

地すべり水脈の把握の調査研究

末峯 章*・日浦 啓全**・王 功輝***

1. 調査目的

四国における結晶片岩地すべり地の一つである釣井地すべり地における地下水の状況を調べ、対策工の施工のための基礎資料をえる為の調査を行った。

2. 研究の方法

行った調査は湧水とボーリング地点における地すべり面附近の水質分析と地下水の年代推定である。平成 30 年度は図 1 に示す様に釣井地すべり地で採水を行った。

3. 得られた結果

3.1 水質分析

水質分析結果の一部を図 2 に示している。平成 19 年 11 月に引き続き、平成 20 年 6 月、平成 21 年 8 月に引き続き、平成 22 年 8 月に、平成 23 年 7 月、平成 24 年 3 月と平成 24 年 7 月、平成 25 年 7 月、平成 26 年 8 月、平成 27 年 8 月、平成 28 年 7 月、平成 29 年 7 月、平成 30 年 7 月に地すべり地内および周辺で採水を実施し、溶存成分濃度の分析を行った。これらの水が一年を通して同じ水質を示しながら地すべりの挙動に影響を与えるのか、季節変化があるのか、あるいは地すべり活動により水の型が変化するのか、という問題意識の元に再度、採水・分析を行った。

釣井地すべり地区で水質調査を開始してから 12 年目である。これまでに解ってきたことと本年度の結果を総合して溶存成分の多い水の分布を基本として地下水の経路に関連して考察した。地すべり地の地下水については、その起源を知り、地すべり地への流入個所や経路を知ることが出来れば、地すべり活動にどのように影響するかを推定し、ひいては合理的な地下水排除計画に資することができる。この目標をもと平成 19 年度以来 12 年間にわたり湧水点、渓流水、BH(排水ボーリング)、BV(鉛直ボーリング)からの採水資料を使って行った水質分析の結果を基にして行った地下水の水ミチを推定するための種々の試みを行ってきた。

釣井地すべりに地下水を供給する起源として 2 つの可能性が考えられた。第 1 は地すべり北部の渓流水を起源と考える場合である。1m 深地温探査によっても地すべり背後の滑落崖を含む尾根部に低温部が存在する。集落背後の滑落崖部には量的には多くないが湧水点(湧水点⑩, ⑪)が存在する。この湧水は降雨直後には流量が増しており、尾根部に降った降水だけによって涵養されていることは考えにくい。しかし、地質構造の観点からは、北部の渓流から地すべり地へ向かう水みちを想定することは困難に思われた。しかも地すべり北部の渓流水と滑落崖に存在する湧水や地すべり地内の水の型を対比したときにその連続性がみられなかったためである。第 2 の可能性としては空中写真の判読によっても明確に判定できる、滑落崖に沿う想定断層をたどるルートである。すなわち、地層の境界となっている想定断層および、片理面に水みちがあると仮定すると西側の尾根または、さらに西奥からの供給が妥当だと考えられた。

*京都大学防災研究所准教授, **高知大学名誉教授, ***京都大学防災研究所助教

まず、北の溪流から地すべり地内への流入についてみると、採水したサンプルはいずれも Ca-HCO₃ 型であるが溶存成分量はごくわずかである。しかるに、北の溪流の出口に位置する村道との交差点での採水の分析結果は一方、溶存量の多い Ca-HCO₃ 型で、明らかに北部の溪流のどの地点の水とも異なる。このことから溶存成分量の多い地すべり地内の水が県道付近の採水地点よりも上流部分で北部の溪流に混合したと考えるに至った。さらに、地すべり地内には排水量が決して多くはないが、より溶存成分量の多い BH も存在し、これらの BH の水も同様に混合したであろうと考えた。

