地下水 下流側	R4-3 孔、R5-4 孔、R6-2 孔、R6-3 孔、R6-4 孔
	（側部）	R5-3 孔
D流域	地下水 上流側	R4-1 孔
	地下水 下流側	R4-4 孔
E流域	地下水 上流側	R5-2 孔
	地下水 下流側	R5-1 孔、R6-1 孔
C～D流域の境界部	地下水 下流側	R6-5 孔



地理院地図を加工して作成した。

図 2.3.1 調査ボーリング及び観測井戸設置の地点位置図

(2) 琉球石灰岩層（帯水層）と島尻泥岩層（水理基盤）の形状

本事業の調査ボーリング及び既往調査で得られた地質データをもとに作成した琉球石灰岩層（帯水層）上面と島尻泥岩層（水理基盤）上面の3次元地盤モデルを図2.3.2～図2.3.3に示す。

琉球石灰岩層上面は標高50～90m付近で段丘面を形成している。一方、島尻泥岩層上面は南東（山側）から北西（海側）に向かって傾斜している。

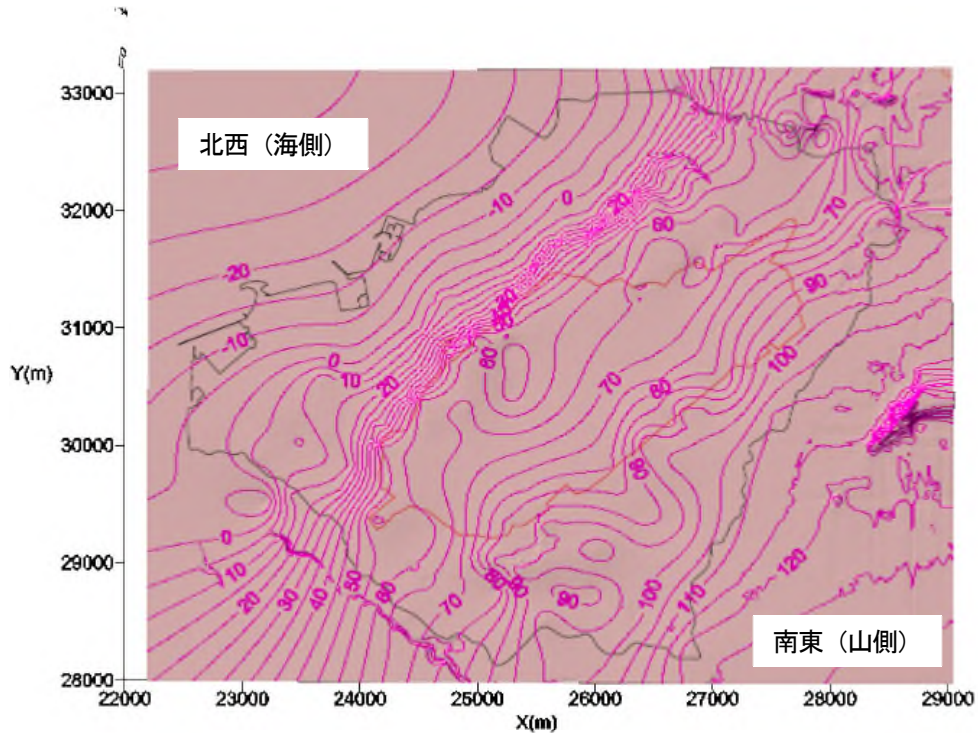


図 2. 3. 2 琉球石灰岩層上面の等値線

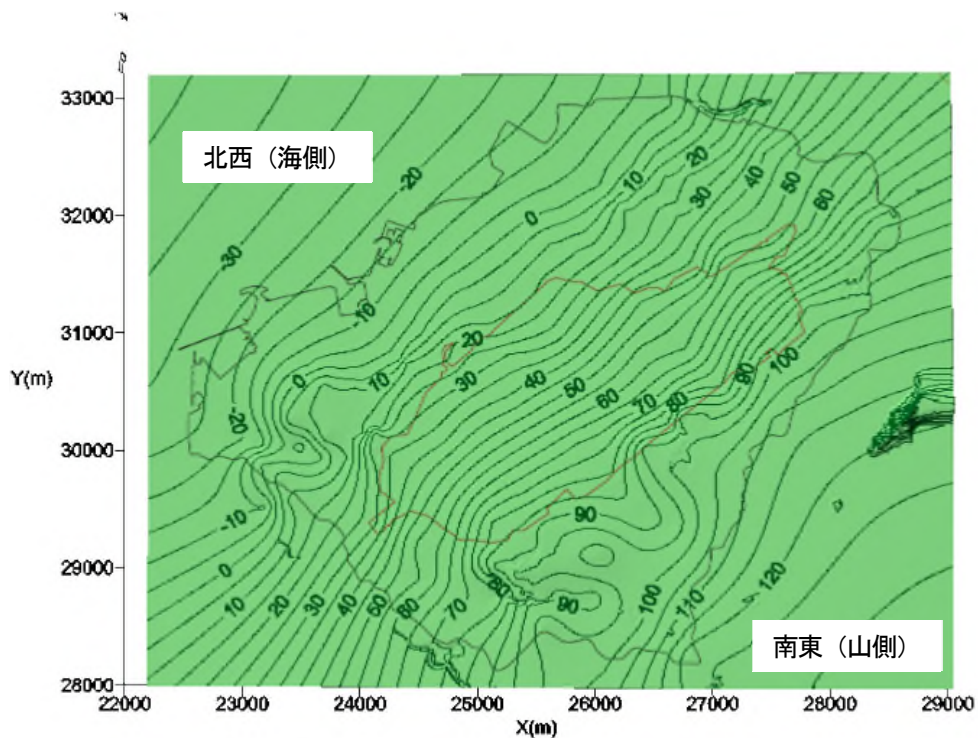


図 2. 3. 3 島尻泥岩層上面の等値線

(3) 地下水位の連続測定

地下水位変動状況を把握して PFOS 等濃度との関係性を検討するため、観測井戸に自記水位計を設置し、地下水位の連続測定を実施した。地下水位の測定結果の一部は図 2.3.4 に示したとおりである。

C流域とD流域の下流側地下水位の変動幅は、R6-4 孔 : 0.38m、R4-4 孔 : 3.11m、R4-3 孔 : 5.04m、R5-4 孔 : 3.19m であった。R4-3 孔と R5-4 孔は、降雨に対し比較的鋭敏に反応していた。

2024年5月21日～6月20日の間には、1,000mm を超える降雨があり、短期的な水位変動が小さい傾向にある喜友名 B 孔や R4-4 孔でも地下水位の上昇が確認された。

