

第3章 PFOS等吸着特性の確認（回分式吸着実験）

11種類の活性炭の吸着特性を確認するため、各活性炭の吸着等温線を求めることとした。吸着等温線は目的物質が一定温度下で固体（活性炭）に吸着される際の、吸着後の溶液濃度（平衡濃度）と単位活性炭量への吸着量の関係を示したグラフ（図3-1参照）である。活性炭による吸着量特性を解析するために一般的に用いられる方法である。

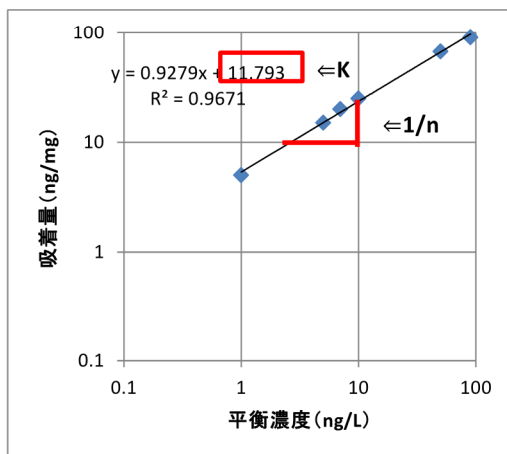


図3-1 回分式吸着等温線イメージ

【回分式吸着実験の概要】

回分：ビーカースケールでPFOS等の試薬添加原水に対して活性炭注入率9条件、反応時間1条件で回分（バッチ）処理して上記グラフにまとめる。

K値：上記グラフのy切片。活性炭への吸着量を示す。（単位：無次元）

K値が大きいと原水の低濃度領域における吸着量が多い。

1/n値：上記グラフの傾き。活性炭との吸着質の親和性を示す。（単位：無次元）

1/n値が大きいと原水濃度上昇に対する吸着量も増加量が大きく、高濃度領域の吸着性能が高いといえる。

吸着等温線を把握するにあたり、回分式吸着と反応時間に着目して、以下の2ケースについて実験を行った。

◆回分式吸着実験

11種の活性炭のPFOS等に対する吸着特性を確認する。

◆時間反応変化実験

下記を確認しRSSCT結果や実施結果との関連を確かめる。

➤ AC毎の反応速度の違い

➤ PFOS等物質毎の反応速度の違い

【回分式吸着実験と連続式吸着実験との違い】

回分式吸着実験では、活性炭によるPFOS等の吸着量の違いは分かるが、実処理条件での吸着寿命には直結しない。

3-1. 回分式吸着実験

まず、活性炭の注入率とその反応時間に関する条件を1種類の活性炭で予備実験を行って整理し、その結果に基づいて11種類の活性炭で実験を行った。

1) 実験条件の確認 (予備実験)

(1) 実験方法

予備実験に用いる活性炭は、物性試験結果から平均的な物性値であるAC9を選定した。実験条件における反応時間と活性炭注入率の設定を表3-1に示す10パターンとした。

【実験条件】

平成25年～平成30年における、北谷浄水場原水の過去最大値（PFOS+PFOA合計）は112ng/Lであった。回分式吸着実験においては、活性炭吸着後の濃度が平衡濃度になるため、実験に用いる初期濃度は破過濃度より高くしておく必要がありPFOS+PFOA合計120ng/Lと設定した。また、原水中の含有比率はPFOSとPFOA及びPFHxSで、概ね5：1：3であることから、PFOS+PFOAが120ng/Lとなり、含有比率に合わせた次のとおりの濃度に調整した。（PFOS：100ng/L、PFOA：20ng/L、PFHxS：60ng/L）

対象原水は、有機物（全有機炭素の量、以下TOCと称す。）が北谷浄水場活性炭流入水と同程度の濃度であり、原水にPFOS等を含まない石川浄水場活性炭流入水とした。

初期PFOS等濃度	: 180ng/L程度
活性炭注入率（4段階）	: 1、3、5、30mg/L
反応時間（5段階）	: 2、12、24、48、60時間
対象原水	: 石川浄水場活性炭流入水
測定項目	: PFOS、PFOA、PFHxS、TOC (TOCは活性炭吸着における共存有機物による阻害、競合の影響を確認するため)
活性炭の調整方法	: 活性炭は、粒状活性炭を0.075mm以下となるように粉砕して、湿式ふるい分けを行ったものを使用した。

表3-1 予備実験の条件

反応時間(時間)	活性炭(AC9)注入率(mg/L)				検体数
	1	3	5	30	
2	○		○		2
12			○		1
24	○	○	○	○	4
48			○		1
60	○		○		2

(2) 予備実験結果

①原水TOC

原水（石川浄水場活性炭流入水）は、11個のポリタンクにより採取しており、実験期間における水質変動がないこと、ポリタンクでの差異がないことの確認及び、共存有機物による阻害、競合を確認するためTOCを測定した。結果は表3-2に示すとおり平均1.1mg/Lであった。近日の北谷浄水場活性炭流入水のTOCは0.93mg/Lでありポリタンク間の差はなく、北谷浄水場活性炭流入水ともTOCに差がないと判断した。

表3-2 原水（石川浄水場活性炭流入水）のTOC濃度

原水採水時	2020/1/21採水											北谷浄水場 活性炭流入水 1/22	
石川浄水場 活性炭流入水 ポリタンクNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	平均	
TOC (mg/L)	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.93

②原水PFOS等

原水のPFOS等の濃度は、表3-3の0時間に示すとおり、PFOS：120ng/L、PFOA：18ng/L、PFHxS：46ng/Lであった。設定濃度に対してPFOSがやや高く、PFOA、PFHxSはやや低い値であった。

③予備実験結果

予備実験結果を表3-3、図3-2に示す。PFOS、PFOA及びPFHxSは、活性炭の注入率が高くなるほど、処理水濃度は低下傾向がみられていた。活性炭を30mg/L注入すると定量下限未満まで処理されており、注入率が高すぎるということが分かった。

反応時間による違いを確認した、活性炭注入率5mg/Lの条件では反応時間24時間以降も各成分の減少傾向がみられた。

24時間のデータを基に活性炭注入率と濃度の関係を図3-3に示す。図3-3に示すように活性炭注入率が高くなると各成分ともに減少する傾向がみられていた。平衡濃度と吸着量の関係を図3-4に示す。これらの結果より活性炭は1～15mg/L注入することで吸着等温線が得られるものと判断した。

【吸着量の計算方法】

吸着量 q は測定した各成分の平衡濃度 C 、初期濃度 C_0 、活性炭注入率 C_{PAC} から以下の計算式より算出した。

$$q = (C_0 - C) / C_{PAC}$$

反応時間が24、48、60時間の結果から吸着量を試算し、平衡濃度と吸着量の関係をまとめると図3-5のとおりとなる。平衡濃度と吸着量は24時間値と60時間値で差はあるものの、活性炭注入率を変えた場合も同様の傾向が得られていることや、本実験の中で行う時間変動実験結果を用いて反応時間が長い場合の換算を行うことが可能なこと、また、調査期間に制約があることなどの理由により、本実験は24時間を中心

に行うこととした。

表3-3 予備実験の処理水濃度

粉炭注入率	1mg/L				3mg/L				5mg/L				30mg/L			
	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計
	(ng/L)				(ng/L)				(ng/L)				(ng/L)			
0	120	18	46	184	120	18	46	184	120	18	46	184	120	18	46	184
2	93	17	41	151					64	14	30	108				
12									45	12	24	81				
24	86	16	37	139	64	14	30	108	34	11	17	62	<1	<1	<1	<1
48									20	10	15	45				
60	79	16	37	132					20	10	15	45				