第2の可能性である、熊谷川の上流で地すべり地への地下水が流入し、地すべり地の地下水の寛容をしているだろうという仮説については、これまでの調査では熊谷川からの明らかな水の流入地点の特定にまでは至っていないが、水質分析の結果からは論理的な整合性が取れているように思う。熊谷川は流入地点付近ともくろむ地点では堆積地状の地形を呈している。この地点を過ぎると流れは鍵形に北東から南東に向きを変える。その後、地図上の計測であるが約 1/100 もの急勾配をなして流下している。一方、地下水は流入後、集落北部の滑落崖に存在する断層崖に沿って地すべりエリアにまで流下し、釣井集落に入ると分岐する。その際、鍵となるのは排水量の多い排水ボーリング孔である。まず、Jブロック内の BH⑮、BH⑳、BH㉑を経て、さらには、Hブロック内の BH①、BH④、BH⑩、BH⑫、BH⑯を経て、そしてさらに、Dブロックの末端付近の BH㉓を経て排水される。そして分岐はさらに北部の溪流の方にも及び、村道との交差点の渓流水採水地点までの区間の何処かで溪流に合流するという経路を想定した。注目すべきことは、排水量の多いこれらの BH の位置が空中写真で判読された結果と見事に合致していたことである。過去の断層運動やそれに起因する地すべり活動により地中には地盤の脆弱化した部分が生じる。地すべり地に流入した地下水はこのような地盤の弱いところをむしろ選択的に淘汰し、地すべり地形を形成していくと思われる。水抜きボーリング等の対策工の位置を決めたりするのに空中写真の判読が現地の踏査もあわせて基本的で、しかも有効な手段であることをこのことは示している。釣井地すべりの地下水についてのこれまでの調査・研究では、単にその水質だけではなく、地質・地形を背景とした中で地すべり地内の地下水の循環という観点から、地すべり地の水文地質学として総合化すべき情報の積み重ねがかなり進んだものと思われる。この過程で用いた手法や解析方法が四国の結晶片岩地域のみだけではなく、他の地質においても普遍的に適用が可能なこともわかってきた。例えば、風化の指標とした重炭酸イオンや硫酸イオンの役割、溶存総イオン量と EC 値や HCO₃-値の相互関係である。湧水点の位置や地下水の流出状況を地形・地質状況と併せて十分に把握した上で採水点の決定・採水作業をするということが重要である。可能ならば豊水期と渇水期というように時期を違えて、さらには経年的な採水・分析作業ができれば、必ずしもトレーサーによらずとも、水質指標によって地すべり地内の水みちの推定のための十分条件をより満足すべきものに近づけることができる。その過程で、地下水の水質指標の中では HCO₃-、SO₄²⁻の2つのイオンが地すべり活動にとって重要であることを確認した。HCO₃-は土塊全体の風化に関与するが、一方で SO₄²⁻は泥質片岩の風化・粘土化に伴うすべり面の形成に大きく寄与している。水文地質学的な観点から地すべり地内の地下水を見ると地質や構造線の存在が地下水の水みち推定するにあたって大いに影響を与えていることが解った。水質指標の内、溶存

成分のみで水みちを推定することは方法論的には十分条件を満足させるには至っていないが、一定の方向性が示せた。

3.2 地下水年代の推定

1. はじめに

地すべり地の地下水、特に結晶片岩地すべり地の地下水については不明なことが多い。これは構造が複雑なことと、地すべり地が一般に広いことが大きく寄与している。

国内の地すべり地における地下水の起源についての研究は、地下水の年代分析や水質分析などによって行われている。例えば鈴木ら（2002）は福島県滝坂地すべり地において採水した試料の酸素同位体、トリチウム分析を用いて地すべり地の地下水の起源を推定している。また古谷ら（2005）は新潟県東頸城地域の地すべり地において見られる高濃度 Na-Cl 型地下水の起源について水質分析および酸素同位体比の測定によって推定を行っている。

ここでは放射性同位元素でなく、溶存ガスのトレーサーとして、化学的に安定している CFCs（フロン類）や SF₆（六フッ化硫黄）、希ガス（ヘリウムなど）を用いる。これらは近年の工業化による生産量の増加に伴い、過去数十年で大気中の濃度が増加しているため、特に滞留時間 50 年未満の若い地下水の年代推定に適している。

2. 観測地

観測地としては、徳島県の伊良原地すべり地と釣井地すべり地で行った。伊良原地すべり地では 2010 年 8 月 8 日に排水ボーリング No.3 から、伊良原地すべり地の尾根を越えたところに存在している須貝瀬では 2011 年 8 月 22 日に排水ボーリング No.9 から CFCs・SF₆ を分析するために、それぞれ 2 サンプルずつ採水した。また釣井地すべり地では 2011 年 7 月 28 日に No.23・No.15・No.22 から、2011 年 7 月 29 日に No.16・No.25 からそれぞれ 2 サンプルずつ採水した（図 3 参照）。また試料採水時に水温を計測した。降雨の影響を見るために 2012 年 3 月 14 日と 2012 年 7 月 9 日と 12 日に同じ地点で採水した。2013 年には 7 月 20 日に同じ地点で 1 サンプル採取した。2014 年には 8 月 11 日と 13 日に採水を行った。2015 年には 8 月 1 日と 2 日採水を行った。2016 年には 7 月 31 日に採水を行った。2018 年には 7 月 26 日に行った。最近では SF₆ の方が、分解能が高いため、今回も 1 サンプルにした。