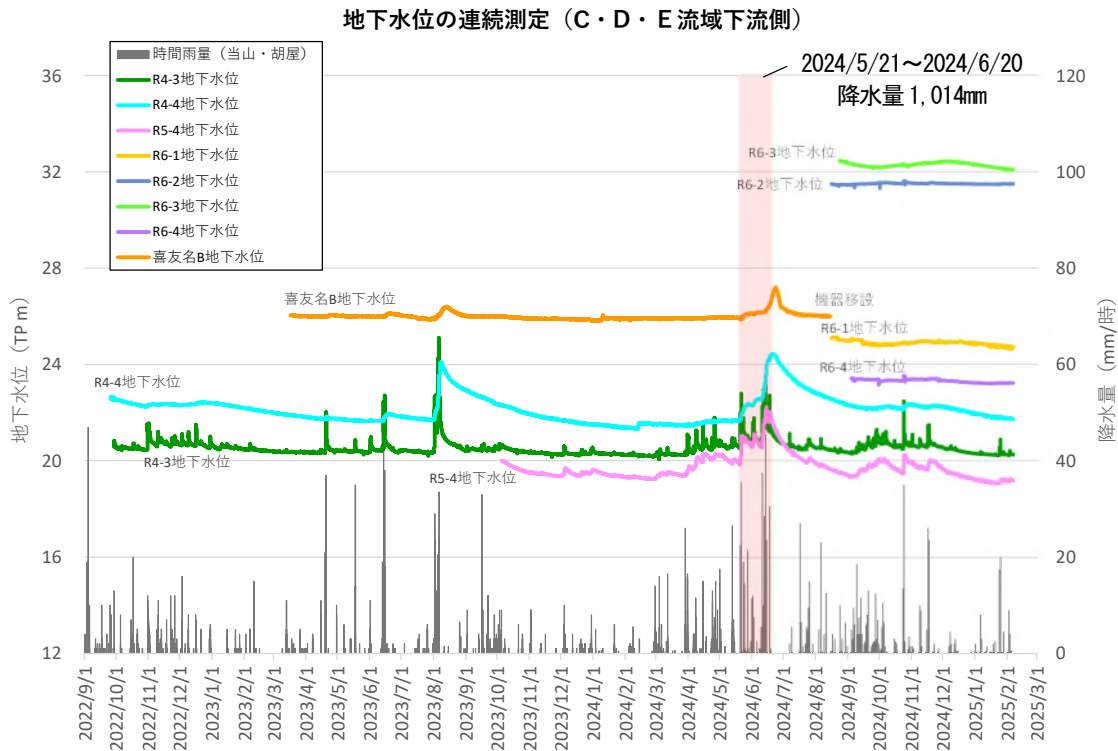


図 2.3.4 地下水位の連続測定結果 (C流域・D流域・E流域の下流側)

(4) 石灰岩における透水係数

地下水流動シミュレーションで設定する透水係数の検討のため、令和4～6年度に現場透水試験を実施した。当該試験から得られた透水係数は「 $1.70 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 」で、既往の文献資料等で提示されている透水係数($10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$)に近い結果となり、琉球石灰岩における比較的妥当な透水係数と考えられる (表 2.3.1 参照)。

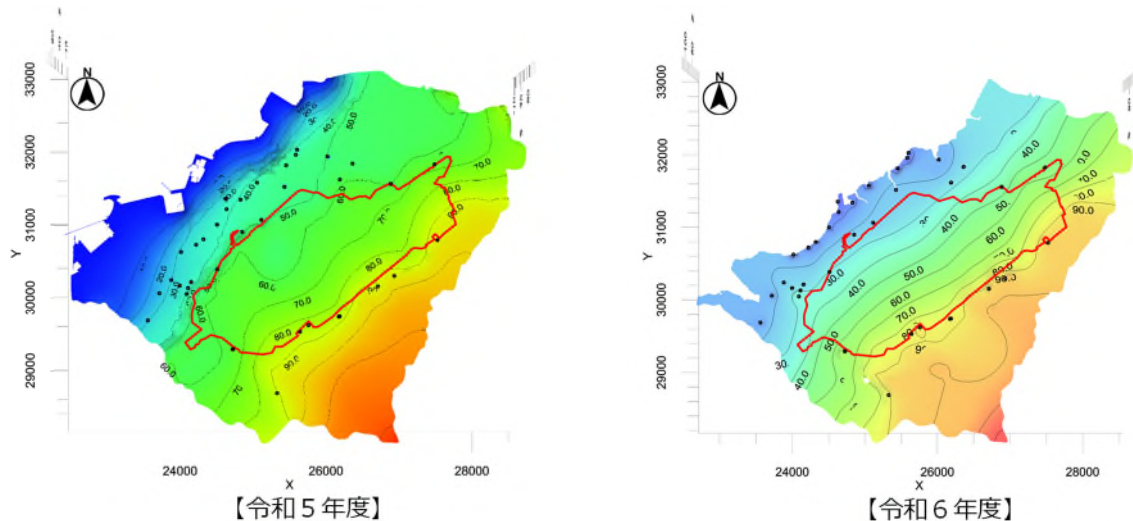
表 2.3.1 琉球石灰岩の透水係数

実施年度など	透水係数 (m/s)				試験方法
	R4-3	R4-4	R5-1	R5-4	
令和4～5年度	1.70×10^{-6}	2.18×10^{-5}	4.37×10^{-4}	4.82×10^{-4}	現場透水試験※
令和6年度	1.56×10^{-3}	7.55×10^{-4}	1.00×10^{-3}	1.26×10^{-3}	
試験値の範囲	$1.70 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-3}$				※ R4-3、R4-4 では観測井戸での揚水による試験 (非正常法)、R5-1、R5-4、R6-1～R6-4 ではスラグの投入による試験 (非正常法)
既往の文献値	$10^{-5} \sim 10^{-3}$ オーダー				

(5) 地下水流動の解析結果

令和5～6年度において定常状態での地下水流動シミュレーションを行った。令和5年度は海岸線を境界条件と設定したが、令和6年度では修正し、琉球石灰岩の崖下線までをシミュレーション領域とし、モニタリングデータがある湧水地点に境界条件を設定した。

解析で得られた地下水面は南東（山側）⇒北西（海側）に向かって傾斜しており、令和5年度と比べて令和6年度の解析結果では地表面や島尻泥岩層の上面形状に、より定性的には一致した傾向を示した。



注) 本図は3次元のシミュレーション結果を上から見たものである。また、限られたデータで作成した地盤モデルに基づくシミュレーション結果であり、大局的な地下水流動を表現しているため、本図は参考として取り扱うものである。

図 2.3.5 解析で求めた地下水位等高線

2.4 湧水・地下水のモニタリング結果

(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 (PFOS、PFOA、PFHxS、6:2FTS) の合計で 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、E 流域下流側の R5-1 孔で最も高い濃度 8,600ng/L の PFOS 等が検出されている (図 2.4.1 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、E 流域下流側の R5-1 孔で 6,300ng/L の PFOS 及び PFOA が検出されている (図 2.4.2 参照)。

6:2FTS の検出状況については、地下水下流側では不検出または一時的に検出する地点が分布し、地下水下流側では一部を除き連続的に検出する地点が分布している (図 2.4.3 参照)。