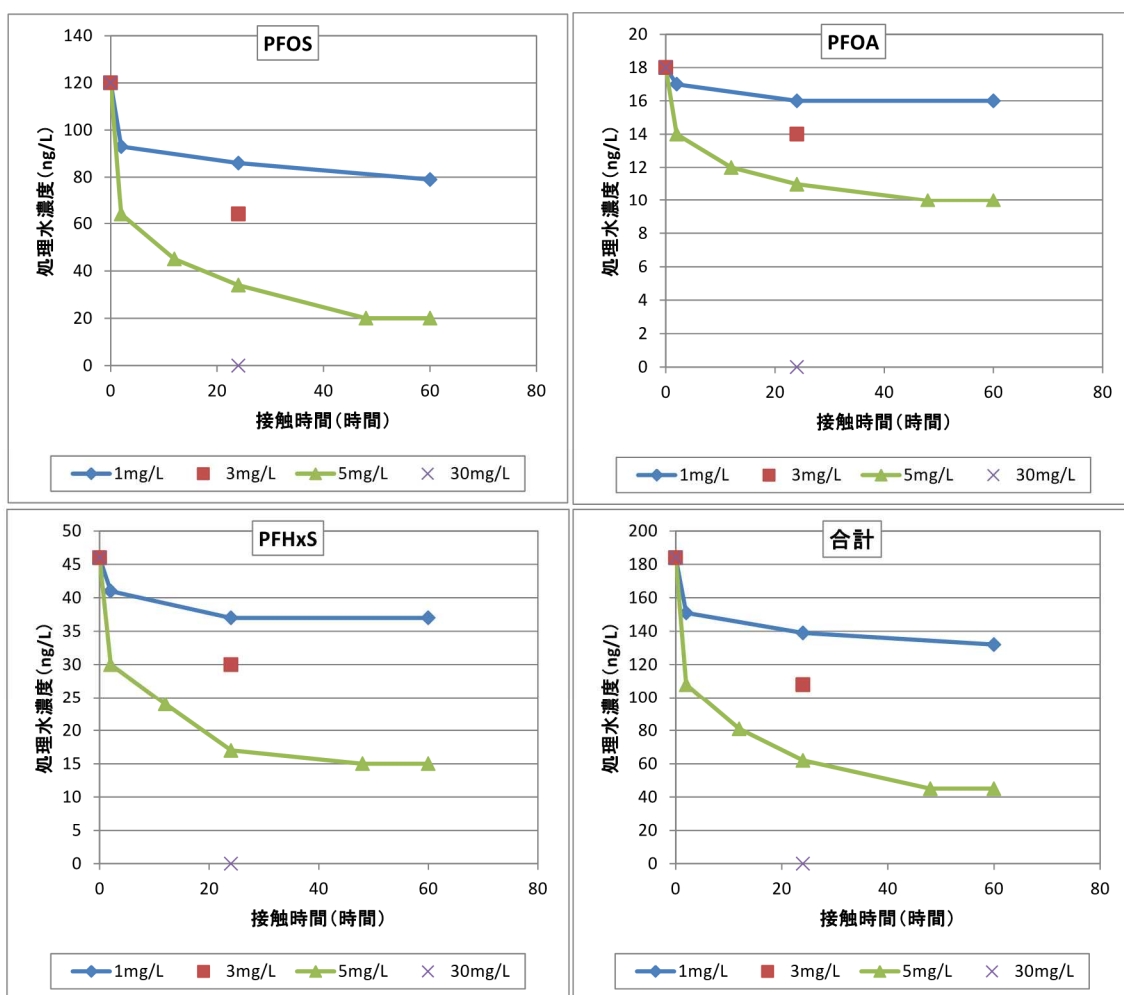


図3-2 予備実験の結果（接触時間と処理水濃度）

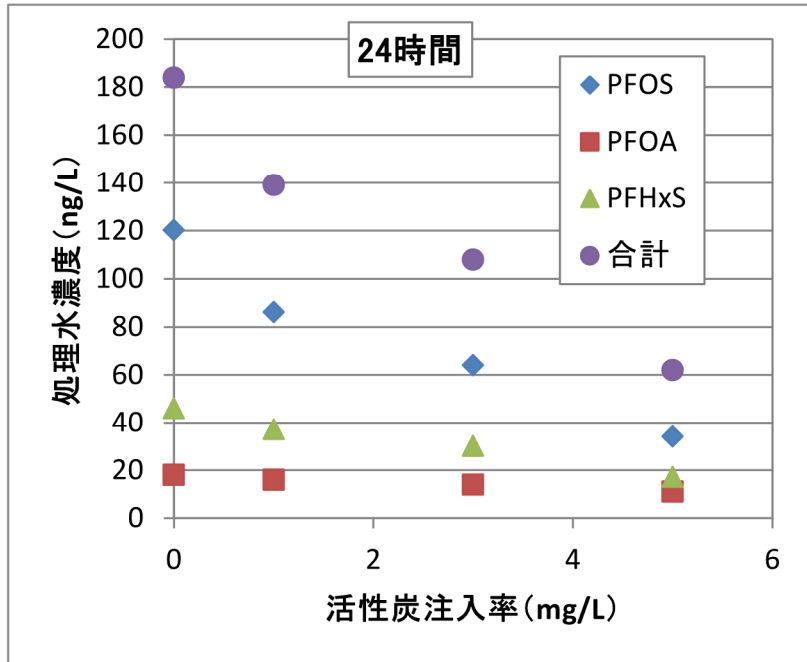


図3-3 吸着除去曲線（活性炭注入率と処理水濃度）

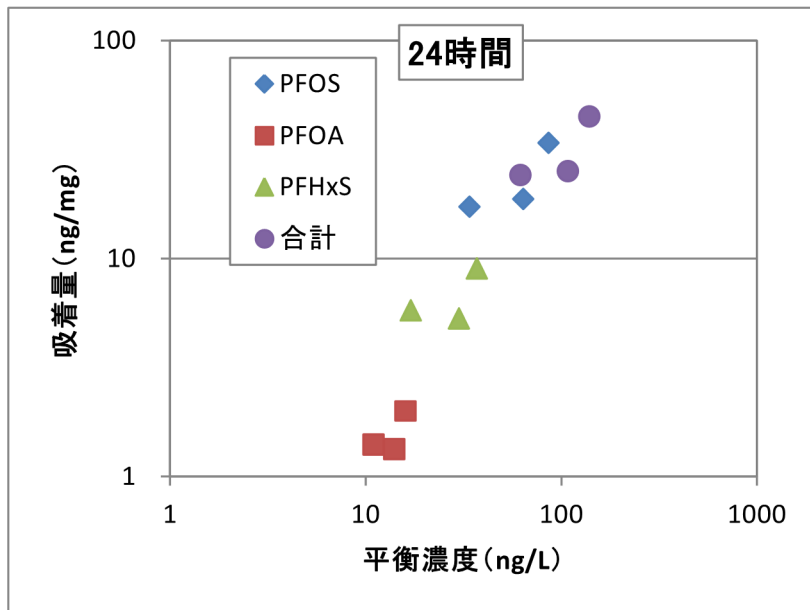


図3-4 平衡濃度と吸着量の関係

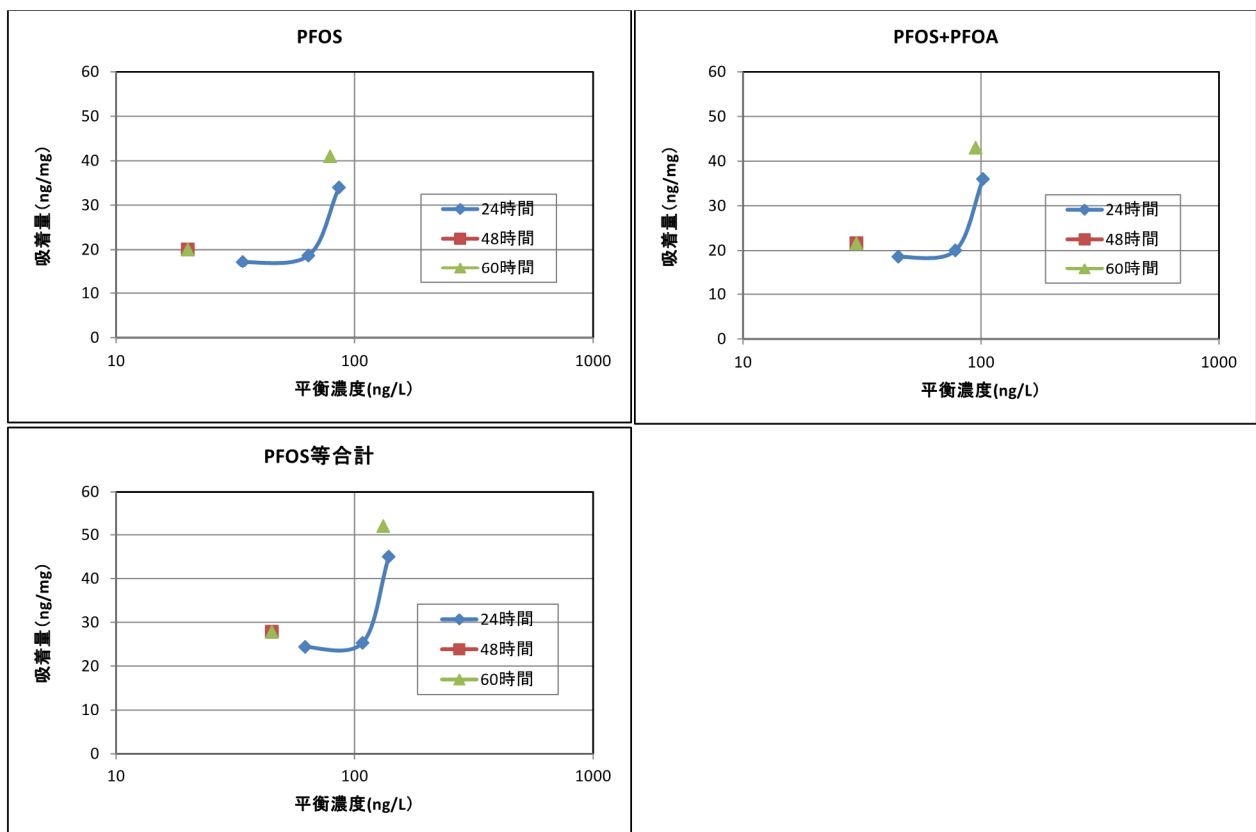


図3-5 PFOS等の反応時間別、平衡濃度と吸着量の相関

2) 回分式吸着実験 (本実験)

11種活性炭のPFOS等に対する吸着特性を確認するために回分式吸着実験を行った。

(1) 実験方法

実施運用炭3種及びその他の活性炭8種の計11種の粒状活性炭について、活性炭注入率9段階、反応時間は予備実験の結果より調査期間に限りがあることから、24時間を選定し、吸着等温線を求めた。

【実験条件】

平成25年～平成30年における、北谷浄水場原水の過去最大値 (PFOS+PFOA合計) は112ng/Lであった。回分式吸着実験においては、活性炭吸着後の濃度が平衡濃度になるため、実験に用いる初期濃度は破過濃度より高くしておく必要がありPFOS+PFOA合計120ng/Lと設定した。また、原水中の含有比率はPFOSとPFOA及びPFHxSで、概ね5:1:3であることから、PFOS+PFOAが120ng/Lとなり、含有比率に合わせて次のとおりの濃度に調整した。(PFOS: 100ng/L、PFOA: 20ng/L、PFHxS: 60ng/L)

対象原水は、有機物 (全有機炭素の量、以下TOCと称す。) が北谷浄水場活性炭流入水と同程度の濃度であり、原水にPFOS等を含まない石川浄水場活性炭流入水とした。

初期PFOS等濃度 : 180ng/L程度

活性炭注入率 (9段階) : 0.1、0.5、1、2、4、6、8、10、15mg/L

活性炭注入率は、企業局が実施した「粒状活性炭処理における有機フッ素化合物吸着性能評価」報告書の結果を参考に注入率0.1～0.125mg/Lを含む条件とした。

反応時間 : 24時間
 対象原水 : 石川浄水場活性炭流入水
 測定項目 : PFOS、PFOA、PFHxS、TOC
 (TOCは活性炭吸着における共存有機物による阻害、競合の影響を確認するため)
 活性炭の調製方法 : 活性炭は、粒状活性炭を0.075mm以下となるように粉砕して、湿式ふるい分けを行ったものを使用した。

表3-4 吸着等温線把握実験 (反応時間、活性炭注入率)

反応時間(時間)	活性炭注入率(mg/L)										検体数	
	0.0	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0		
24	(○)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9

※活性炭0mg/Lは最初に1回測定する。

(2) 実験結果

①原水の PFOS 等及び TOC

原水の PFOS 等及び TOC は、実験期間において表 3-5 に示すとおり 3 回実施した。PFOS 等の解析には平均値を用いた。TOC は平均 1.1mg/L であり、採水当初 (表 3-2 参照) と変化はみられなかった。

表3-5 回分式吸着実験 原水PFOS等及びTOC濃度

原水	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFHxS (ng/L)	TOC (mg/L)
開始時	110	21	41	1.1
中間時	86	16	33	1.0
終了時	110	16	36	1.1
平均	100	17	37	1.1

②回分式吸着実験結果

吸着量は予備実験と同様の計算手法で求めた。原水濃度は上記 3 回測定結果と用いて吸着量を計算した。結果を表 3-6 に、平衡濃度との関係を図 3-6～8 に示す。

【PFOS】

- 平衡濃度と吸着量の両対数グラフを作図した結果、全ての活性炭の結果において指数近似様の傾向がみられていた。

【PFOA】

- 平衡濃度と吸着量の対数グラフを作図した結果、AC9 は指数近似様（右上がり）の傾向がみられていた。
- AC3、AC4、AC5、AC11 については直線的に僅かながら右上がりの傾向が得られているが、その他の活性炭では右上がり傾向はみられなかった。これは PFOA の設定濃度が 20ng/L と低い値であることも要因と推察される。

【PFHxS】

- 平衡濃度と吸着量の対数グラフを作図した結果、AC3、AC6、AC8、AC9、AC10 については指数関数的に右上がりの傾向がみられる。
- AC1、AC2、AC4、AC5、AC7、AC11 については直線的に右上がり傾向がみられる。
- PFHxS においても設定濃度が低い値であるため、平衡濃度が高い結果は誤差が大きく出ている可能性が推察される。

表 3-6 平衡濃度、吸着量：24 時間実測値

分析項目		実測値平衡濃度(ng/L)				吸着量(ng/mg)			
AC No.	注入率 (mg/L)	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計
原水※	0	100	17	37	154				
AC1	0.1	57	18	37	112	430.0	-10.0	0.0	420.0
	0.5	54	21	40	115	92.0	-8.0	-6.0	78.0
	1.0	41	18	34	93	59.0	-1.0	3.0	61.0
	2.0	27	14	26	67	36.5	1.5	5.5	43.5
	4.0	11	10	15	36	22.3	1.8	5.5	29.5
	6.0	4	6	8	18	16.0	1.8	4.8	22.7
	8.0	4	5	6	15	12.0	1.5	3.9	17.4
	10.0	1	2	2	5	9.9	1.5	3.5	14.9
	15.0	<1	<1	<1	<1				
AC2	0.1	63	20	40	123	370.0	-30.0	-30.0	310.0
	0.5	50	20	39	109	100.0	-6.0	-4.0	90.0
	1.0	47	21	40	108	53.0	-4.0	-3.0	46.0
	2.0	21	16	27	64	39.5	0.5	5.0	45.0
	4.0	8	11	15	34	23.0	1.5	5.5	30.0
	6.0	3	7	8	18	16.2	1.7	4.8	22.7
	8.0	2	4	5	11	12.3	1.6	4.0	17.9
	10.0	1	2	2	5	9.9	1.5	3.5	14.9
	15.0	<1	<1	<1	<1				
AC3	0.1	67	18	35	120	330.0	-10.0	20.0	340.0
	0.5	67	16	32	115	66.0	2.0	10.0	78.0
	1.0	45	15	30	90	55.0	2.0	7.0	64.0
	2.0	31	14	24	69	34.5	1.5	6.5	42.5
	4.0	10	10	13	33	22.5	1.8	6.0	30.3
	6.0	2	5	6	13	16.3	2.0	5.2	23.5
	8.0	1	3	3	7	12.4	1.8	4.3	18.4
	10.0	1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
	15.0	<1	<1	<1	<1				
AC4	0.1	61	23	47	131	390.0	-60.0	-100.0	230.0
	0.5	43	19	35	97	114.0	-4.0	4.0	114.0
	1.0	33	17	29	79	67.0	0.0	8.0	75.0
	2.0	12	12	18	42	44.0	2.5	9.5	56.0
	4.0	3	5	6	14	24.3	3.0	7.8	35.0
	6.0	1	2	2	5	16.5	2.5	5.8	24.8
	8.0	1	1	1	3	12.4	2.0	4.5	18.9
	10.0	1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
	15.0	<1	<1	<1	<1				
AC5	0.1	70	17	35	122	300.0	0.0	20.0	320.0
	0.5	67	16	34	117	66.0	2.0	6.0	74.0
	1.0	61	16	33	110	39.0	1.0	4.0	44.0
	2.0	43	15	23	81	28.5	1.0	7.0	36.5
	4.0	37	10	14	61	15.8	1.8	5.8	23.3
	6.0	2	4	4	10	16.3	2.2	5.5	24.0
	8.0	1	2	2	5	12.4	1.9	4.4	18.6
	10.0	1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
	15.0	<1	<1	<1	<1				
AC6	0.1	51	19	36	106	490.0	-20.0	10.0	480.0
	0.5	43	18	34	95	114.0	-2.0	6.0	118.0
	1.0	47	17	31	95	53.0	0.0	6.0	59.0
	2.0	34	15	27	76	33.0	1.0	5.0	39.0
	4.0	11	12	19	42	22.3	1.3	4.5	28.0
	6.0	5	8	11	24	15.8	1.5	4.3	21.7
	8.0	4	5	6	15	12.0	1.5	3.9	17.4
	10.0	1	2	3	6	9.9	1.5	3.4	14.8
	15.0	<1	<1	<1	<1				