大気サンプルは伊良原では 2011 年 8 月 20 日および 8 月 23 日の計 2 回、伊良原の同一地点（標高 457m 地点）で採取した。釣井では 2012 年 3 月 14 日に 2 地点で採取した。また池田と釣井で 2012 年 6 月 20 日と、釣井で 7 月 9 日に池田で 7 月 16 日に採取した。2013 年には釣井で 7 月 20 日に採取した。2015 年には 8 月 2 日に釣井で採取した。2016 年には 7 月 31 日に行った。2017 年には 7 月 29 日に行った。2018 年には 7 月 26 日に行った。

分析の結果、現在の徳島県での大気における SF₆ 濃度は、北米大気の SF₆ 濃度の 1.2 倍であった。この補正値を使用して年代測定を行った。

昨年度にも述べたが、年代測定用の採水と同時に地下水分析用の採水も行ったので、排水ボーリングからの排水では水質の大きな違いは見られていない（図 3 参照）。なおここでは示していな

いが、調査ボーリング地点での地下水の分析結果からは、少なくとも2種類の地下水が存在していることが明らかになっている。また地下水温の観測からは、排水ボーリングの No.25 の地点では地表面の温度の影響を一番受けた地下水であることが判明している。

3. 観測結果

2012年度までは、フロン類と六フッ化硫黄の2種類のガスの分析を行ったが、フロン類は環境破壊が指摘されてから、工業的に使用が制限されたため分解能が最近では低くなった(図4参照)。それに対して六フッ化硫黄は一貫して使用が増加しているため、分析結果の精度が高いというバックグラウンドがある(図5参照)。したがって地下水の年代決定には、六フッ化硫黄を使用する分析結果のほうが、信頼性が高い。また地下水の流れとしては、ピストン流モデルと指数関数モデルがある。今回は指数関数モデルを採用した。地すべり地の降雨がピストン流モデルに沿って流れるというのは、少し違っていると解釈した。

表1に採水した地下水の年代測定結果を示している。この解析条件としては採水した地下水の温度が、涵養時の温度であると仮定している。したがって涵養時の温度と違う場合には誤差が生じることになる。1度違った時誤差解析を行ったところ約1年以下という結果が得られた。特に釣井の排水ボーリング 25No.4は地下水の温度の年変化が大きいということが解っている。したがってこの地点で流出している地下水の年代には大きな誤差が含まれている。

表から明かのように、釣井では六フッ化硫黄では地下水年代では1年から16年前の地下水が流出していることが解った。特に今年度と一昨年度と一昨昨年度の地下水年代が古い地下水年代となっていた。これは採取された時の地下水の温度が例年より低いことが影響しているかもしれない。伊良原と須貝瀬の地下水は9年と7年前の地下水が流出していることが解った。また地すべり地において流出している地下水は、空間による違いがあることが判明した。この8年間の地下水年代の観測結果から、常に同じ所の地下水が新しいということではなく、同じ所は常に古いということはないので、確定的なことは言えないが経年変化があるのかもしれない。

また涵養条件を徳島県阿波池田の年平均気温と斜面の高度から推定した温度とすると、釣井では4年から9年前の地下水が流出していることが解った。

2011年の採水時は、約10日前に3日間で310mmの降雨があった。降雨の影響があるかどうかを判定するために2012年3月14日に採水を行った。このときは、採水時の前の10日間で約50mmの降雨があった。2012年7月の採水前には10日間で94.5mmの降雨があった。2013年7月には44.5mm、2014年8月には1033mmの降雨があった。2015年7月には、採水時前の1週間には降雨がなかった。2016年7月の採水前の10日間では25mmの降雨があった。2017年7月の1週間前に76mmの降雨があった。2018年には7月の10日前に15mmの降雨があった。涵養条件を採水時の地下水として、指数関数モデルを仮定すると、釣井では2年から5年前の地下水であることが判明した。確定的には言えないが、降雨の過多による変動はあまりないような結果となっている。しかし涵養条件を池田の平均気温と斜面の標高から推定する方法では、釣井の地下水の年代は1ヶ所では判定不能であり、他は3年から8年という結果となった。