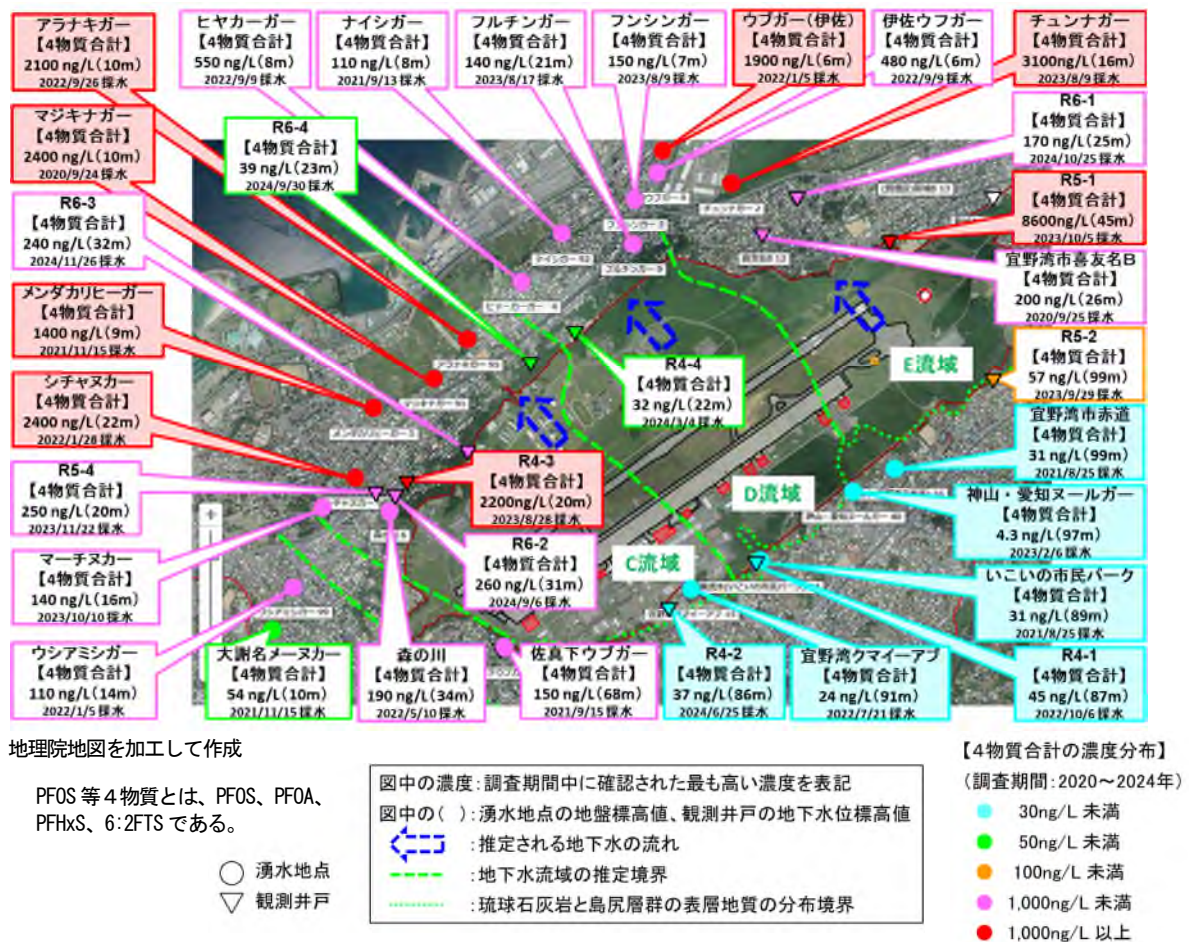
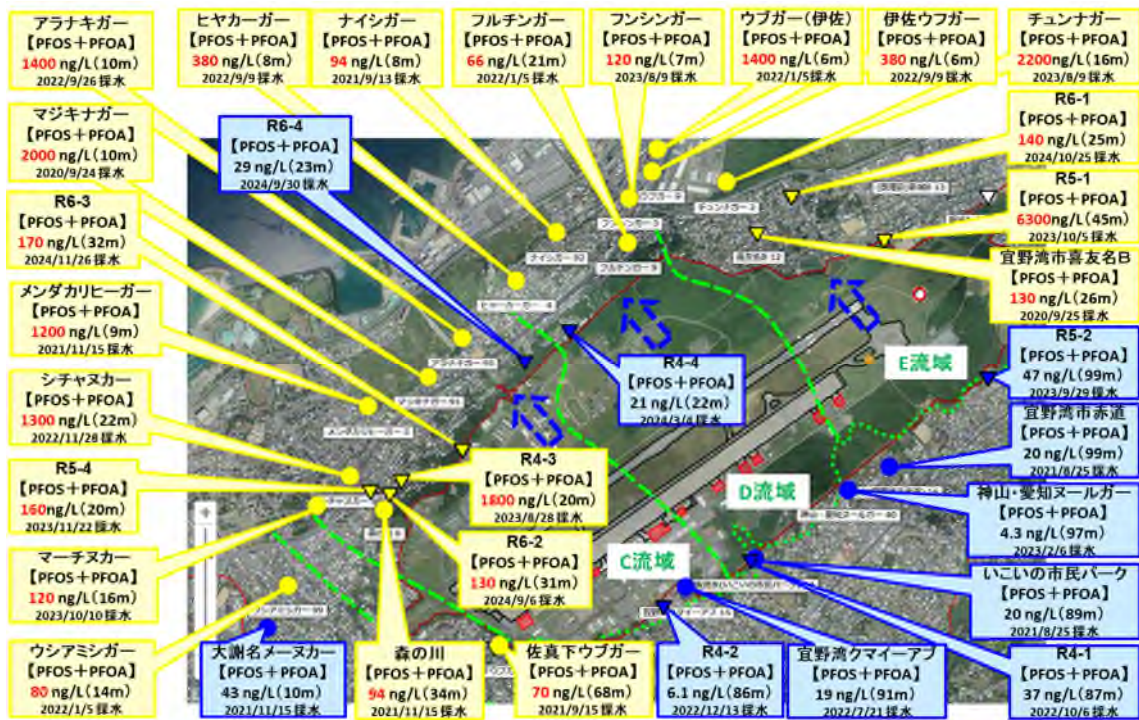


図 2.4.1 地下水流域界と PFOS 等 (4 物質の合計値) の濃度分布



地理院地図を加工して作成

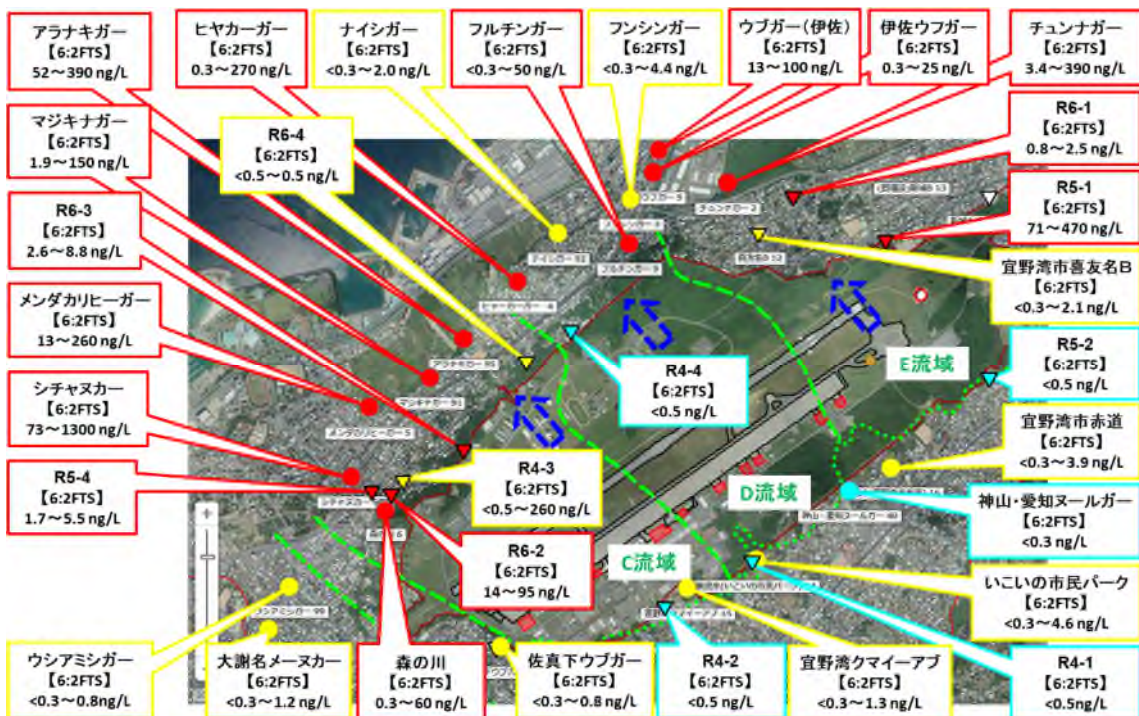
- 湧水地点
- ▽ 観測井戸

- 図中の濃度: 調査期間中に確認された最も高い濃度を表記
- 図中の(): 湧水地点の地盤標高値、観測井戸の地下水位標高値
- ⇐: 推定される地下水流れ
- - -: 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