分析項目		実測値平衡濃度(ng/L)				吸着量(ng/mg)			
AC No.	注入率 (mg/L)	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計
原水※	0	100	17	37	154				
AC7	0.1	65	18	36	119	350.0	-10.0	10.0	350.0
	0.5	62	17	34	113	76.0	0.0	6.0	82.0
	1.0	48	16	28	92	52.0	1.0	9.0	62.0
	2.0	31	13	23	67	34.5	2.0	7.0	43.5
	4.0	10	8	12	30	22.5	2.3	6.3	31.0
	6.0	2	4	3	9	16.3	2.2	5.7	24.2
	8.0	1	2	2	5	12.4	1.9	4.4	18.6
	10.0	1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
	15.0	<1	<1	<1	<1				
	AC8	0.1	54	20	29	103	460.0	-30.0	80.0
0.5		52	18	29	99	96.0	-2.0	16.0	110.0
1.0		45	17	25	87	55.0	0.0	12.0	67.0
2.0		28	15	20	63	36.0	1.0	8.5	45.5
4.0		10	8	10	28	22.5	2.3	6.8	31.5
6.0		1	2	2	5	16.5	2.5	5.8	24.8
8.0		1	1	1	3	12.4	2.0	4.5	18.9
10.0		1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
15.0		<1	<1	<1	<1				
AC9		0.1	78	17	30	125	220.0	0.0	70.0
	0.5	76	15	30	121	48.0	4.0	14.0	66.0
	1.0	66	14	28	108	34.0	3.0	9.0	46.0
	2.0	52	13	24	89	24.0	2.0	6.5	32.5
	4.0	38	12	20	70	15.5	1.3	4.3	21.0
	6.0	12	8	10	30	14.7	1.5	4.5	20.7
	8.0	3	4	6	13	12.1	1.6	3.9	17.6
	10.0	1	3	3	7	9.9	1.4	3.4	14.7
	15.0	<1	<1	<1	<1				
	AC10	0.1	76	20	36	132	240.0	-30.0	10.0
0.5		52	19	33	104	96.0	4.0	8.0	100.0
1.0		43	18	33	94	57.0	-1.0	4.0	60.0
2.0		40	17	26	83	30.0	0.0	5.5	35.5
4.0		27	16	26	69	18.3	0.3	2.8	21.3
6.0		8	9	11	28	15.3	1.3	4.3	21.0
8.0		2	6	7	15	12.3	1.4	3.8	17.4
10.0		2	3	4	9	9.8	1.4	3.3	14.5
15.0		<1	<1	<1	<1				
AC11		0.1	69	17	36	122	310.0	0.0	10.0
	0.5	61	16	31	108	78.0	2.0	12.0	92.0
	1.0	50	15	29	94	50.0	2.0	8.0	60.0
	2.0	26	13	20	59	37.0	2.0	8.5	47.5
	4.0	8	10	11	29	23.0	1.8	6.5	31.3
	6.0	2	4	4	10	16.3	2.2	5.5	24.0
	8.0	1	3	2	6	12.4	1.8	4.4	18.5
	10.0	1	1	1	3	9.9	1.6	3.6	15.1
	15.0	<1	<1	<1	<1				

※原水濃度：3回の平均値
赤字は吸着量マイナス値

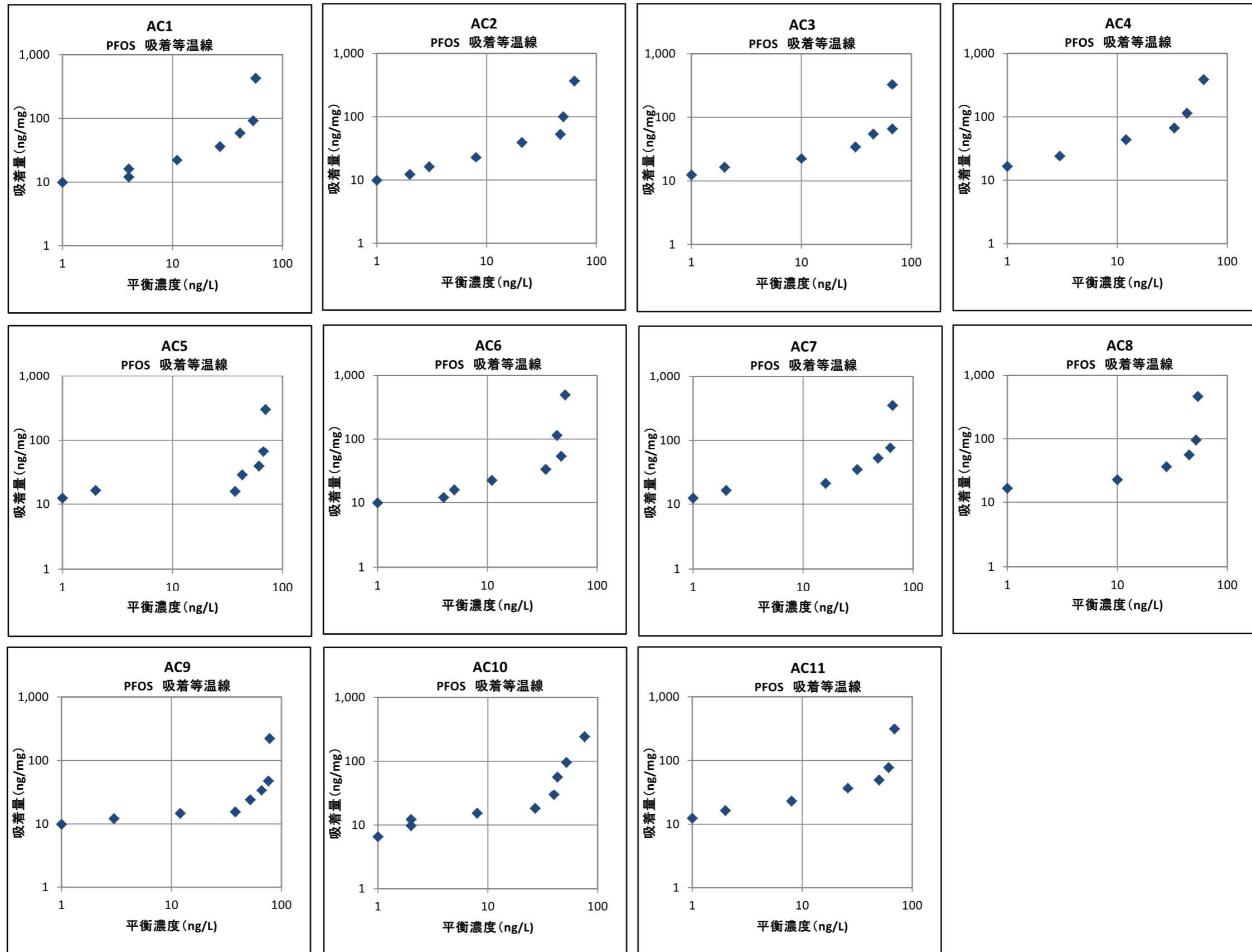


図 3-6 回分式吸着実験結果 (単体 : PFOS、24 時間実測値) (その 1)

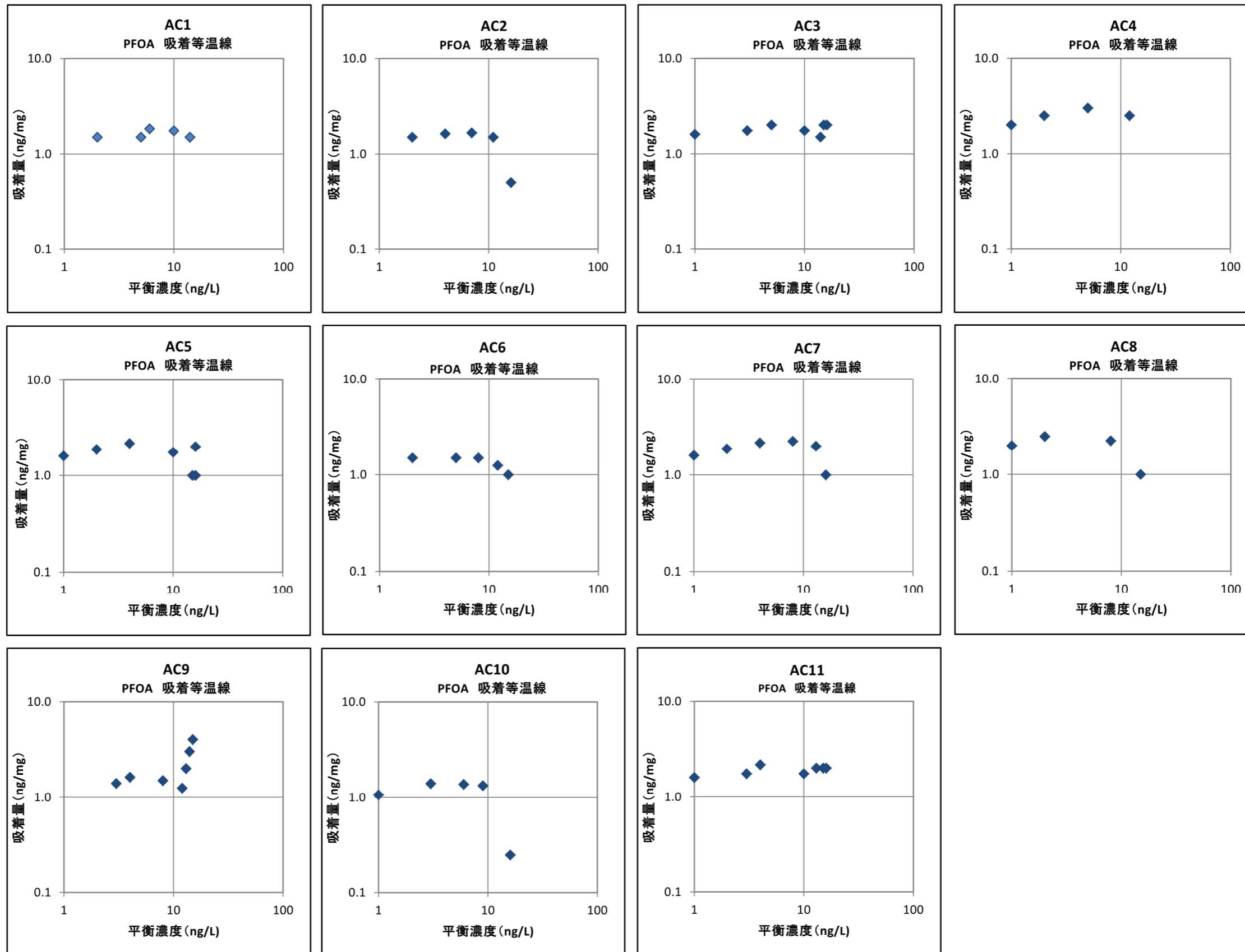


図 3-7 回分式吸着実験結果 (単体 : PFOA、24 時間実測値) (その 2)

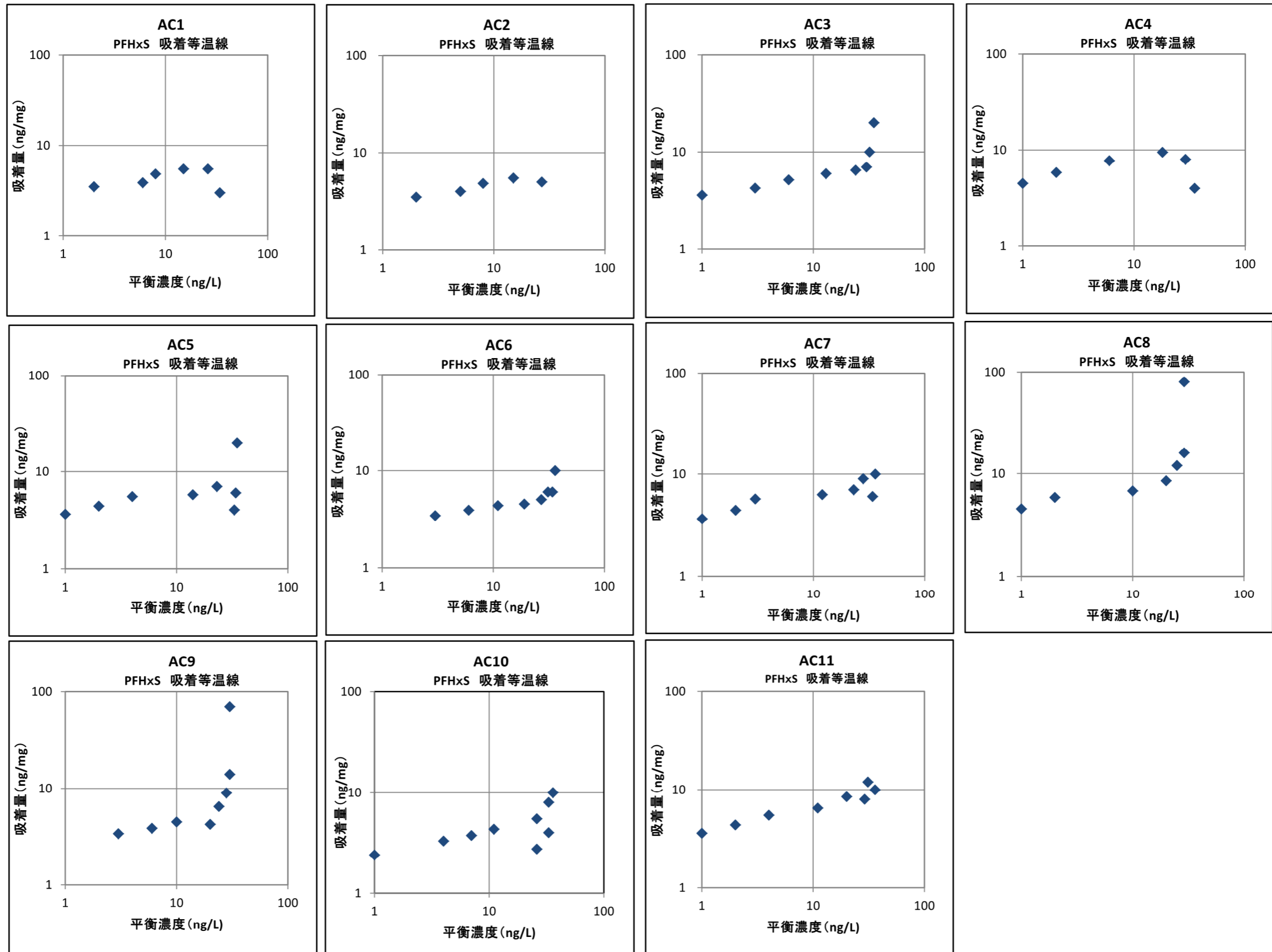


図 3-8 回分式吸着実験結果 (単体 : PFHxS、24 時間実測値) (その 3)