またこの9年間の地下水の年代測定結果の平均を求めると、表2のようにになっている。この表が

らわかるように約6年前から8年前の地下水となっている。当たり前であることだが、測定数が少ないので標準偏差は大きい。従ってこのような単純平均をとるのはあまり正しくないかもしれない。真の地下水の年代はそれぞれ観測された年代の可能性が高いと思っている。地すべり地では地すべり活動が起り、“みずみち”が変わっている可能性が高いと推定している。その結果として、地下水の年代が変化していると、推察している。

したがってこれから地下水の涵養条件をどのようにしたら、本当の地下水の年代が決定できるかこれからの課題は大きい。しかし地すべり地を流れている地下水は、かなり前に斜面に降った降雨が流出していることは、かなりの確度で真実らしい。このことが本当なら地すべり対策工事について、もう一度原点に立ち返って検討する必要があるのではという結論が導かれる。

4. 謝辞

最後に調査にあたりましては、地元の方々並びに徳島県砂防課と徳島県西部総合県民局県土整備部の方々に大変お世話になりました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 日浦啓全・笹原克夫・山田直人・古谷元・末峯章他(2006)：水質指標を基にした地下水の経路推定の試み、第45回日本地すべり学会研究発表会講演集。pp.245-248
- 徳島県西部総合県民局・株式会社基礎建設コンサルタント(2008)：H19 三土 釣井地すべり/三好市東祖谷釣井S”地すべり調査業務(2)、成果報告書
- 徳島県西部総合県民局・株式会社基礎建設コンサルタント(2009)：H20 三土 釣井地すべり/三好市東祖谷釣井S”地すべり調査業務(2)、成果報告書
- 徳島県西部総合県民局・株式会社基礎建設コンサルタント(2010)：H22 三土 釣井地すべり/三好市東祖谷釣井S”地すべり調査業務(2)、成果報告書
- 徳島県西部総合県民局・株式会社基礎建設コンサルタント(2011)：H23 三土 釣井地すべり/三好市東祖谷釣井S2地すべり調査業務(1)、成果報告書
- 徳島県西部総合県民局・株式会社基礎建設コンサルタント(2012)：H24 三土 釣井地すべり/三好市東祖谷釣井S2地すべり調査業務(1)、成果報告書
- 前田寛之(2012)：膨潤性粘土鉱物の成因と地すべり、第51回日本地すべり学会研究発表会講演集。pp.44-49
- 鈴木将之・佐藤修(2002)：同位体からみた福島県滝坂地すべり地における地下水の起源。地すべり vol.39、No.3、pp.319-325。
- 古谷元・渡部直樹・小松原岳史・佐藤修・丸井英明(2005)：新潟県東頸城地域の地すべり土塊内における高濃度Na-Cl形地下水の分布とその起源、応用地質、vol.45、No.6、pp.281-290。
- 末峯章・日浦啓全・浅井和由・柳楽祐平・王功輝(2012)：結晶片岩地すべりの地下水年代測定、日本地すべり学会研究発表講演集、pp.61-62。
- 日浦啓全・田中昭雄(2014)：広域の水系網と地すべり地の水 ―釣井地すべりを例として―、

地すべり学会関西支部現地討論会資料、pp.29-38。

- 末峯章・柳楽祐平・浅井和由・日浦啓全（2012）：結晶片岩地すべり地の地下水の年代について、（公社）日本地すべり学会関西支部現地討論会論文集、pp.39-51。