【PFOS+PFOAの濃度分布】
(調査期間: 2020~2024年)

- 50 ng/L 以下
 - 50 ng/L 超過
- 注) 要監視項目 暫定指針値: 50 ng/L

図 2. 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



地理院地図を加工して作成

- 湧水地点
- ▽ 観測井戸

- ⇐: 推定される地下水流れ
- - -: 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

【6:2FTSの検出状況】

(調査期間: 2018~2024年)

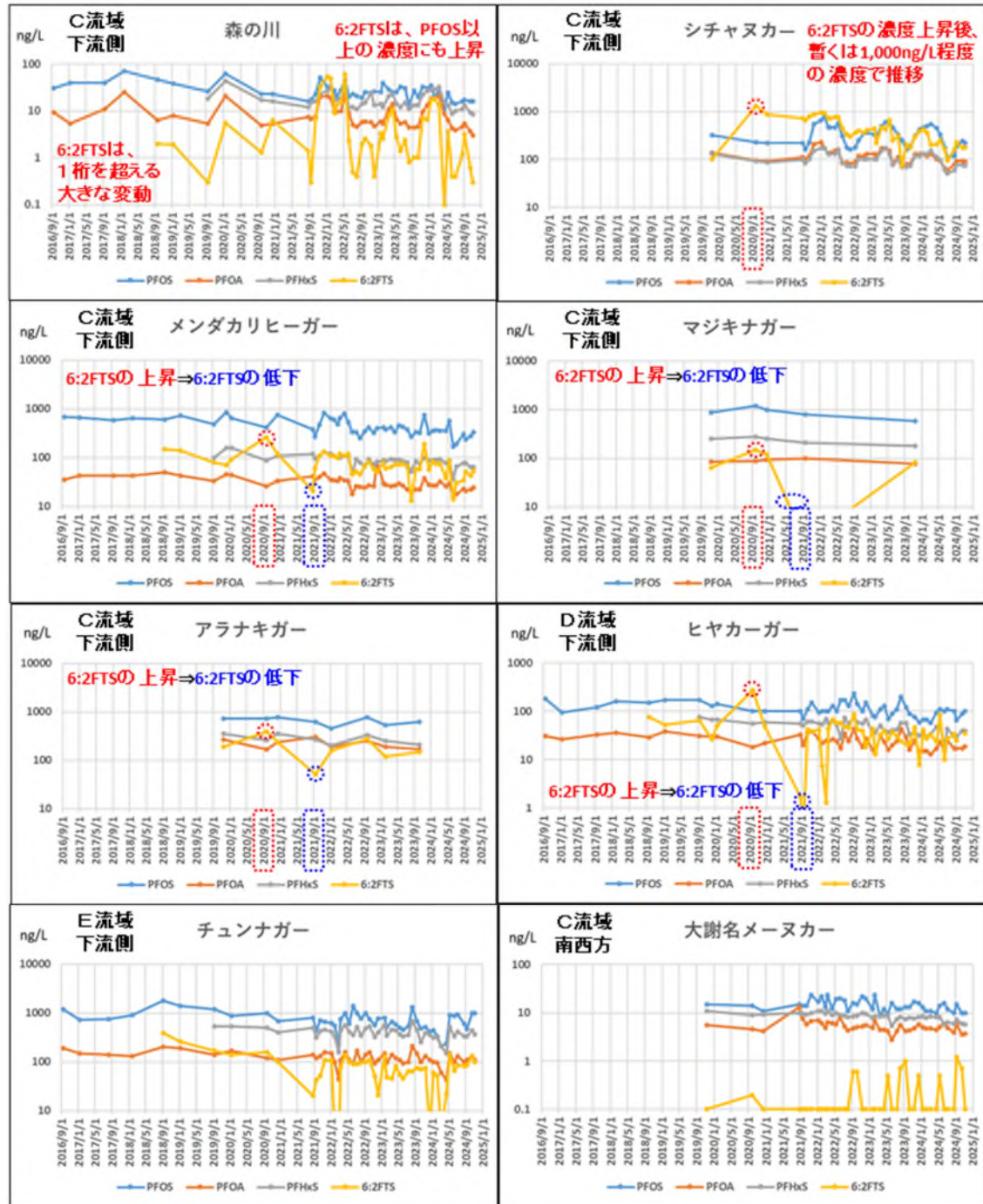
- 不検出の地点
- 一時的に検出する地点
- 連続的に検出する地点

図 2. 4. 3 地下水流域界と6:2FTSの検出状況

(2) PFOS 等の経時変化

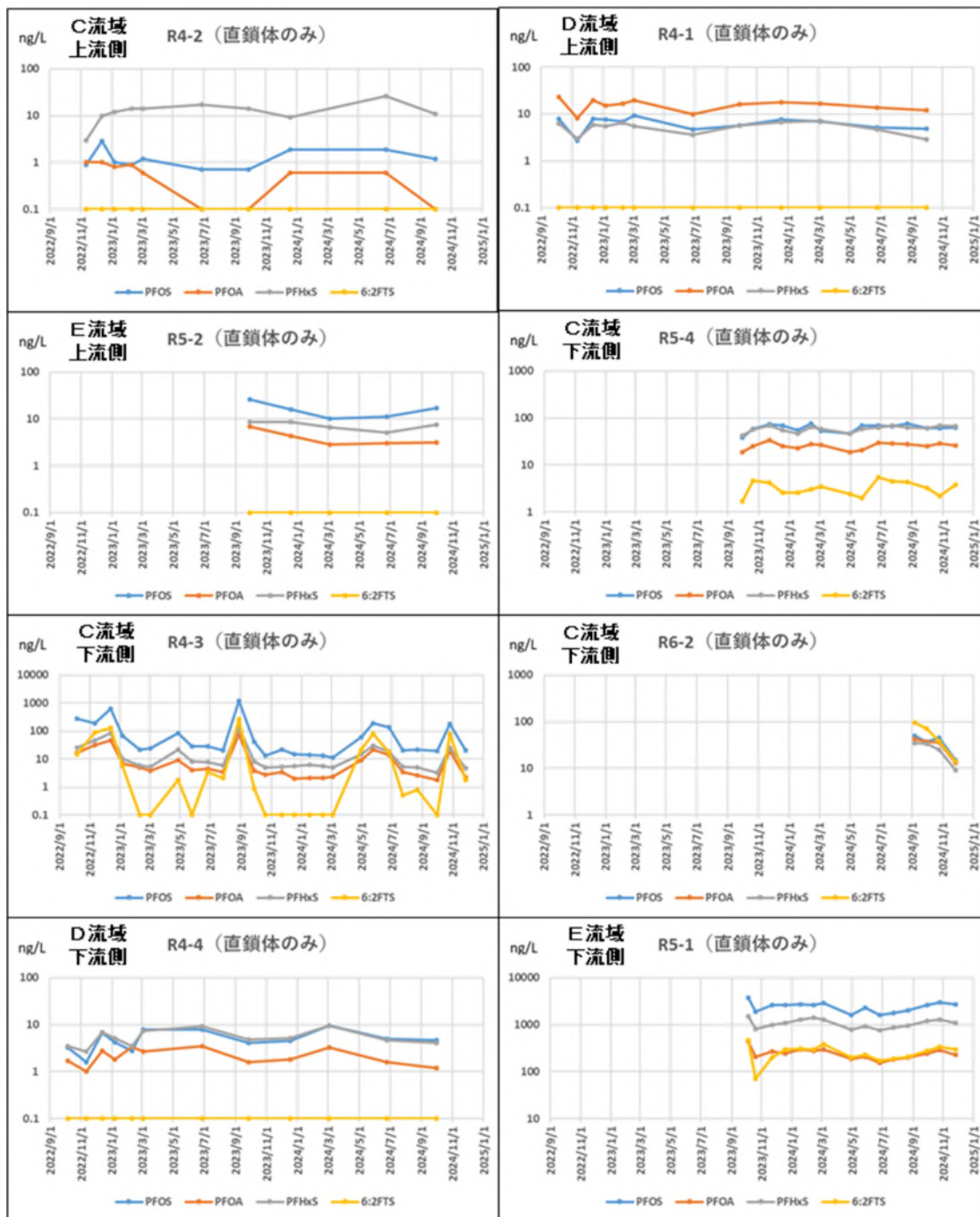
湧水地点で、6:2FTS の濃度変動は1桁を超えることがあり、PFOS、PFOA、PFHxS は6:2FTS と比べると濃度変動が小さい（図 2.4.4 参照）。