3-2. 回分式吸着実験における反応時間変化実験

回分式吸着実験における反応時間変化実験（以下、反応時間変化実験と称す。）は、下記を確認し RSSCT 結果や実施結果との関連を確かめた。

- AC 毎の反応速度の違い
- PFOS 等物質毎の反応速度の違い

1) 実験方法

活性炭 11 種類について、注入率を 1 条件として、最長 72 時間までの時間別の濃度変化を実験で求め、平衡状態への到達状態を確認した。

【実験条件】

平成25年～平成30年における、北谷浄水場原水の過去最大値（PFOS+PFOA合計）は112ng/Lであった。回分式吸着実験においては、活性炭吸着後の濃度が平衡濃度になるため、実験に用いる濃度は原水設定濃度より高くしておく必要がありPFOS+PFOA合計120ng/Lと設定した。また、原水中の含有比率はPFOSとPFOA及びPFHxSで、概ね5：1：3であることから、PFOS+PFOAが120ng/Lとなり、含有比率に合わせて次のとおりの濃度に調整した。（PFOS：100ng/L、PFOA：20ng/L、PFHxS：60ng/L）

初期PFOS等濃度	: 180ng/L程度
活性炭注入率	: 回分式吸着実験結果を踏まえ 3mg/L と 5mg/L の中間値として、4mg/L とした。
反応時間（4段階）	: 6、24、48、72 時間
対象原水	: 石川浄水場活性炭流入水
測定項目	: PFOS、PFOA、PFHxS、TOC (TOCは活性炭吸着における共存有機物による阻害、競合の影響を確認するため)
活性炭の調整方法	: 使用する活性炭は、粒状活性炭を0.075mm以下となるように粉碎して、湿式ふるい分けを行ったものを使用した。

表 3-7 反応時間変化実験

	活性炭注入率(mg/L)
反応時間(時間)	4.0
6	○
24	○
48	○
72	○

2) 実験結果

(1) 原水の PFOS 等及び TOC

反応時間変化実験における原水の PFOS 等及び TOC の分析結果は表 3-8 に示すとおりであり、PFOS : 100ng/L、PFOA : 17ng/L、PFHxS : 37ng/L であり、PFOS、PFOA は所定濃度であったが、PFHxS は低い値であった。TOC は 1.0mg/L で変化はみられなかった。

表 3-8 反応時間変化実験原水水質

	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFHxS (ng/L)	TOC (mg/L)
原水	100	17	37	1.0

(2) 反応時間変化結果

この実験では、活性炭注入率を 4mg/L とし、最長 72 時間まで反応させて、処理水の濃度変化を求めた。実験結果の処理水濃度と濃度変化、吸着量を表 3-9、10、図 3-9、10 に示し、これらの図表から読み取れる傾向を以下に示す。

- 全ての活性炭で、24 時間までに処理濃度は大きく減少していた。
- AC7、AC10 は 24 時間で吸着平衡に達したが、その他の活性炭については、概ね 72 時間で達していた。
- AC7、AC10 は PFOS、PFHxS でも概ね同傾向であるが、PFOA は 24 時間で全ての活性炭が平衡状態に達していた。

表 3-9 反応時間変化結果 処理水濃度、反応時間による変化量 (PFOS、PFOA、PFHxS、PFOS+PFOA 合計)

PFOS 原水濃度: 100ng/L (単位: ng/L)											
反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	33	33	24	12	40	34	29	23	40	41	39
24	15	15	13	6	37	19	8	10	38	10	8
48	8	11	6	4	6	10	8	5	16	10	4
72	5	5	2	2	2	6	7	2	10	8	3
24~72時間変化量	10	10	11	4	35	13	1	8	28	2	5
48~72時間変化量	3	6	4	2	4	4	1	3	6	2	1

PFOA 原水濃度: 17ng/L											
反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	15	17	14	13	11	15	11	9	12	13	12
24	13	15	10	10	10	12	7	8	12	8	10
48	12	14	12	7	8	12	7	4	9	8	8
72	12	12	10	5	6	11	7	3	8	8	7
24~72時間変化量	1	3	0	5	4	1	0	5	4	0	3
48~72時間変化量	0	2	2	2	2	1	0	1	1	0	1

PFHxS 原水濃度: 37ng/L											
反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	27	29	24	19	20	27	40	18	25	26	23
24	20	25	20	10	14	20	15	12	20	10	11
48	18	20	18	7	11	20	15	7	16	11	11
72	16	15	12	5	8	17	14	5	14	10	9
24~72時間変化量	4	10	8	5	6	3	1	7	6	0	2
48~72時間変化量	2	5	6	2	3	3	1	2	2	1	2

PFOS+PFOA 原水濃度: 117ng/L											
反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	48	50	38	25	51	49	40	32	52	54	51
24	28	30	23	16	47	31	15	18	50	18	18
48	20	25	18	11	14	22	15	9	25	18	12
72	17	17	12	7	8	17	14	5	18	16	10

表 3-10 反応時間変化結果 吸着量 (PFOS、PFOA、PFHxS、合計)

PFOS吸着量 (単位:ng/mg)

反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	16.8	16.8	19.0	22.0	15.0	16.5	17.8	19.3	15.0	14.8	15.3
24	21.3	21.3	21.8	23.5	15.8	20.3	23.0	22.5	15.5	22.5	23.0
48	23.0	22.3	23.5	24.0	23.5	22.5	23.0	23.8	21.0	22.5	24.0
72	23.8	23.8	24.5	24.5	24.5	23.5	23.3	24.5	22.5	23.0	24.3

PFOA吸着量

反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	0.5	0.0	0.8	1.0	1.5	0.5	1.5	2.0	1.3	1.0	1.3
24	1.0	0.5	1.8	1.8	1.8	1.3	2.5	2.3	1.3	2.3	1.8
48	1.3	0.8	1.0	2.5	2.3	1.3	2.5	3.3	2.0	2.3	2.3
72	1.3	1.3	1.8	3.0	2.8	1.5	2.5	3.5	2.3	2.3	2.5

PFHxS吸着量

反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	2.5	2.0	3.3	4.5	4.3	2.5	4.5	4.8	3.0	2.8	3.5
24	4.3	3.0	4.3	6.8	5.8	4.3	6.5	6.3	4.3	6.8	6.5
48	4.8	4.3	4.8	7.5	6.5	4.3	5.8	7.5	5.3	6.5	6.5
72	5.3	5.5	6.3	8.0	7.3	5.0	6.8	8.0	5.8	6.8	7.0

PFOS+PFOA吸着量

反応時間 (時間)	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6	17.3	16.8	19.8	23.0	16.5	17.0	19.3	21.3	16.3	15.8	16.6
24	22.3	21.8	23.6	25.3	17.6	21.6	25.5	24.8	16.8	24.8	24.8
48	24.3	23.1	24.5	26.5	25.8	23.8	25.5	27.1	23.0	24.8	26.3
72	25.1	25.1	26.3	27.5	27.3	25.0	25.8	28.0	24.8	25.3	26.8

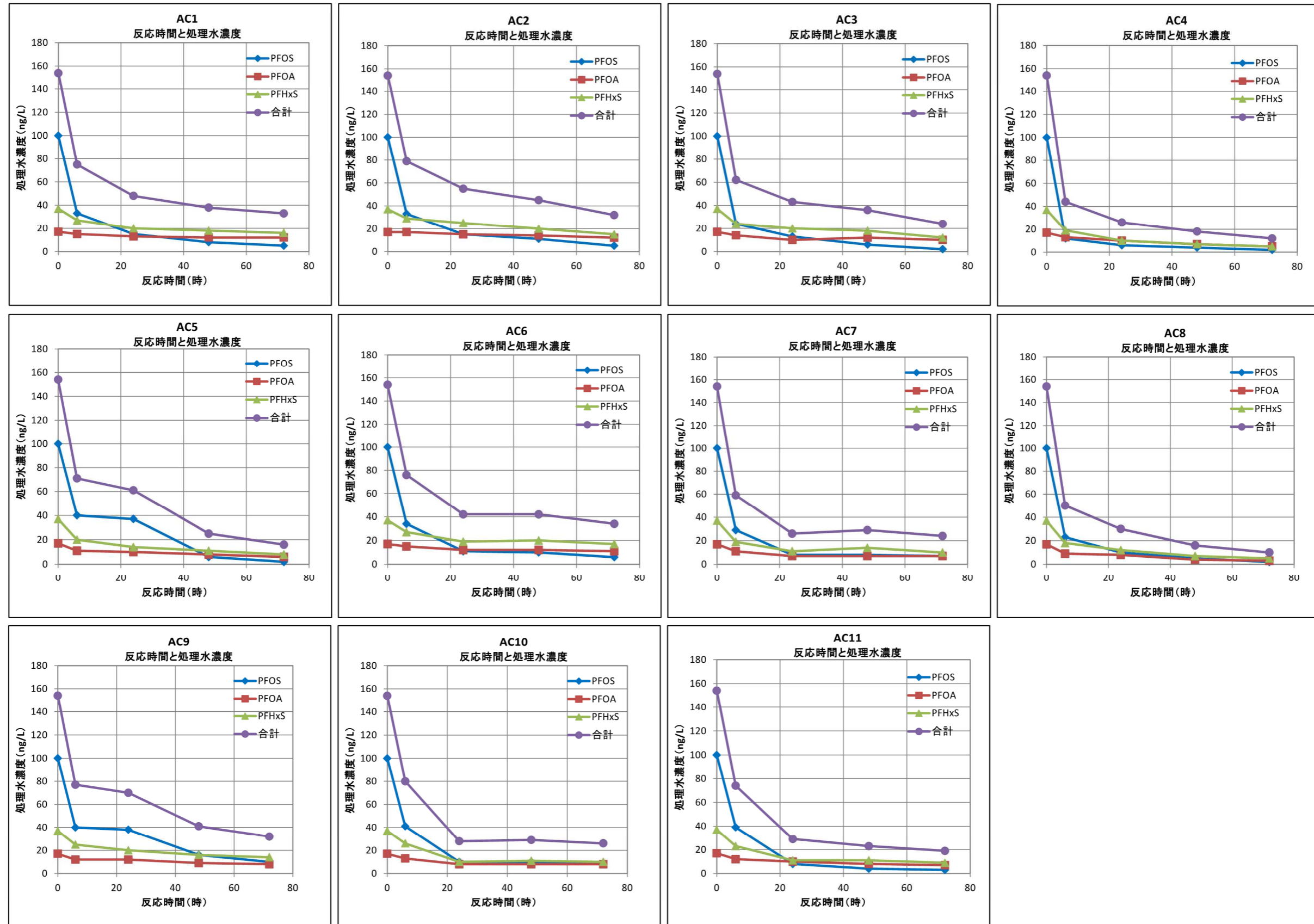


図 3-9 反応時間と処理水濃度の変化 (活性炭注入率: 4mg/L)