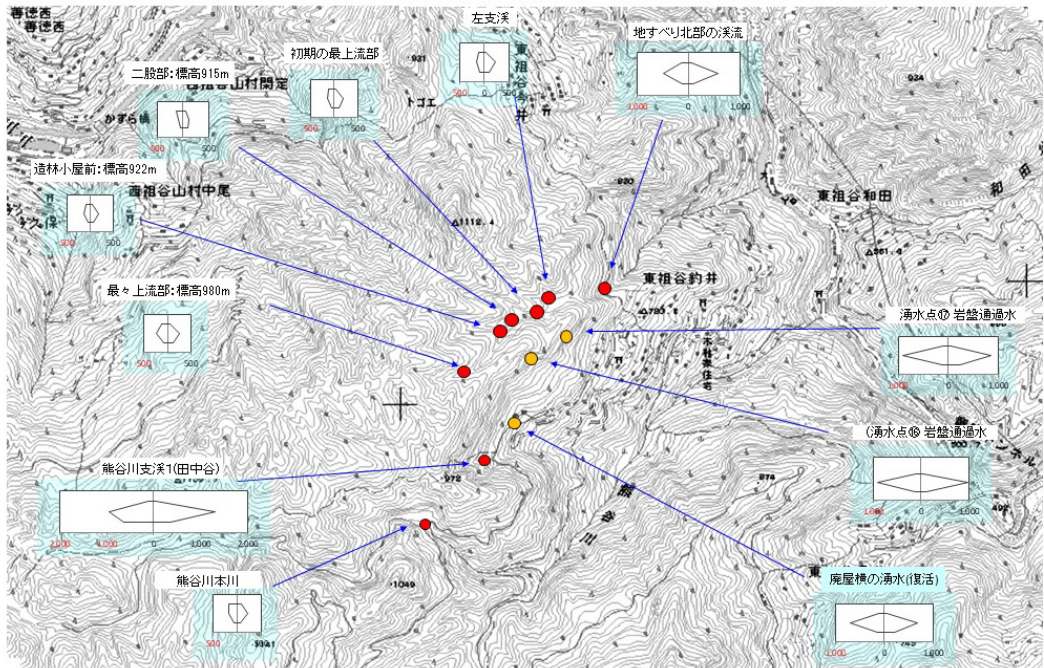


図4 釣井地すべり周辺の広域的に見た渓流水および湧水点から採水した水のヘキサダイアグラム(2018年)

図1 広域の水質分析結果

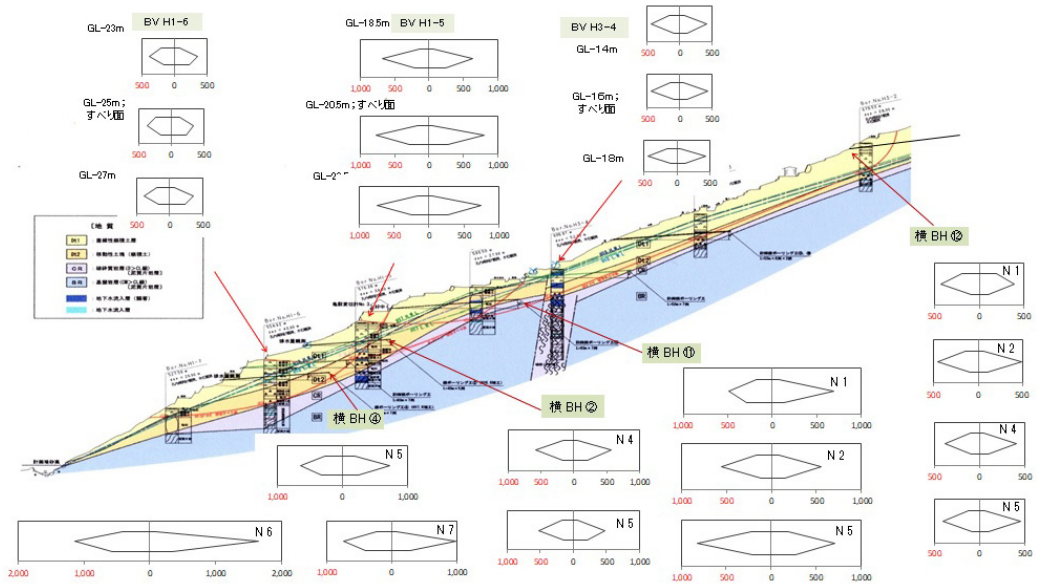


図8 縦断測線①沿いの水平(BH)および鉛直(BV)ボーリングから採水した水のヘキサダイアグラム(2018年度)
 注) 鉛直ボーリングのヘキサダイアグラムの中段はすべり面付近の深さからの採水した水の分析結果