普天間飛行場周辺で最も高い濃度の 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、それぞれの濃度変動は大きくはなく、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 2.4.5 参照）。



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）

図 2.4.4 PFOS 等濃度の経時変化（代表の湧水地点）



注) 前頁に示した下流側の湧水の経時変化と比較できるように、2016年から湧水で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)

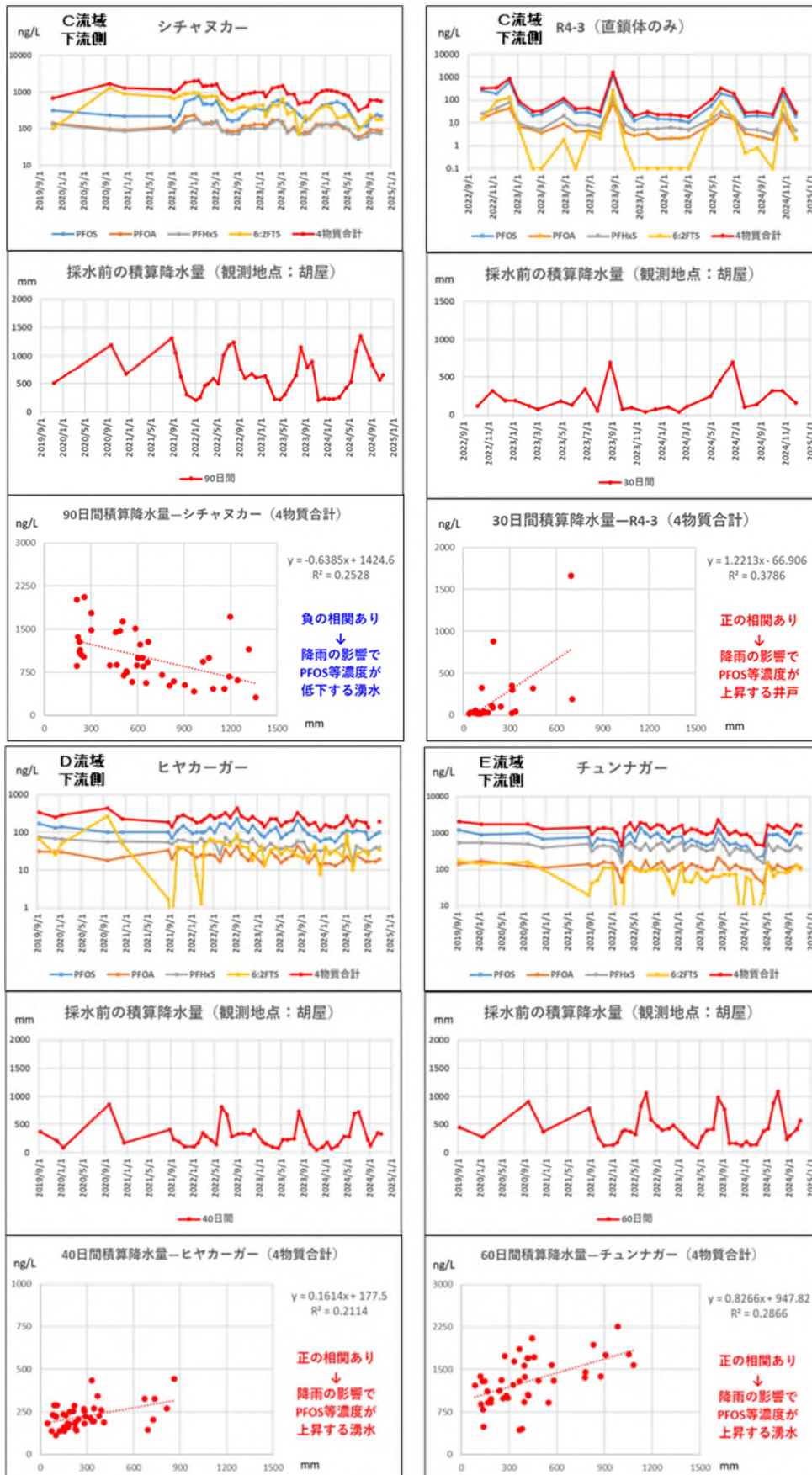
図 2.4.5 PFOS 等濃度の経時変化(観測井戸)

(3) PFOS 等の経時変化と積算降水量

一部の湧水や観測井戸の PFOS 等濃度の変動は、採水前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降雨の影響で PFOS 等濃度が低下するが、C流域下流側の R4-3 孔、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降雨の影響で PFOS 等濃度が上昇する傾向がある(図 2.4.6 参照)

降雨の影響で PFOS 等濃度が上昇する地点の上流側には、PFOS 等の供給源が存在する可能性がある。



注) 2019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みの濃度をもとに経時変化を作成 (分岐異性体は含まず)

図 2.4.6 PFOS 等濃度と積算降水量の相関

2.5 PFOS 等の使用状況とモニタリング結果の関連性

(1) C流域における汚染状況

6:2FTS の構成比が 40%程度と大きい水質を R6-2 孔の地下水で確認し、これは同じC流域のシチャヌカーの構成比に類似している (図 2.5.1 参照)。地下水の上流側に位置する R6-2 孔の PFOS 等濃度はシチャヌカーより低いが、島尻泥岩層の上面形状も考慮すると、普天間飛行場内からシチャヌカーへ流下する地下水は、R6-2 孔の近傍をすり抜けるなど比較的狭い範囲を流動していると推定される (図 2.5.2 参照)。