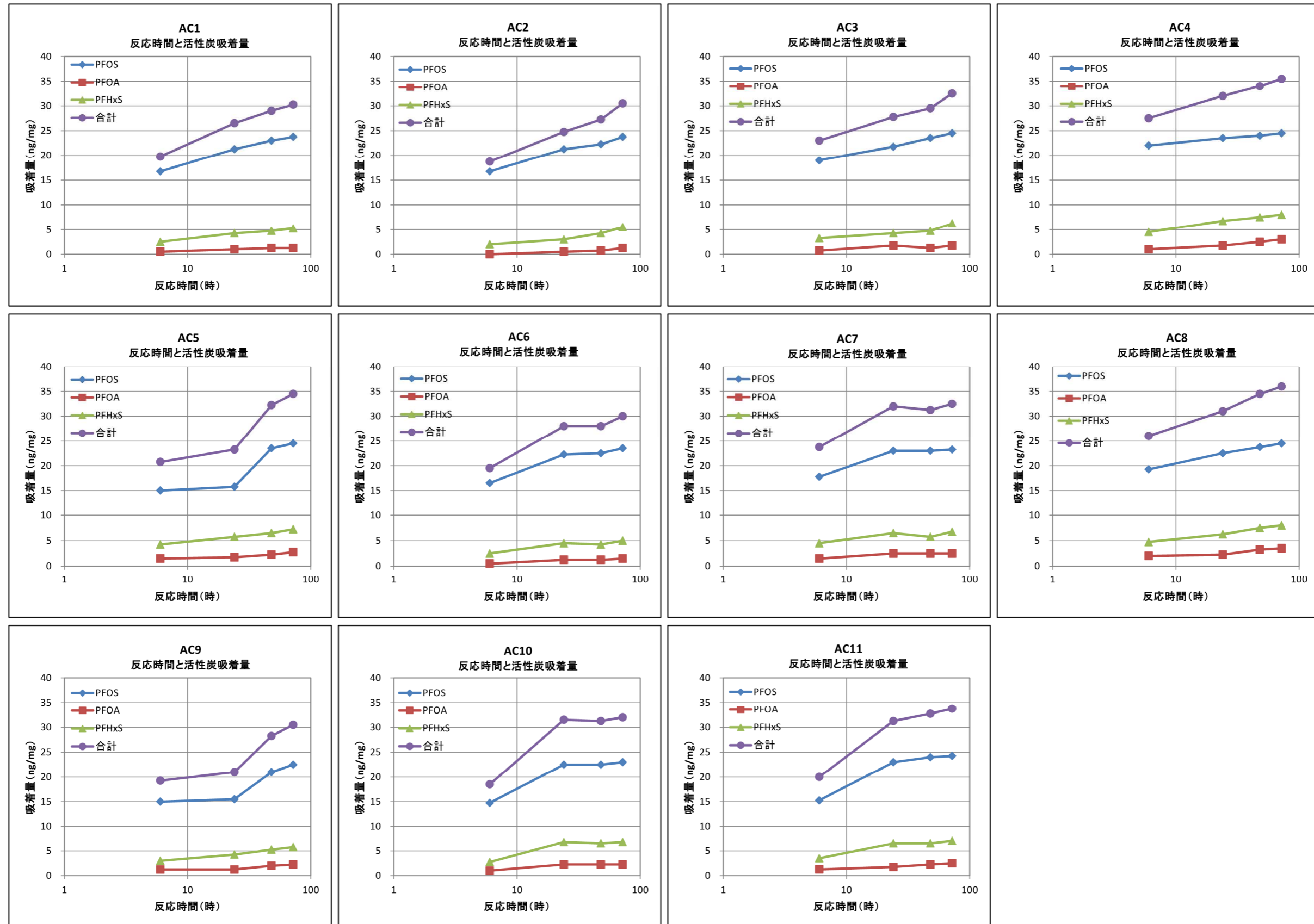


図 3-10 反応時間と吸着量の変化 (活性炭注入率: 4mg/L)

3) 回分試験における反応速度について

(1) 検討の視点

図 3-11 に示す反応時間と処理水濃度の関係性については、すべての活性炭で共通する傾向があり、初期の急な減少期とその後の緩やかな減少期の 2 つの曲線形状が見られた。

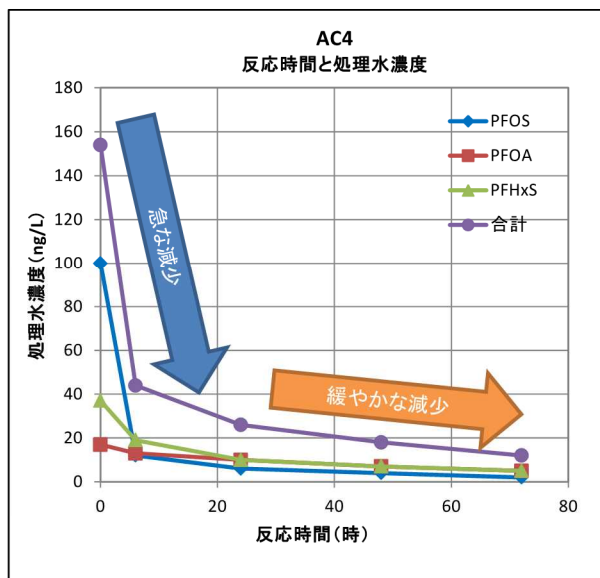


図 3-11 反応時間と処理水濃度の関係 (一例: AC4 について)

上記の傾向を踏まえ、各活性炭の特性を急な減少期における反応速度より把握するために、ここでは最も短い反応時間 (6 時間) の濃度変化状況から、次式により急な減少期の反応速度を求めて検討することとした。

【反応速度の計算方法】

6 時間反応速度 (ng/ (mg·hr))

$$= \{ \text{初期濃度 (ng/L)} - \text{6 時間後処理水濃度 (ng/L)} \} \div \text{活性炭注入量 (mg)} \\ \div \text{6 時間 (hr)}$$

なお、参考として計算した 24、72 時間の反応速度は、上記式の 6 時間後処理水濃度、6 時間をそれぞれ 24、72 時間処理水濃度、24、72 時間に置き換えて計算した。

【検討の視点】

- 活性炭の種類と反応速度の関係
- PFOS 等物質毎の反応速度の関係
- 反応速度と物性値の関係
- 反応速度と実施設での吸着特性の関係

(2) 反応速度の計算結果

前記の方法で計算した 6、24、72 時間の反応速度は表 3-11、図 3-12 に示すとおりである。

表 3-11 反応時間変化実験より求めた反応速度計算結果 (ng/(mg・hr))

反応時間	物質	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
6時間	PFOS	2.80	2.80	3.17	3.67	2.50	2.75	2.97	3.22	2.50	2.47	2.55
	PFOA	0.08	-	0.13	0.17	0.25	0.08	0.25	0.33	0.22	0.17	0.22
	PFHxS	0.42	0.33	0.54	0.75	0.71	0.42	0.75	0.79	0.50	0.46	0.58
	PFOS+PFOA	2.88	2.80	3.30	3.83	2.75	2.83	3.22	3.55	2.72	2.63	2.77
24時間	PFOS	0.89	0.89	0.91	0.98	0.66	0.85	0.96	0.94	0.65	0.94	0.96
	PFOA	0.04	0.02	0.08	0.08	0.08	0.05	0.10	0.10	0.05	0.10	0.08
	PFHxS	0.18	0.13	0.18	0.28	0.24	0.18	0.27	0.26	0.18	0.28	0.27
	PFOS+PFOA	0.93	0.91	0.98	1.05	0.73	0.90	1.06	1.03	0.70	1.03	1.03
72時間	PFOS	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33	0.32	0.34	0.31	0.32	0.34
	PFOA	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
	PFHxS	0.07	0.08	0.09	0.11	0.10	0.07	0.09	0.11	0.08	0.09	0.10
	PFOS+PFOA	0.35	0.35	0.37	0.38	0.38	0.35	0.36	0.39	0.34	0.35	0.37

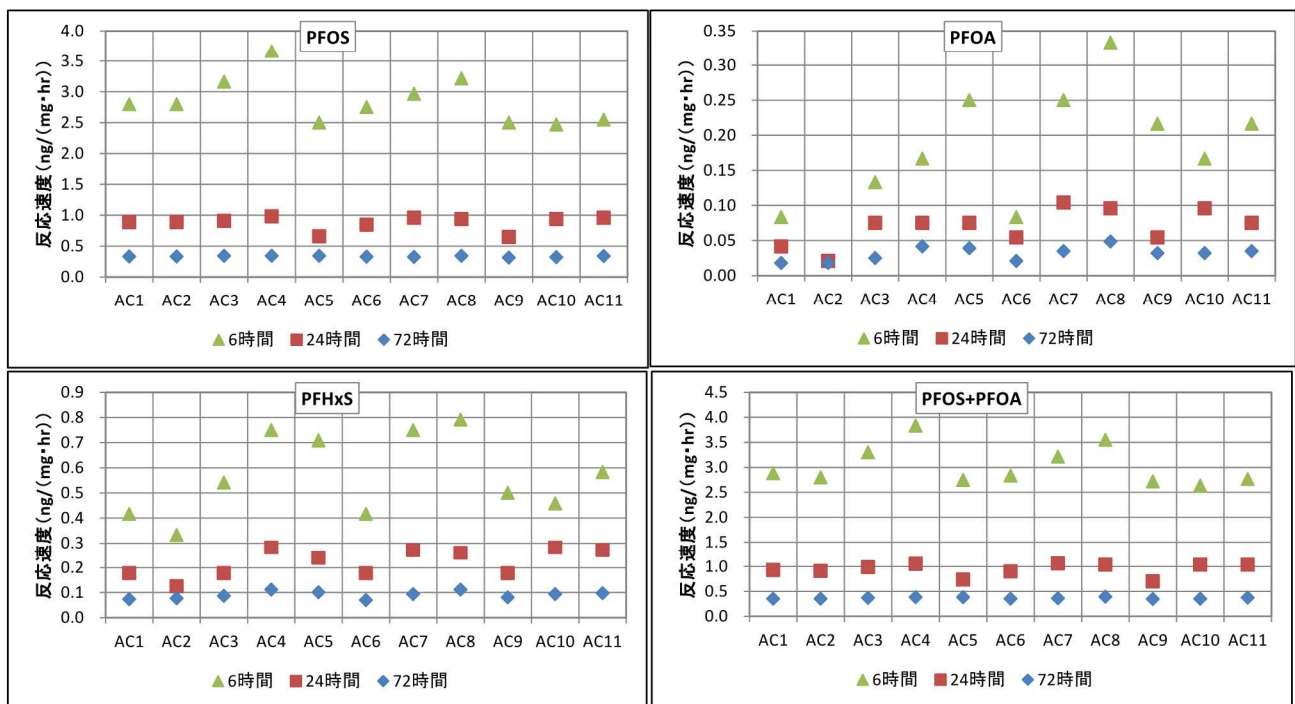


図 3-12 活性炭別の PFOS 等の反応速度 (計算結果)

(3) 反応速度の検討

PFOS 等物質毎の反応速度（6 時間）を集計し、平均値との比較を行うと表 3-12 に示すとおりである。

表 3-12 PFOS 等物質毎の反応速度、平均値、標準偏差 (ng/ (mg・hr)、6 時間データ)

物質	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11	平均値	標準偏差
PFOS	2.80	2.80	3.17	3.67	2.50	2.75	2.97	3.22	2.50	2.47	2.55	2.85	0.38
				最大						最小		—	—
PFOA	0.08	0.00	0.13	0.17	0.25	0.08	0.25	0.33	0.22	0.17	0.22	0.17	0.09
		最小						最大				—	—
PFHxS	0.42	0.33	0.54	0.75	0.71	0.42	0.75	0.79	0.50	0.46	0.58	0.57	0.16
		最小						最大				—	—
PFOS+PFOA	2.88	2.80	3.30	3.83	2.75	2.83	3.22	3.55	2.72	2.63	2.77	3.03	0.39
				最大						最小		—	—

【活性炭の種類と反応速度の関係】

<PFOS>

- PFOS に関する反応速度は、AC10 の 2.47 から AC4 の 3.67ng/ (mg・hr) の範囲で分布し、平均 2.85ng/ (mg・hr) であった。
- 標準偏差 (σ) は 0.38ng/ (mg・hr) であるため上記の分布範囲は平均値 - σ ~ 平均値 + 3 σ ng/ (mg・hr) に相当する。
- AC4 の 3.67ng/ (mg・hr) と AC10 の 2.47ng/ (mg・hr) という差のある結果が統計的に有意であるかについては、今回の実験に供した活性炭 (AC1~AC11) 毎に複数 (10~20 点) のデータを採取し、解析で判断することが望ましい。

<PFOA>

- PFOA に関する反応速度は AC2 の 0.00 から AC8 の 0.33ng/ (mg・hr) の範囲で分布し、平均 0.17ng/ (mg・hr) であった。
- 標準偏差 (σ) は 0.09ng/ (mg・hr) であるため上記の分布範囲は平均値 - 2 σ ~ 平均値 + 2 σ ng/ (mg・hr) に相当する。
- AC8 の 0.33ng/ (mg・hr) と AC2 の 0.00ng/ (mg・hr) という差のある結果が統計的に有意であるかについては、今回の実験に供した活性炭 (AC1~AC11) 毎に複数 (10~20 点) のデータを採取し、統計解析で判断することが望ましい。

<PFHxS>

- PFHxS に関する反応速度は AC10 の 0.33 から AC4 の 0.79ng/ (mg・hr) の範囲で分布し、平均 0.57 ng/ (mg・hr) であった。
- 標準偏差 (σ) は 0.39ng/ (mg・hr) であるため上記の分布範囲は平均値 \pm 2 σ ng/ (mg・hr) に相当する。
- AC8 の 0.79ng/ (mg・hr) と AC2 の 0.33ng/ (mg・hr) という差のある結果が統計的に有意あるかについては、今回の実験に供した活性炭 (AC1~AC11) 毎に複数 (10~20 点) のデータを採取し、統計解析で判断することが望ましい。