図2 斜面の水質分析結果

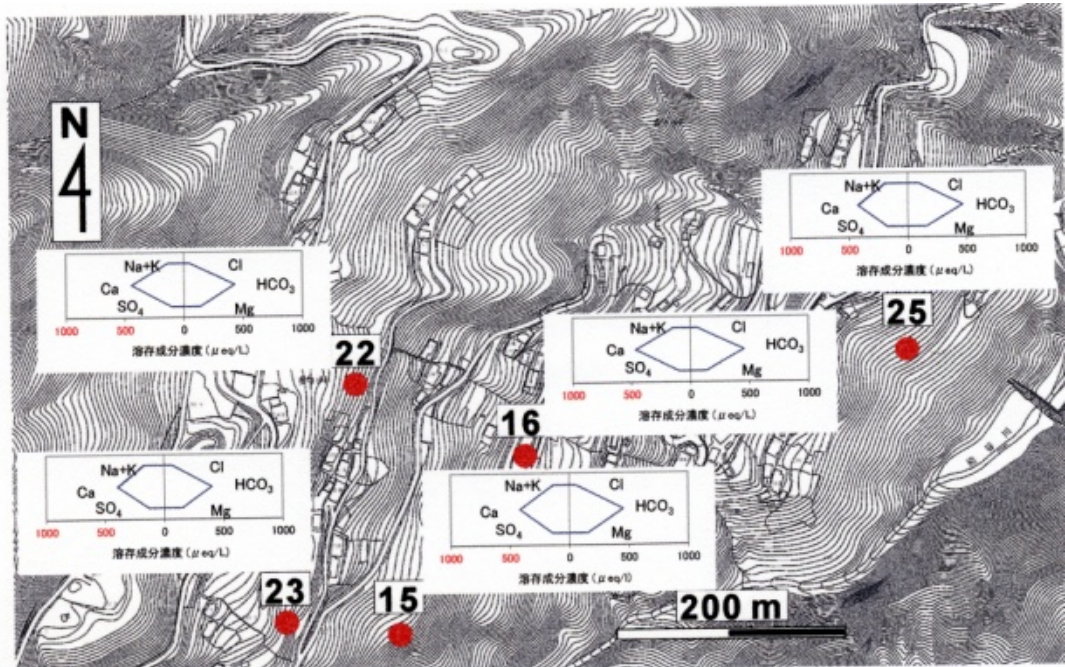


図3 釣井での採水地点(年代測定)