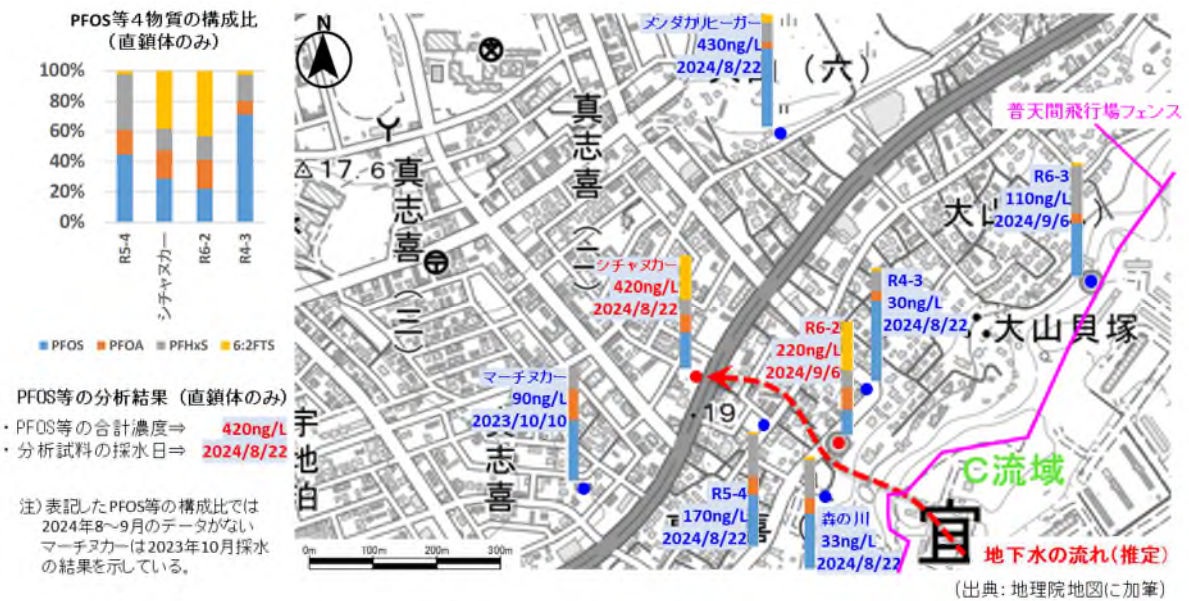


図 2.5.1 PFOS 等濃度の分布と構成比 (C流域 地下水下流側)

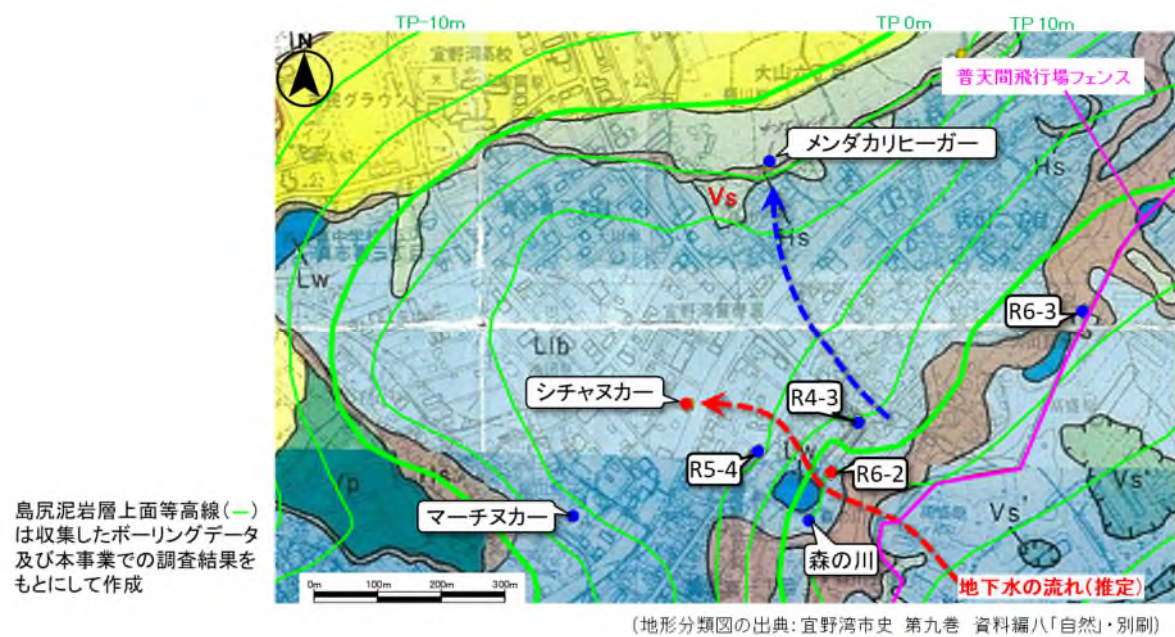


図 2.5.2 地形分類図と島尻泥岩層上面等高線の重ね合わせ (C流域 地下水下流側)

(2) E流域における汚染状況

E流域に位置する消火訓練施設の下流側である R5-1 孔の地下水から、普天間飛行場周辺で最も高い濃度の PFOS 等が検出されている。R5-1 孔から下流側の湧水に向かうに伴い PFOS 等の濃度が低下し、その構成比も類似していることから、R5-1 孔周辺の地下水は、比較的狭い範囲をチュンナガー及びウブガー(伊佐)へ向かい流動していると推定される(図 2.5.3 参照)。なお、R5-1 孔～チュンナガー間に位置する R6-1 孔の PFOS 等 4 物質の濃度は R5-1 孔に比べて低いが、構成比は R5-1 孔と類似していることから、同じ起源をもつ地下水であると考えられる。汚染プルームの中心から離れた端部に位置するため濃度が低いと考えられる。

また、湧水地点から谷(Vs)や谷底低地(Vp)が刻まれた方向へ辿ると、溶食凹地(Vs')が分布していることから、これらの地形分布が地下水の流動に影響している可能性がある(図 2.5.4 参照)。

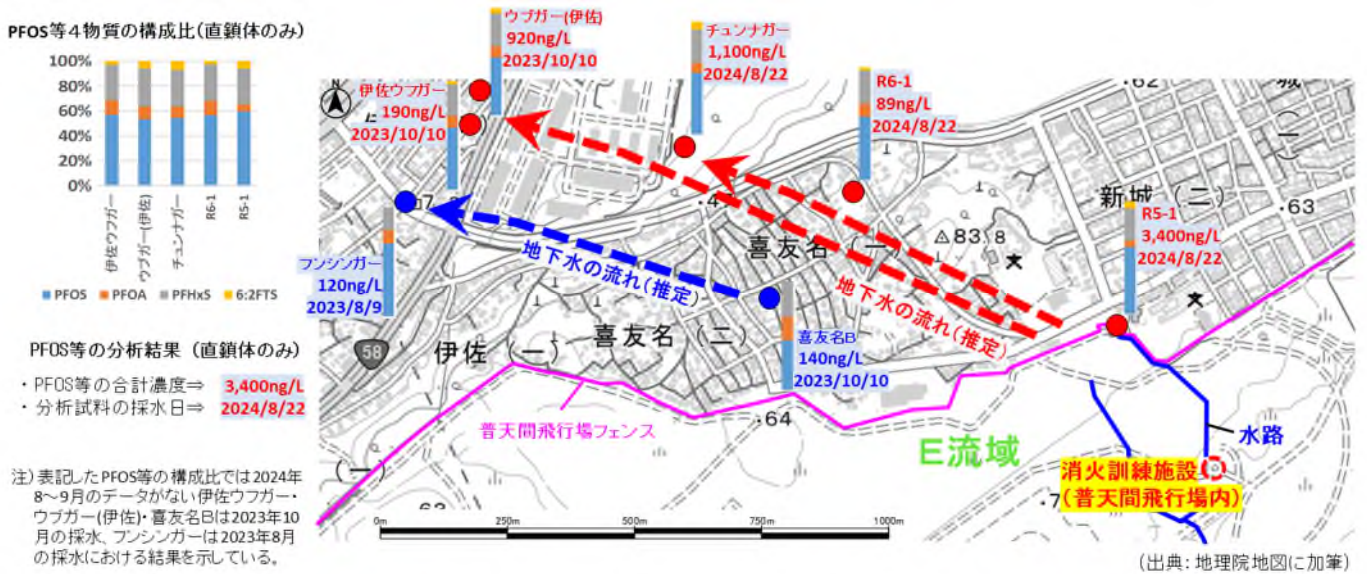


図 2.5.3 PFOS 等濃度の分布と構成比 (E流域 地下水下流側)