<PFOS+PFOA>

- PFOS+PFOA に関する反応速度は AC10 の 2.63 から AC4 の 3.83ng/ (mg・hr) の範囲で分布し、平均 3.03ng/ (mg・hr) であった。
- 標準偏差は 0.39ng/ (mg・hr) であるため上記の分布範囲は平均値 - 2σ ~ 平均値 + 3σ に相当する。
- AC4 の 3.83ng/ (mg・hr) と AC10 の 2.63ng/ (mg・hr) という差のある結果が統計的に有意であるかについては、今回の実験に供した活性炭 (AC1~AC11) 毎に複数 (10~20 点) のデータを採取し、統計解析で判断することが望ましい。

【PFOS 等物質と反応速度の関係】

表 3-12 の集計における PFOS 等物質毎の平均値で検討した。

PFOS	: 2.85 ng/ (mg・hr)
PFOA	: 0.19 ng/ (mg・hr)
PFHxS	: 0.57 ng/ (mg・hr)
PFOS+PFOA	: 3.03 ng/ (mg・hr)

上記のように PFOS 等物質毎に反応速度をみると、PFOS について比較的速い速度がみられた。PFOA については、初期設定濃度が 20ng/L と低い濃度であったため、反応速度も遅い結果となったものと考えられる。

PFOS 初期濃度	: 100ng/L
PFOA 初期濃度	: 20ng/L
PFHxS 初期濃度	: 60ng/L

図 3-13 は表 3-12 で計算した AC1~AC11 の反応速度を用いて、横軸に PFOS 反応速度、縦軸に PFOA、PFHxS 反応速度をプロットしたものである。図の左側の破線は PFOS 反応速度と PFOA、PFHxS 反応速度の関係の目安として PFOS 反応速度の 30% の位置を示したものである。今回の反応速度は、全てこの破線の右側にあるため、PFOS 反応速度 > PFOA 反応速度、PFOS 反応速度 > PFHxS 反応速度の関係になっていることが確認できる。

次に、PFOS 反応速度に対する PFOA 反応速度、PFHxS 反応速度の分布領域は、図中破線 (青 : PFOA、緑 : PFHxS) に示す通りで、集塊状のプロットを示しており、PFOS 反応速度に伴って、PFOA 反応速度、PFHxS 反応速度が速くなる直線的傾向はみられない。

一方、PFOA 反応速度、PFHxS 反応速度の分布の上部には、PFOS 反応速度が最も速かった AC4 と同等以上の速度を示す活性炭がみられた。図中の着色領域 (青色 : PFOA 反応速度が同等以上、緑色 : PFHxS 反応速度が同等以上) が、これに該当する。

【AC4の反応速度と同等以上の反応速度を示したもの】

- PFOA 反応速度では、AC4 : 0.17ng/(mg・hr)に対して、AC8 が約 1.9 倍、AC7、AC5 が約 1.5 倍、AC9、AC11 が約 1.3 倍であった。
- PFHxS 反応速度では、AC4 : 0.75 ng/(mg・hr)に対して、AC8 が約 1.1 倍、AC7、AC5 が約 1.0 倍であった。

このように、反応速度の速い遅いには一貫した傾向（PFOS が早ければ、PFOA、PFHxS も速い）はみられず、被吸着物質毎に異なっていた。

この結果より反応速度は、PFOS、PFOA、PFHxS を吸着する細孔の領域の違いや、被吸着物質の構造（炭素鎖の長さ等）、物性（疎水性等）により影響を受けることが推察される。

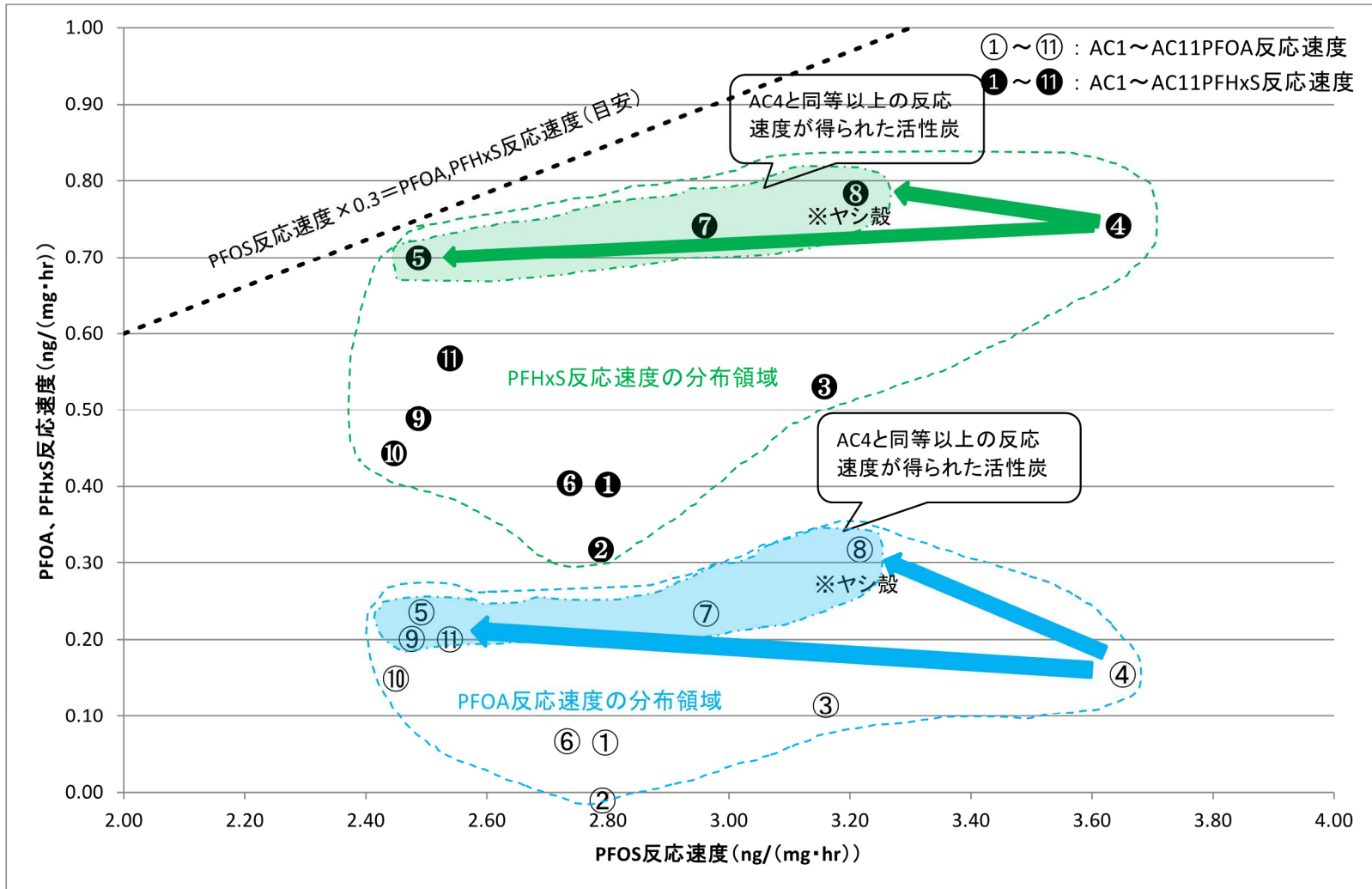


図 3-13 PFOS 反応速度と PFOA、PFHxS 反応速度

【反応速度と物性値の関係】

物性値と反応速度の関係性に関する全般的な状況は図 3-14 に示すとおりで、明確な傾向はみられない。

ここでは、反応速度と物性値の関係について大略的傾向を見出すため、PFOS に関する反応速度の上位 2 種、下位 2 種を抽出し、それぞれの物性値の範囲を集計した。整理結果は表 3-13 に示すとおりである。

表 3-13 の結果より、大略的には反応速度が速い炭種は、遅い炭種に比べて次の物性値が高く、性能が良好である結果であった。

- ヨウ素吸着量
- 細孔容積（ミクロ孔+メソ孔）
- 細孔容積（ミクロ孔）
- ABS 価 ※物性値が低い方が性能の良い

一方、フェノール価については逆の傾向で反応速度が高い炭種は性能が悪いことを示していた。

反応速度と物性値の関係については、大略的であるが一部の物性値について、ある程度の傾向がみられた。

表 3-13 反応速度と物性値の関係の大略（PFOS）

物性項目 (単位)	物性値	性能	反応速度の上位2種 AC4、AC8	反応速度の下位2種 AC9、AC10
ヨウ素吸着量 (mg/g)	高い	良い	1,050~1,470	920~990
	低い	悪い	1260	955
メチレンブルー 脱色力 (mL/g)	高い	良い	210~300	200~220
	低い	悪い	255	210
ABS価 (-)	高い	悪い	28~29	35~36
	低い	良い	29	36
フェノール価 (-)	高い	悪い	16~17	12
	低い	良い	17	12
細孔容積 (ミクロ孔+メソ孔) (mL/g)	-		0.681~0.733	0.494~0.554
			0.707	0.674
細孔容積(ミクロ孔) (mL/g)	-		0.522~0.582	0.399~0.410
			0.552	0.405
細孔容積(メソ孔) (mL/g)	-		0.099~0.211	0.095~0.144
			0.155	0.120

上段:範囲

下段:平均値

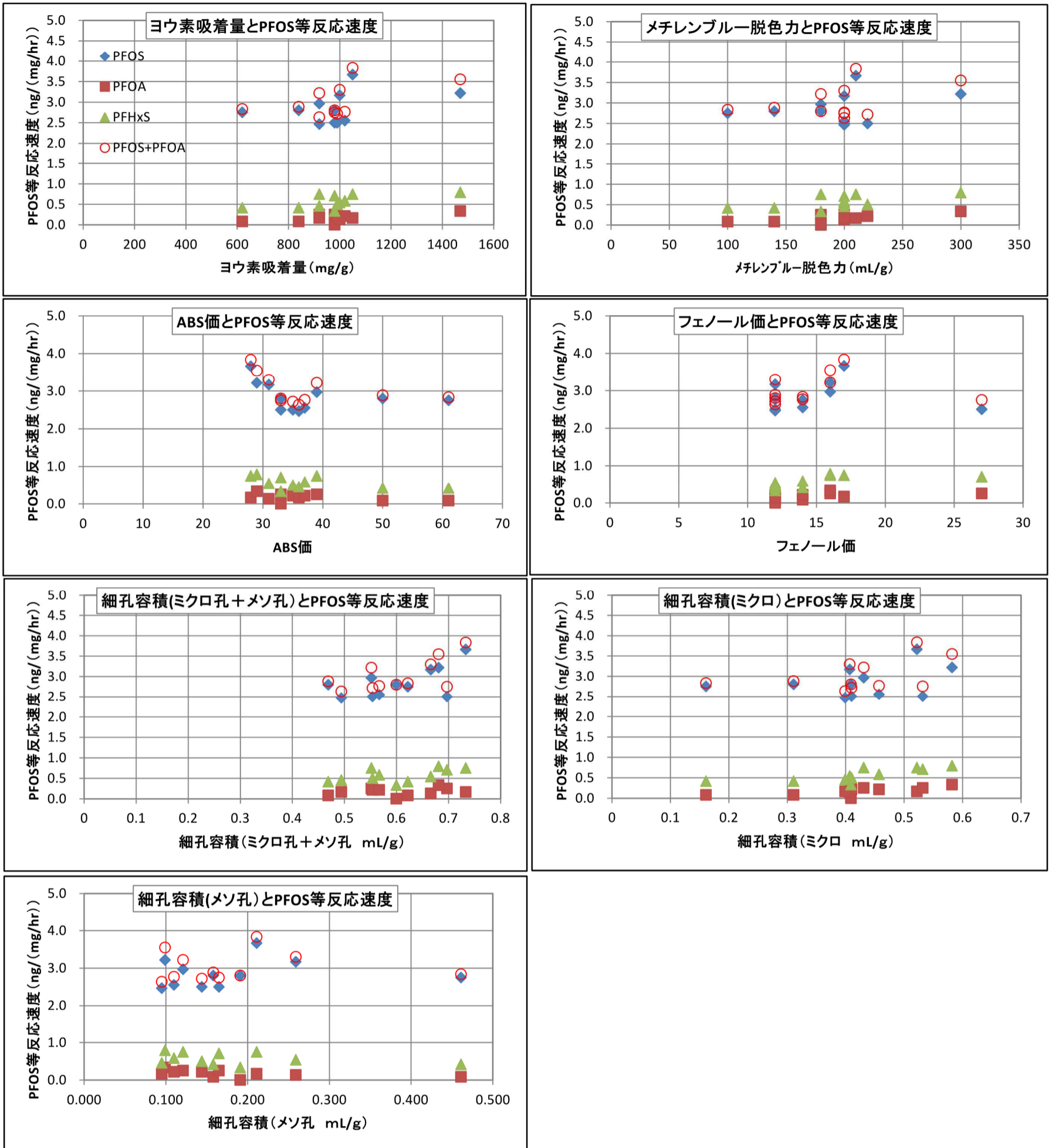


図 3-14 物性値と 6 時間反応速度の関係 (PFOS、PFOA、PFHxS、PFOS+PFOA)