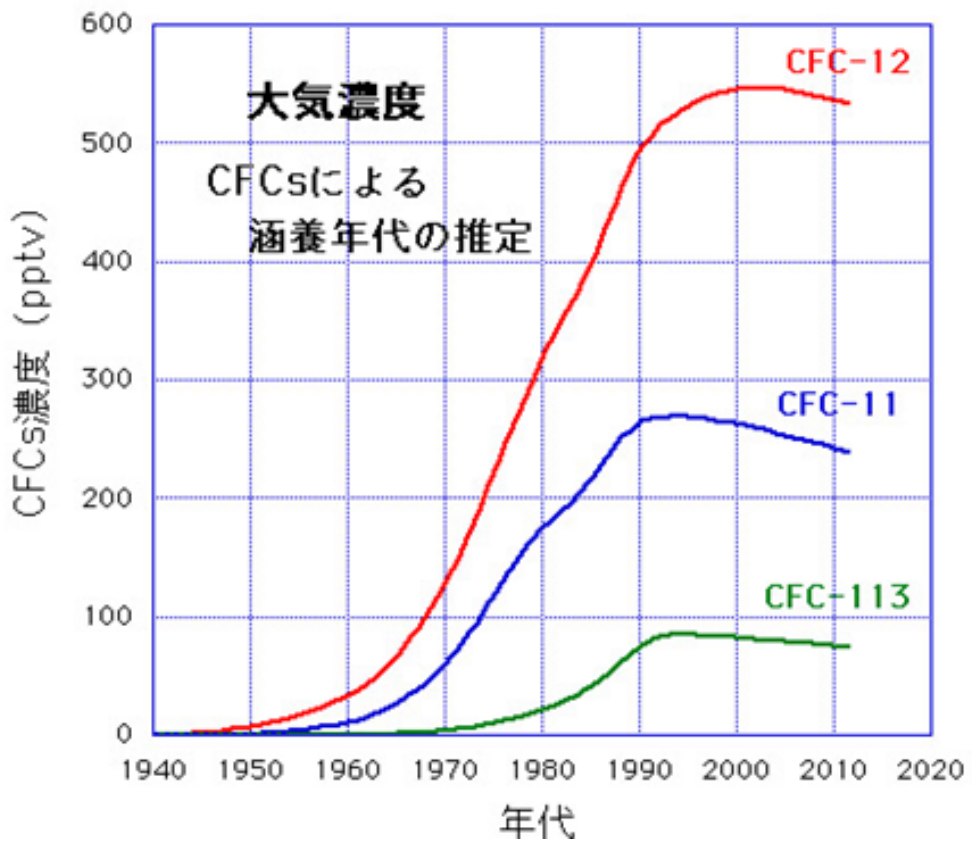


図4 フロン濃度

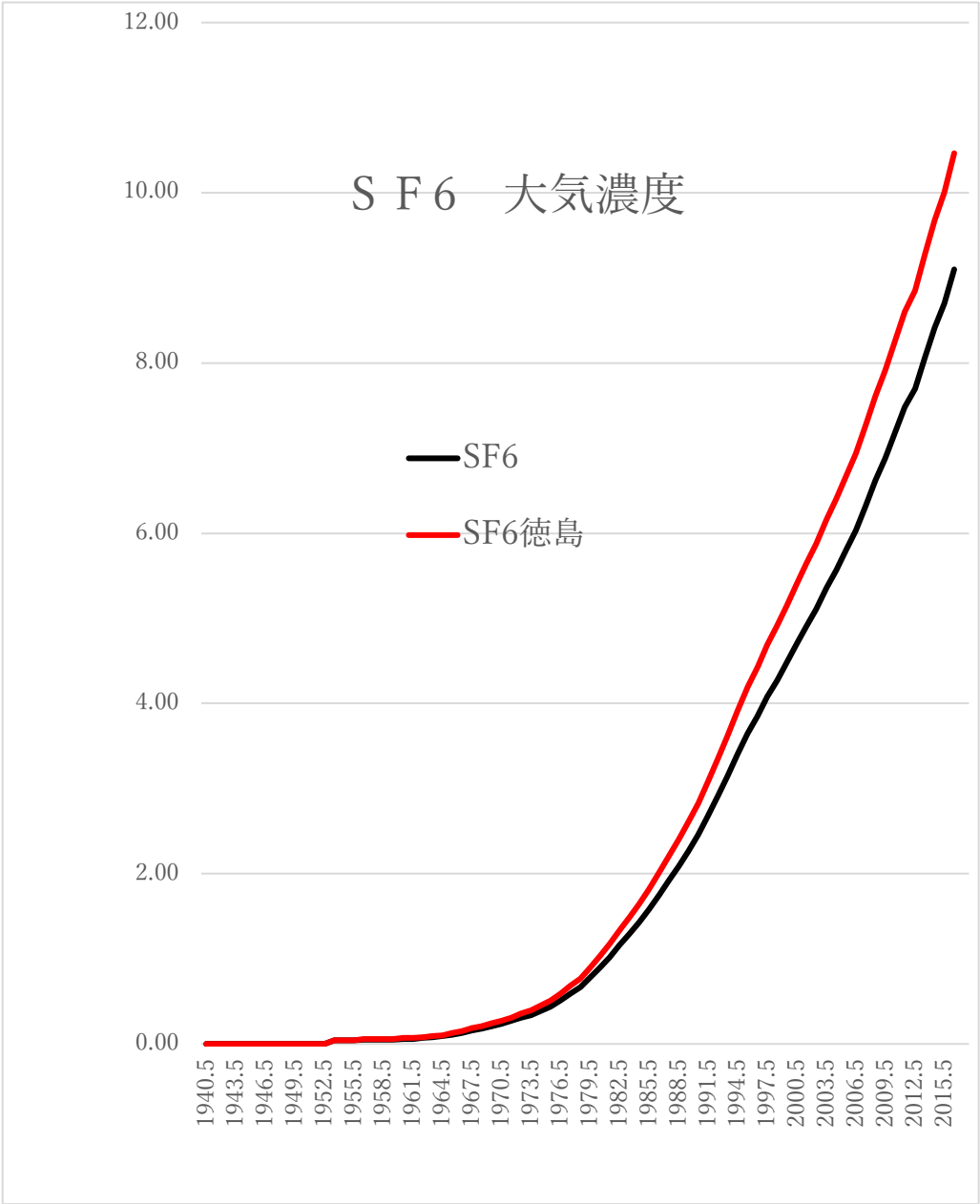


図 5 六フッ化硫黄濃度

地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N7	2018/7/26	14.5	6.71	13
釣井	排水ボ—リング15N2	2018/7/26	14.5	6.47	13
釣井	排水ボ—リング22N7	2018/7/26	13.6	6.52	13
釣井	排水ボ—リング16N7	2018/7/26	15.5	7.08	11
釣井	排水ボ—リング25N4	2018/7/26	17.5	5.61	17
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N7	2017/7/29	13.6	6.89	13
釣井	排水ボ—リング15N2	2017/7/29	13.3	7.03	13
釣井	排水ボ—リング22N7	2017/7/29	11.9	6.41	16
釣井	排水ボ—リング16N7	2017/7/29	14.7	7.6	10
釣井	排水ボ—リング25N4	2017/7/29	16.1	7.11	12
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2016/7/31	13.3	8.32	6
釣井	排水ボ—リング15N2	2016/7/31	15.4	9.97	1
釣井	排水ボ—リング22N7	2016/7/31	12.3	9.22	3
釣井	排水ボ—リング16N7	2016/7/31	13.7	8.65	5
釣井	排水ボ—リング25N4	2016/7/31	16.3	8.57	5
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2015/8/2	13.4	7.95	8
釣井	排水ボ—リング15N2	2015/8/1	14.4	8.23	6
釣井	排水ボ—リング22N7	2015/8/1	12.5	7.39	10
釣井	排水ボ—リング16N7	2015/8/2	13.2	7.32	10
釣井	排水ボ—リング25N4	2015/8/2	15.8	7.96	8
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2014/8/11	13.3	7.41	8
釣井	排水ボ—リング15N2	2014/8/11	14.0	6.65	12
釣井	排水ボ—リング22N7	2014/8/11	13.3	8.01	6
釣井	排水ボ—リング16N7	2014/8/11	13.4	7.22	9
釣井	排水ボ—リング25N4	2014/8/13	16.3	7.11	10