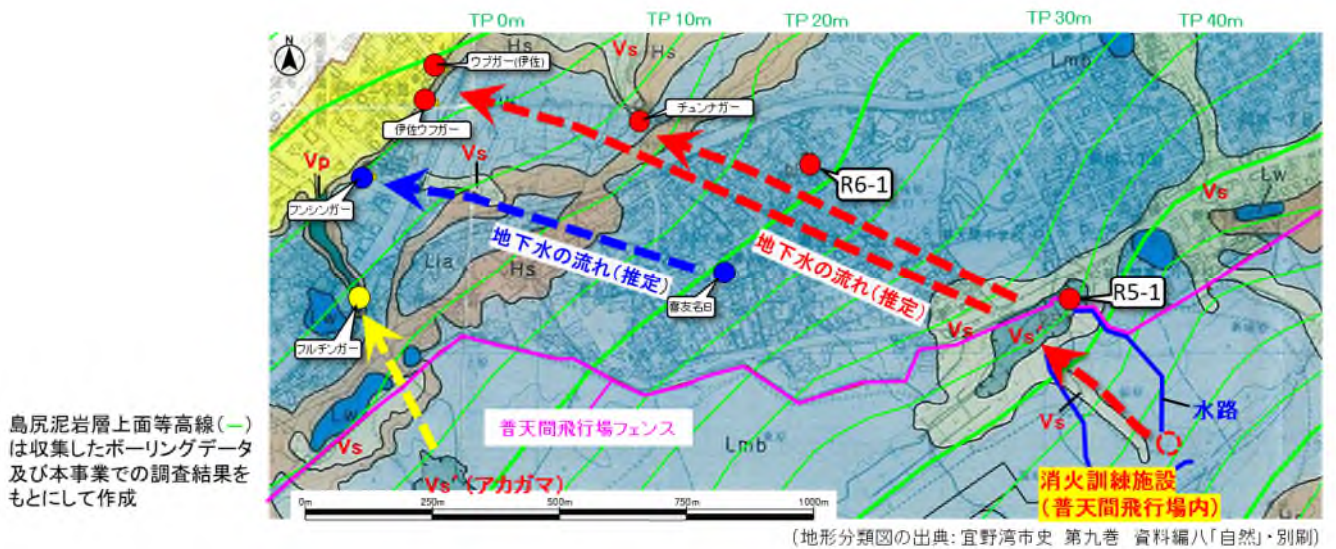


図 2.5.4 地形分類図と島尻泥岩層上面等高線の重ね合わせ (E流域 地下水下流側)

(3) 深度方向の石灰岩等における PFOS 等の濃度

普天間飛行場周辺で最も高い濃度の PFOS 等が地下水から検出している E 流域の R5-1 孔では、地下水位以浅の粘土層及び石灰岩から PFOS 等が検出された (表 2.5.1 参照)。

図 2.5.5 に示すとおり、粘土層から地下水位まで PFOS 等濃度は低下していたが、地下水位以深から濃度は上昇していた。なお、地下水位以深の石灰岩で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。

表 2.5.1 深度方向の石灰岩等における PFOS 等の分析結果 (R5-1 孔)

採取深度 (GL- m)	種類	PFOS			PFOA			PFHxS			6:2FTS	4物質合計
		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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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

定量下限値 0.02ng/g PFOS等を検出

注1) 6:2FTSも含め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、「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)」の「参考」土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法で定量。

注2) 各物質の合計値を算出する際は「<0.02」を0.02として合算している。また、合計値は数値の丸めの関係で各項目の和と一致しない場合がある。



図 2.5.5 深度方向の石灰岩等における PFOS 等の濃度構成比 (R5-1 孔)

また、6:2FTS の構成比が 40%程度と大きいC流域の R6-2 孔では、地下水位以深の石灰岩から PFOS と 6:2FTS が検出されたが、地下水位以浅の盛土層及び石灰岩からは検出されなかった（表 2.5.2 参照）。

表 2.5.2 深度方向の石灰岩等における PFOS 等の分析結果（R6-2 孔）

採取深度 (GL- m)	種類	PFOS			PFOA			PFHxS			6:2FTS	4物質 合計
		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		
0.10~0.20	盛土	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
1.05~1.15	盛土	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
2.05~2.15	岩屑状 石灰岩	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
3.10~3.20	岩屑状 石灰岩	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
4.40~4.50	岩屑状 石灰岩	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
4.82~4.90	塊状 石灰岩	0.04	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02
5.00~5.10	岩屑状 石灰岩	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

地下水位

定量下限値 0.02ng/g

PFOS等を検出

注1) 6:2FTSも含め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、「土壤中の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)」の「参考」土壤中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法で定量。

注2) 各物質の合計値を算出する際は「<0.02」を0.02として合算している。また、合計値は数値の丸めの関係で各項目の和と一致しない場合がある。

3. 想定した汚染メカニズムの検証と汚染源特定に関する検討

3.1 想定した汚染メカニズムの検証結果

普天間飛行場北西側の湧水等から、50 ng/L を超過する高濃度の PFOS 等が継続して検出されていることより汚染メカニズムを想定したが、その検証結果については表 3.1.1 に整理したとおりである。

表 3.1.1 想定した汚染メカニズムの検証結果

汚染メカニズム (想定)	検証結果
① PFOS 等による汚染発生	<ul style="list-style-type: none"> ・ 普天間飛行場の格納庫 (C~D 流域) や消火訓練施設 (E 流域) で泡消火薬剤の使用、保管、流出事故の発生を確認。 ・ C 流域の格納庫から 2020 年 4 月の事故で流出した新しいタイプの泡消火薬剤の主成分と想定される 6:2-FtTAoS は、環境中で酸化されて 6:2FTS へと変化。
② 地下浸透	<ul style="list-style-type: none"> ・ 普天間飛行場内の「格納庫や消火訓練施設」と「地表排水の流末に位置する吸込穴 (ポノール)」は PFOS 等が地下へ浸透し得る場所。 ・ 海外の事例では、不飽和帯に PFOS 等が残留。
③ 地下水流動 (飽和帯)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤と地下水の測定データや地下水流動シミュレーション結果から、普天間飛行場周辺の地下水は南東 (山側) から飛行場内の帯水層を通り、北西 (海側) に向かって移動。 ・ 地下水位以深の石灰岩に PFOS 等が残留。
④ 湧水・地下水で検出	<ul style="list-style-type: none"> ・ 普天間飛行場の上流側地下水では、PFOS 等は 50ng/L 未満で 6:2FTS は概ね不検出、下流側地下水では PFOS 等濃度は 50ng/L 以上で 6:2FTS は継続して検出。 ・ C 流域と E 流域の下流側地下水では 1,000ng/L を超える PFOS 等を継続して検出。 ・ 降雨の影響で PFOS 等濃度が上昇する C 流域下流側の R4-3 孔、D 流域下流側のヒヤカーガー、E 流域下流側のチュンナガーの上流側の普天間飛行場内には、PFOS 等の供給源が存在する可能性あり。

3.2 汚染源特定に関する検討結果

令和 6 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 3.2.1 に整理したが、①~④の項目に関する条件を満たしていると評価される。