3-3. 吸着定数の算出

吸着定数の算出方法は第3章の冒頭に示した手法で行った。

反応時間変化実験結果から、反応時間 24 時間と 72 時間で比べると平衡状態は以下のとおりであった。

【24 時間】

- 平衡状態に到達したと判断した活性炭 : AC7、AC10
- 平衡状態に到達しなかった活性炭 : 上記以外の活性炭 9 種

【72 時間】

- 平衡状態に到達したと判断した活性炭 : 11 種全て
- 平衡状態に到達しなかった活性炭 : なし

吸着定数を求める場合、反応時間 24 時間では平衡状態に到達していない活性炭が多数あることから過小評価となる。

そこで、回分式吸着実験結果で得られた実測値を基に、反応時間変化実験結果を用いて 72 時間換算値とし、吸着等温線を作成した。

1) 吸着量の 72 時間値への換算

- ① 24 時間と 72 時間の平衡濃度の換算係数を求めた。
換算係数 = 72 時間濃度 ÷ 24 時間濃度
- ② 全ての活性炭において換算係数を求めると表 3-14 に示すとおりである。
- ③ 24 時間で吸着平衡に到達したと判断した活性炭は、72 時間後においても処理水濃度変化がみられない。そのため換算係数は 1 付近となり 72 時間に換算しても平衡濃度が大きく変化しないことから、全ての活性炭について 72 時間への換算を行った。
- ④ 得られた換算係数で 24 時間実測値 (表 3-6 参照) を 72 時間換算値に換算すると表 3-15 に示すとおりである。

表 3-14 平衡濃度 24・72 時実測値と 72 時間換算値への換算係数

AC No.	時間	実測値(ng/L)			換算係数		
		PFOS	PFOA	PFHxS	PFOS	PFOA	PFHxS
AC1	24	15	13	20	0.33	0.92	0.80
	72	5	12	16			
AC2	24	15	15	25	0.33	0.80	0.60
	72	5	12	15			
AC3	24	13	10	20	0.15	1.00	0.60
	72	2	10	12			
AC4	24	6	10	10	0.33	0.50	0.50
	72	2	5	5			
AC5	24	37	10	14	0.05	0.60	0.57
	72	2	6	8			
AC6	24	11	12	19	0.55	0.92	0.89
	72	6	11	17			
AC7	24	8	7	11	0.88	1.00	0.91
	72	7	7	10			
AC8	24	10	8	12	0.20	0.38	0.42
	72	2	3	5			
AC9	24	38	12	20	0.26	0.67	0.70
	72	10	8	14			
AC10	24	10	8	10	0.80	1.00	1.00
	72	8	8	10			
AC11	24	8	10	11	0.38	0.70	0.82
	72	3	7	9			

2) 吸着量の算出

吸着量は、Freundlich の式で求めることができる。Freundlich の式は以下のとおり。

$$q = \frac{(C_0 - C)}{C_{PAC}}$$

ここに、 C_0 : 初期濃度 (原水濃度 3 回測定平均値)
 C : 平衡濃度 (処理水濃度)
 C_{PAC} : 活性炭注入率

上記式に 72 時間換算値を当てはめて、吸着量を求めると、表 3-16 に示すとおりである。

表 3-16 で得られた 72 時間換算値平衡濃度及び 72 時間換算値吸着量の関係を作図すると図 3-15~17 に示すとおりである。

表 3-16 72 時間換算値平衡濃度及び 72 時間換算値吸着量

分析項目		72時間換算値平衡濃度 (ng/L)				72時間換算値吸着量 (ng/mg)			
AC No.	注入率 (mg/L)	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計
原水※	0	100	17	37	154				
AC1	0.1	19	17	30	65	810	4	74	888
	0.5	18	19	32	69	164	-5	10	169
	1.0	14	17	27	57	86	0	10	97
	2.0	9	13	21	43	46	2	8	56
	4.0	4	9	12	25	24	2	6	32
	6.0	1.3	6	6	13.3	16	2	5	23
	8.0	1.3	5	5	10.7	12	2	4	18
	10.0	0.3	2	2	3.8	10	2	4	15
	15.0								
AC2	0.1	21	16	24	61	790	10	130	930
	0.5	17	16	23	56	167	2	27	196
	1.0	16	17	24	56	84	0	13	98
	2.0	7	13	16	36	47	2	10	59
	4.0	3	9	9	20	24	2	7	33
	6.0	1.0	6	5	11.4	17	2	5	24
	8.0	0.7	3	3	6.9	12	2	4	18
	10.0	0.3	2	1.2	3.1	10	2	4	15
	15.0								
AC3	0.1	10	18	21	49	897	-10	160	1,047
	0.5	10	16	19	46	179	2	36	217
	1.0	7	15	18	40	93	2	19	114
	2.0	5	14	14	33	48	2	11	60
	4.0	2	10	8	19	25	2	7	34
	6.0	0.3	5	4	8.9	17	2	6	24
	8.0	0.2	3	2	5.0	12	2	4	19
	10.0	0.2	1.0	0.6	1.8	10	2	4	15
	15.0								
AC4	0.1	20	12	24	55	797	55	135	987
	0.5	14	10	18	41	171	15	39	225
	1.0	11	9	15	34	89	9	23	120
	2.0	4	6	9	19	48	6	14	68
	4.0	1.0	3	3	6.5	25	4	9	37
	6.0	0.3	1.0	1.0	2.3	17	3	6	25
	8.0	0.3	0.5	0.5	1.3	12	2	5	19
	10.0	0.3	0.5	0.5	1.3	10	2	4	15
	15.0								
AC5	0.1	4	10	20	34	962	68	170	1,200
	0.5	4	10	19	33	193	15	35	243
	1.0	3	10	19	32	97	7	18	122
	2.0	2	9	13	24	49	4	12	65
	4.0	2	6	8	16	25	3	7	35
	6.0	0.1	2	2	4.8	17	2	6	25
	8.0	0.1	1.2	1.1	2.4	12	2	4	19
	10.0	0.1	0.6	0.6	1.2	10	2	4	15
	15.0								
AC6	0.1	28	17	32	77	722	-4	48	766
	0.5	23	17	30	70	153	1	13	167
	1.0	26	16	28	69	74	1	9	85
	2.0	19	14	24	56	41	2	6	49
	4.0	6	11	17	34	24	2	5	30
	6.0	3	7	10	20	16	2	5	22
	8.0	2	5	5	12	12	2	4	18
	10.0	0.5	2	3	5.1	10	2	3	15
15.0									

分析項目		72時間換算値平衡濃度 (ng/L)				72時間換算値吸着量 (ng/mg)			
AC No.	注入率 (mg/L)	PFOS	PFOA	PFHxS	合計	PFOS	PFOA	PFHxS	合計
原水※	0	100	17	37	154				
AC7	0.1	57	18	33	108	431	-10	43	464
	0.5	54	17	31	102	92	0	12	104
	1.0	42	16	25	83	58	1	12	71
	2.0	27	13	21	61	36	2	8	46
	4.0	9	8	11	28	23	2	7	32
	6.0	2	4	3	8	16	2	6	24
	8.0	0.9	2	2	4.7	12	2	4	19
	10.0	0.9	1.0	0.9	2.8	10	2	4	15
	15.0								
AC8	0.1	11	8	12	30	892	95	249	1,236
	0.5	10	7	12	29	179	21	50	250
	1.0	9	6	10	26	91	11	27	128
	2.0	6	6	8	20	47	6	14	67
	4.0	2	3	4	9	25	4	8	36
	6.0	0.2	0.8	0.8	1.8	17	3	6	25
	8.0	0.2	0.4	0.4	1.0	12	2	5	19
	10.0	0.2	0.4	0.4	1.0	10	2	4	15
	15.0								
AC9	0.1	21	11	21	53	795	57	160	1,011
	0.5	20	10	21	51	160	14	32	206
	1.0	17	9	20	46	83	8	17	108
	2.0	14	9	17	39	43	4	10	57
	4.0	10	8	14	32	23	2	6	31
	6.0	3	5	7	15	16	2	5	23
	8.0	0.8	3	4	7.7	12	2	4	18
	10.0	0.3	2	2	4.4	10	2	3	15
	15.0								
AC10	0.1	61	20	36	117	392	-30	10	372
	0.5	42	19	33	94	117	-4	8	121
	1.0	34	18	33	85	66	-1	4	69
	2.0	32	17	26	75	34	0.0	6	40
	4.0	22	10	20	52	20	0.3	3	23
	6.0	6	9	11	26	16	1.3	4	21
	8.0	2	6	7	15	12	1.4	4	17
	10.0	2	3	4	9	10	1.4	3	15
	15.0								
AC11	0.1	26	12	29	67	741	51	75	868
	0.5	23	11	25	59	154	12	23	189
	1.0	19	11	24	53	81	7	13	101
	2.0	10	9	16	35	45	4	10	59
	4.0	3	7	9	19	24	3	7	34
	6.0	0.8	3	3	6.8	17	2	6	25
	8.0	0.4	2	2	4.1	12	2	4	19
	10.0	0.4	0.7	0.8	1.9	10	2	4	15
15.0									

：吸着等温線選択範囲

※原水濃度：3回の平均値

赤字は吸着量マイナス値

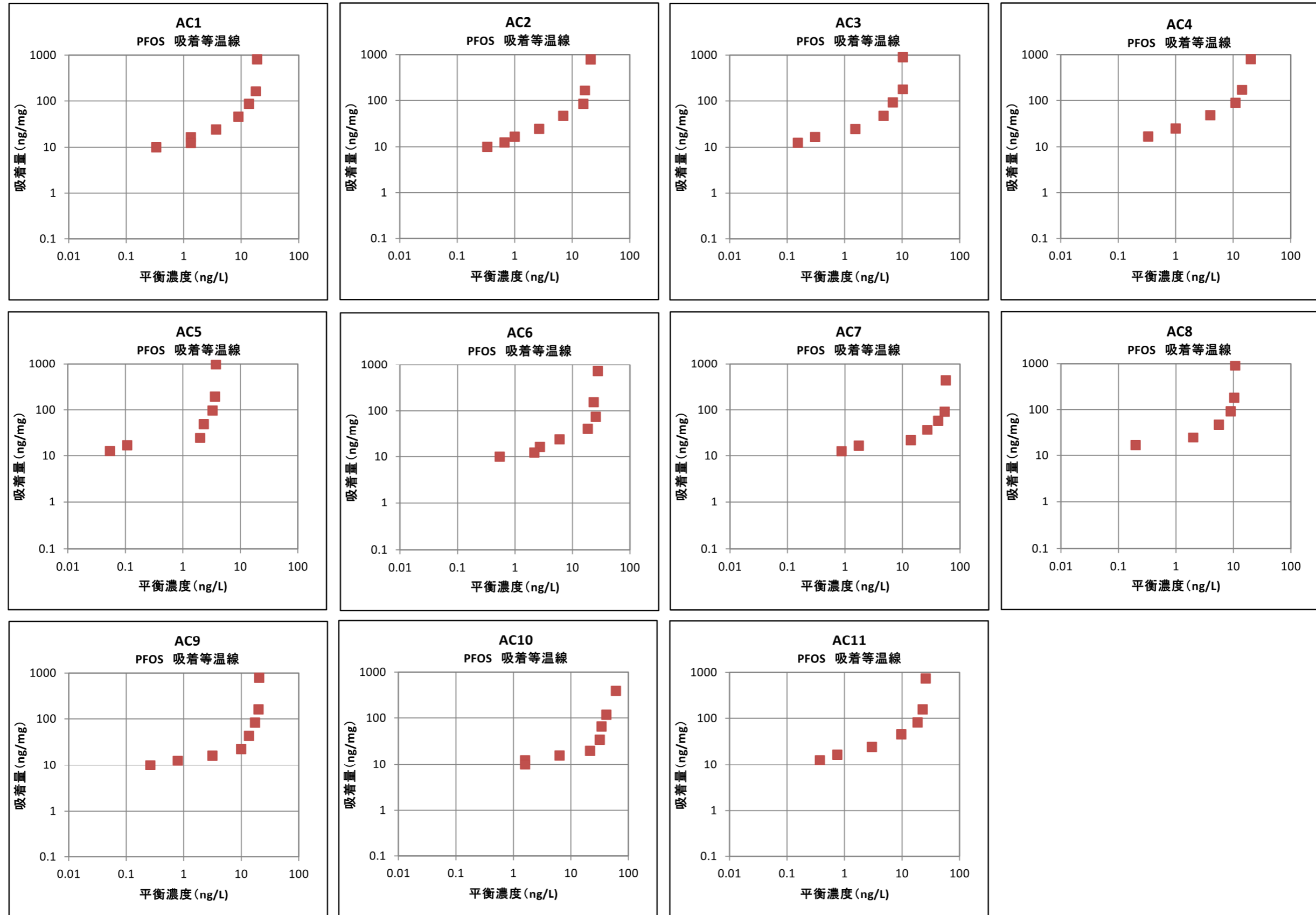


図 3-15 回分式吸着実験結果 (PFOS : 72 時間換算値) (その 1)