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2013/7/20	14.0	6.42	11
釣井	排水ボ—リング15N2	2013/7/20	12.8	6.84	9
釣井	排水ボ—リング22N7	2013/7/20	11.3	6.49	11
釣井	排水ボ—リング16N7	2013/7/20	13.6	7.35	7
釣井	排水ボ—リング25N4	2013/7/20	15.5	6.75	10
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2012/7/12	13.2	7.09	7
釣井	排水ボ—リング15N2	2012/7/12	12.8	7.65	5
釣井	排水ボ—リング22N7	2012/7/12	11.7	7.16	7
釣井	排水ボ—リング16N7	2012/7/12	13.7	7.71	5
釣井	排水ボ—リング25N4	2012/7/12	15.3	6.99	8
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2012/3/14	13.4	7.49	5
釣井	排水ボ—リング15N2	2012/3/14	12.0	8.44	2
釣井	排水ボ—リング22N7	2012/3/14	12.2	8.41	2
釣井	排水ボ—リング16N7	2012/3/14	11.6	8.19	3
釣井	排水ボ—リング25N4	2012/3/14	9.3	8.32	3
地域	試料名	採水日	酒養条件 (温度)	大気換算 濃度pptv	SF ₆ 年代分析結果 指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボ—リング23N6	2011/7/27	12.9	7.09	6
釣井	排水ボ—リング15N2	2011/7/27	13.5	7.96	3
釣井	排水ボ—リング22N7	2011/7/27	12.1	7.29	5
釣井	排水ボ—リング16N7	2011/7/27	13.7	8.11	2
釣井	排水ボ—リング25N4	2011/7/27	15.7	8.26	2
須貝瀬	排水ボ—リングNo.9	2011/8/24	13.6	7.43	5
伊良原	排水ボ—リングNo.3	2010/8/8	14.0	6.26	9

表1 地下水年代観測結果

地域	試料名	SF ₆ 年代分析結果
		指数関数モデル 平均滞留時間(年)
釣井	排水ボーリング23N6	8.8 ± 3.5
釣井	排水ボーリング15N2	7.6 ± 5.5
釣井	排水ボーリング22N7	8.4 ± 5.2
釣井	排水ボーリング16N7	7.1 ± 3.7
釣井	排水ボーリング25N4	8.8 ± 5.7

表 2 地下水年代測定結果(2018)