表 3.2.1 汚染源の特定に向けた条件

把握する項目	令和 6 年度までに把握した内容	評価結果など
① PFOS 等の使用・保管・漏洩の履歴がある。	普天間飛行場内で使用等の履歴あり。	把握済み
② 飛行場の地下水上流・下流側で PFOS 及び PFOA 濃度に有意な差がある。	上流側は暫定指針値 50ng/L 以下、下流側は 50ng/L を大きく超過する濃度を示す。	概ね 把握済み (地下水下流側の観測井戸で 6,000ng/L を超過する地点を確認)
③ 南東⇒北西方向以外の地下水の流れがない。	普天間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評価。	概ね 把握済み (島尻泥岩層の上面形状や地形的な特徴を考察し、地下水流動を検証)
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ない。	普天間飛行場と R4-3 孔や R6-2 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。	把握済み

4. 専門家会議の設置

本事業では、環境水理学や地下水工学、応用地質学、環境リスク評価、環境動態解析等、それぞれの分野のエキスパートを委員とした専門家会議を設置した。

前身事業を含め令和3年度から令和6年度までに専門家会議は12回開催（現地視察は3回実施）、過去の文献調査や普天間飛行場周辺の湧水等のモニタリング、観測井戸の設置等で得られた情報をもとに、PFOS等の汚染源や汚染メカニズムについて議論を重ねてきた。

表 4.1 専門家会議の構成員

氏名		役職等	専門分野
座長	平田 健正	和歌山大学 名誉教授 (環境省の専門家会議※ 座長)	環境水理学 地下水動態学
委員	江種 伸之	和歌山大学 システム工学部 教授	地下水工学 地盤工学
	黒田 登美雄	琉球大学 名誉教授	応用地質学 環境情報科学
	駒井 武	東北大学 名誉教授	環境リスク評価 資源工学
	柴田 康行	国立環境研究所 名誉研究員 (環境省の専門家会議※ 委員)	環境化学 環境動態解析

※ PFAS に対する総合戦略検討専門家会議



【令和4年度の現地視察】



【令和5年度の現地視察】



【令和6年度の専門家会議】



【専門家会議終了後の記者ブリーフィング】

写真 4.1 現地視察及び専門家会議の様子

表 4.2 専門家会議の開催日と主な議事内容

開催日		議事内容
令和3年度	第1回 令和3年9月6日	(1) 普天間飛行場周辺湧水等における有機フッ素化合物の検出状況 (2) 有機フッ素化合物汚染に係る課題 (3) 汚染源の検討・推定に必要な作業内容
	第2回 令和3年11月19日	(1) 普天間飛行場周辺湧水等における PFOS 等の検出状況 (2) 想定される汚染シナリオ (3) 汚染源検討に係る PFOS 等の諸元整理 (4) 想定される汚染メカニズム
	第3回 令和4年1月27日	(1) PFOS 等の検出状況と汚染源検討に係る諸元整理 (2) 汚染メカニズムと汚染源の推定及び絞込み
令和4年度	第1回 令和4年7月20日	(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
	第2回 令和4年11月4日 (現地視察)	(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
	第3回 令和5年2月3日	(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
令和5年度	第1回 令和5年7月18日	(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
	第2回 令和5年11月2日 (現地視察)	(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
	第3回 令和6年2月5日	(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
令和6年度	第1回 令和6年7月31日	(1) PFOS 等の定期モニタリング結果 (2) 汚染源検討の経緯と方針 (3) 令和6年度調査の実施計画
	第2回 令和6年11月6日 (現地視察)	(1) PFOS 等の定期モニタリング結果 (2) 令和6年度の調査ボーリング及び分析結果の概要 (3) 調査結果の考察と今後の実施計画
	第3回 令和7年2月4日 (記者ブリーフィング)	(1) PFOS 等の定期モニタリング結果 (2) 汚染源特定に関する検討 (3) 本事業における総括

5. 本事業における総括

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、専門家会議で重要とされた地質や地下水位及び水質データの収集に努めてきた。

3年間にわたる本事業で得られた成果を総括し、課題として残った事項や今後必要とされる事項を以下に整理した。

5.1 事業成果の総括

事業成果における総括の概要は、表 5.1 に整理したとおりである。

表 5.1 事業成果における総括の概要

対象	総括の概要
飛行場 全域	<ul style="list-style-type: none"> ・ PFOS 等の汚染源となり得る場所は、普天間飛行場内に存在すると考えられる。 ・ 地下水下流側で検出される「PFOS、PFOA、PFHxS」は古いタイプのレガシーPFOS 泡消火薬剤、「6:2FTS」は新しいタイプのモダンフルオロテロマー泡消火薬剤に由来している可能性が考えられる。 ・ 降雨の影響による濃度変動より、地下浸透した PFOS 等は、地下水とともに下流側へ直ちに流下するだけでなく、不飽和帯に残留して雨水とともに PFOS 等が地下水へ供給されていることが考えられる。
C流域	<ul style="list-style-type: none"> ・ PFOS 等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の保管等が確認された C 流域内の格納庫と考えられる。 ・ シチャヌカーで湧出する地下水は、R5-4～R4-3 孔の間（R6-2 孔近傍）の比較的狭い範囲を流下していると考えられる。
D流域	<ul style="list-style-type: none"> ・ PFOS 等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の保管等が確認された D 流域内の格納庫の可能性があると考えられる。
E流域	<ul style="list-style-type: none"> ・ PFOS 等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の使用等が確認された消火訓練施設と考えられる。 ・ 消火訓練施設で使用した泡消火薬剤由来の高濃度な PFOS 等を含む地下水は、R5-1 孔付近を經由してチュンナガーなどの湧水地点へ向かい流下している。

5.2 本事業で課題として残った事項

事業成果を踏まえ抽出した課題として残った事項を3つ挙げ、表5.2に整理した。

表5.2 本事業で課題として残った事項

課題として残った事項	対応例
<p>①汚染源におけるPFOS等の残留状況</p> <p>一部の湧水や地下水で積算降水量とPFOS等濃度の変動傾向との相関関係が把握でき、普天間飛行場内の汚染源におけるPFOS等の残留が推定されたが、その濃度や位置、深さを推定できるまでのデータは得られなかった。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 湧水及び観測井戸の水質モニタリングの継続 ・ 水質モニタリング結果で得られた汚染プルームを確認するボーリング調査 ・ 降雨後の連続採水、分析
<p>②D流域の地下水流路</p> <p>C流域とE流域については、普天間飛行場からのPFOS等を含む地下水流路はほぼ把握されたが、D流域では下流側の湧水と同等のPFOS等濃度の地下水は確認されず、十分に把握できなかった。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ これまでに調査対象としていない地下水下流側の湧水地点での水質分析 ・ 地下水の流路形成に関わる調査（文献調査、現地踏査、ボーリング調査） ・ トレーサー試験等による地下水流路の確認
<p>③PFOS等4物質以外による水質の分類</p> <p>PFOS等4物質の構成比から水質を分類したが、さらに分類の精度を向上することで、より具体的な汚染源の特定につながる可能性がある。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国の動向を踏まえながら、PFOS等4物質以外のPFASの分析 ・ 前駆体の検出の有無やその他指標となり得る物質の検討

5.3 今後必要とされる事項

事業成果の総括及び残った課題を踏まえた今後必要とされる事項は、下記のとおりである。

- ✓ 普天間飛行場周辺の地下水下流側において、高濃度のPFOS等が検出されていることから、湧水及び観測井戸を対象に、地下水位やPFOS等濃度を把握するモニタリングを実施し、汚染状況の監視を継続する。
- ✓ 一部の湧水や地下水で積算降水量とPFOS等濃度の変動傾向との相関関係を把握できたが、より詳細に検証する。
- ✓ 蓄積されたモニタリングデータ等の精査や評価を行い、特にC流域の汚染メカニズムのさらなる解明を行うことが、汚染の浄化など対策へつなげるために必要である。

以上