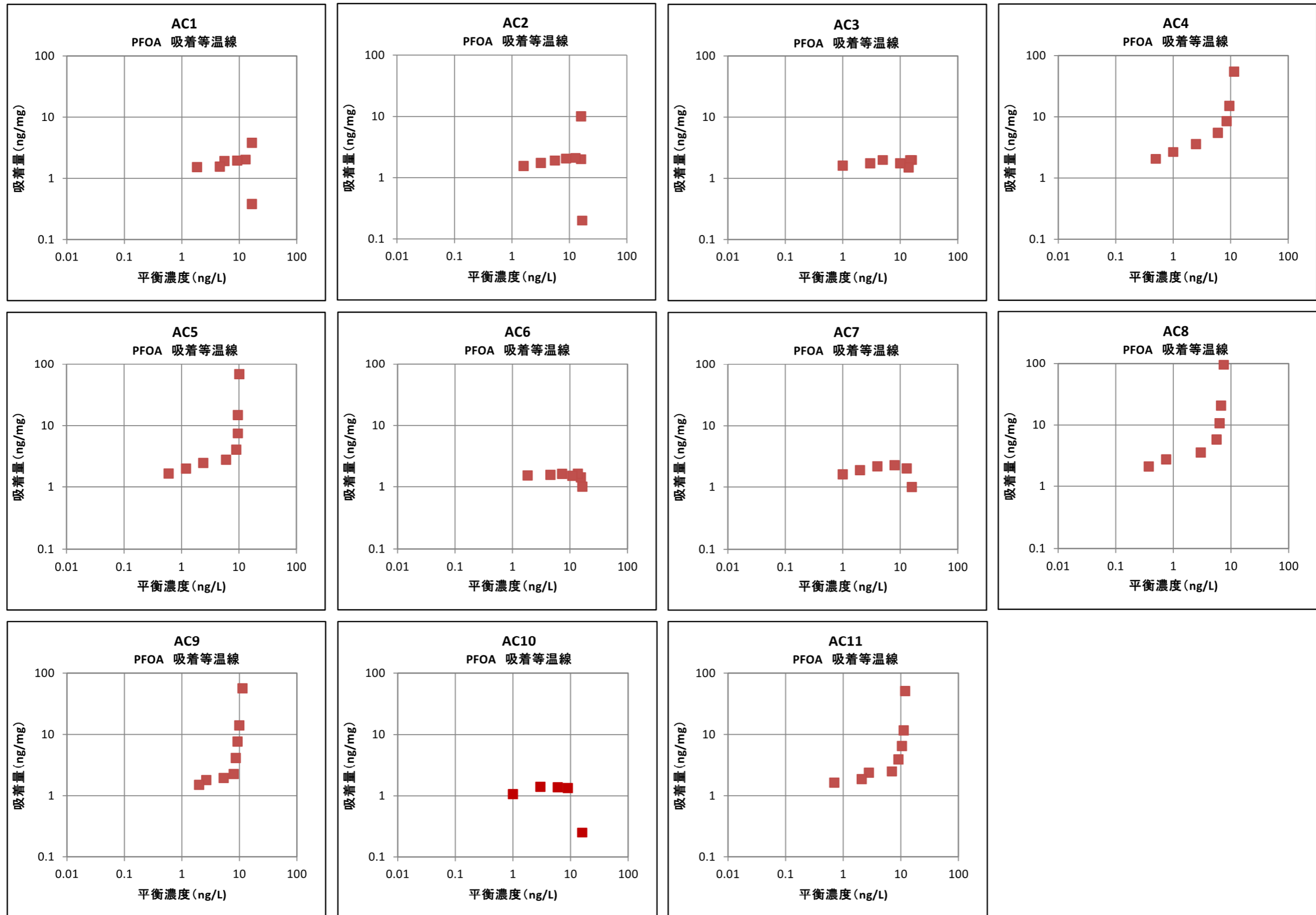


図 3-16 回分式吸着実験結果 (PFOA : 72 時間換算値) (その 2)

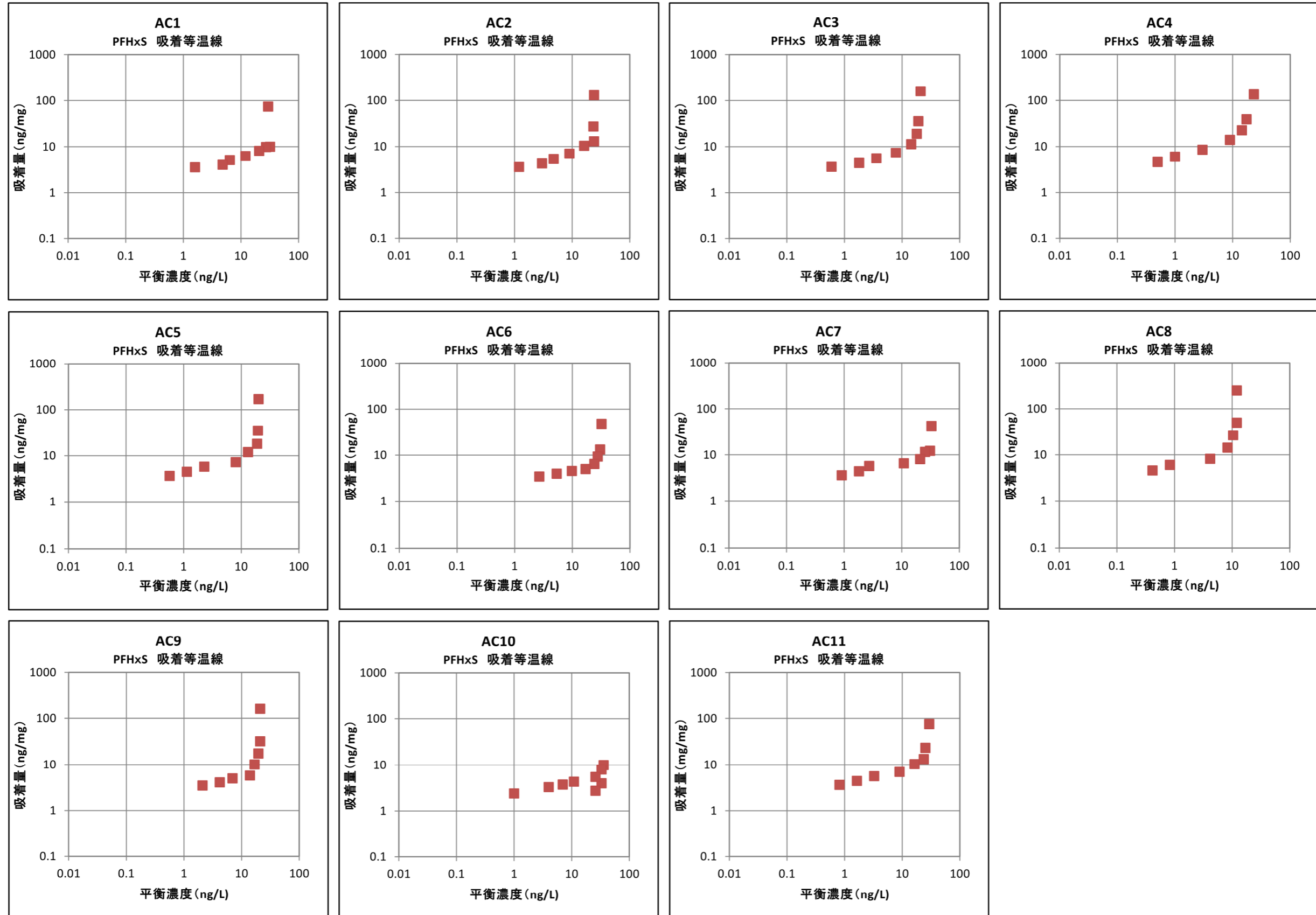


図 3-17 回分式吸着実験結果 (PFHxS : 72 時間換算値) (その 3)

3) 吸着定数の算出

Freundlich の式から吸着定数 K 、 $1/n$ を求めることができる。

$$q = \frac{(C_0 - C)}{C_{PAC}}$$

$$q = KC^{1/n}$$

ここに、 C_0 : 初期濃度 (原水濃度 3 回測定平均値)

C : 平衡濃度 (処理水濃度)

C_{PAC} : 活性炭注入率

K 、 $1/n$: 吸着定数

両辺の対数を取ると以下の数式のような直線近似式が得られる。

$$\log q = \log K + (1/n) \log C$$

$1/n$ は活性炭と吸着質の親和性を、 K は活性炭への吸着容量を示している。その直線の傾きから $1/n$ 、 $C=1$ の時の吸着量から K が求められる。

- K が大きくかつ、 $1/n$ が大きい場合は低濃度の吸着性能が高く、濃度が高くなると吸着量の増加が大きい活性炭となる。
- K が大きくかつ、 $1/n$ が小さい場合は低濃度の吸着性能が高く、濃度が高くなっても吸着量の増加が少ない活性炭となる。
- K が小さくかつ、 $1/n$ が大きい場合は低濃度の吸着性能が低く、濃度が高くなると吸着量の増加が大きい活性炭となる。
- K が小さくかつ、 $1/n$ が小さい場合は低濃度の吸着性能が低く、濃度が高くなっても吸着量の増加が少ない活性炭となる。

72 時間換算値を用いて、各活性炭全てのデータで近似解析を行うと、指数近似の相関となり、直線近似が得られない (図 3-15~17 参照)。

そこで、平衡吸着濃度より低濃度 5 点について近似解析を行うと、図 3-18~20 に示すとおり、決定係数も高い直線近似相関が得られた。

低濃度 5 点の選定は、24 時間実測値で平衡濃度が 1 未満~1ng/L が連続した場合には、最初の平衡濃度 1ng/L の吸着量のみを採用した (表 3-16 参照 色付け)。

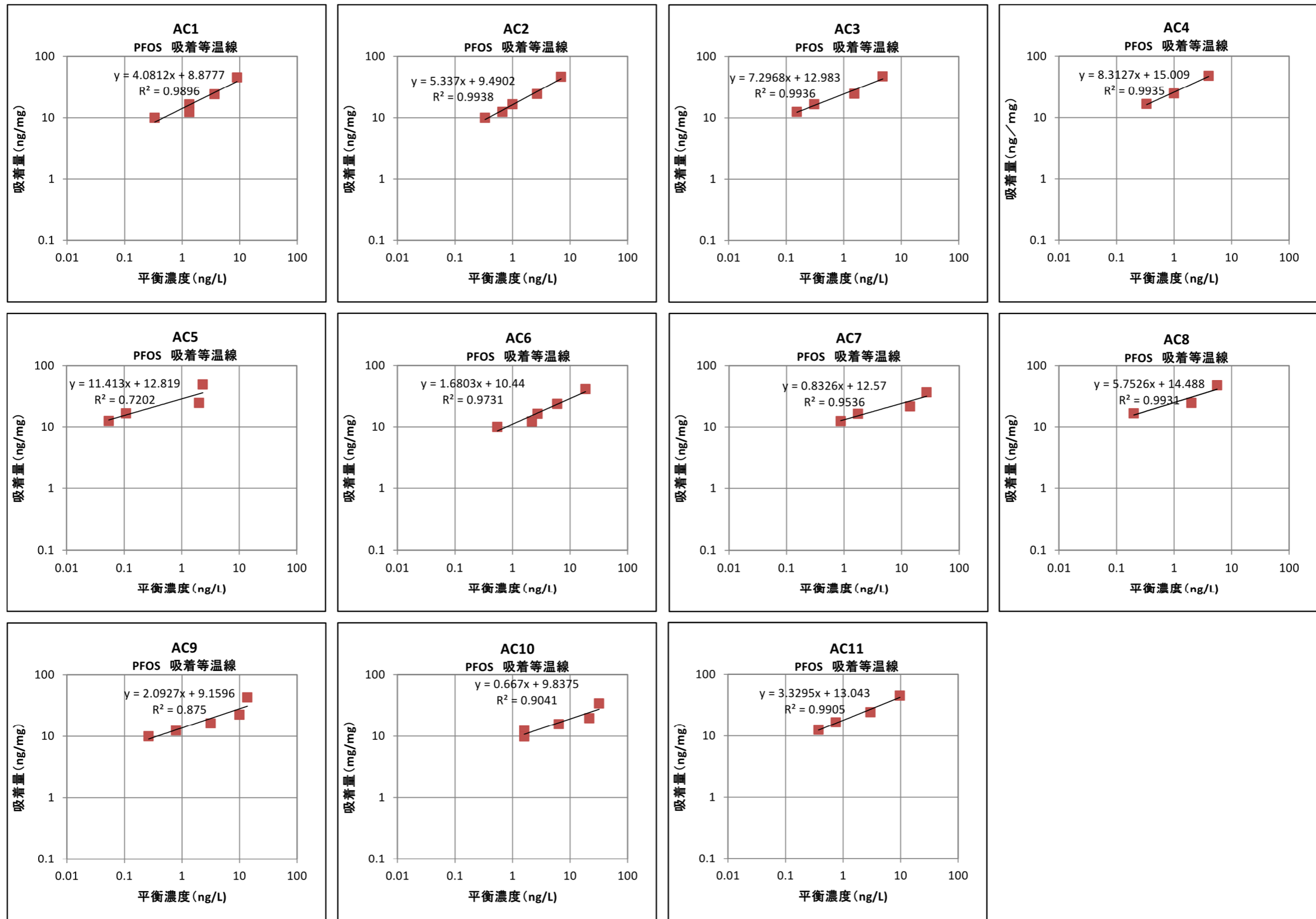


図 3-18 72 時間換算値吸着等温線 (PFOS) (その 1)

※Microsoft Excel 使用

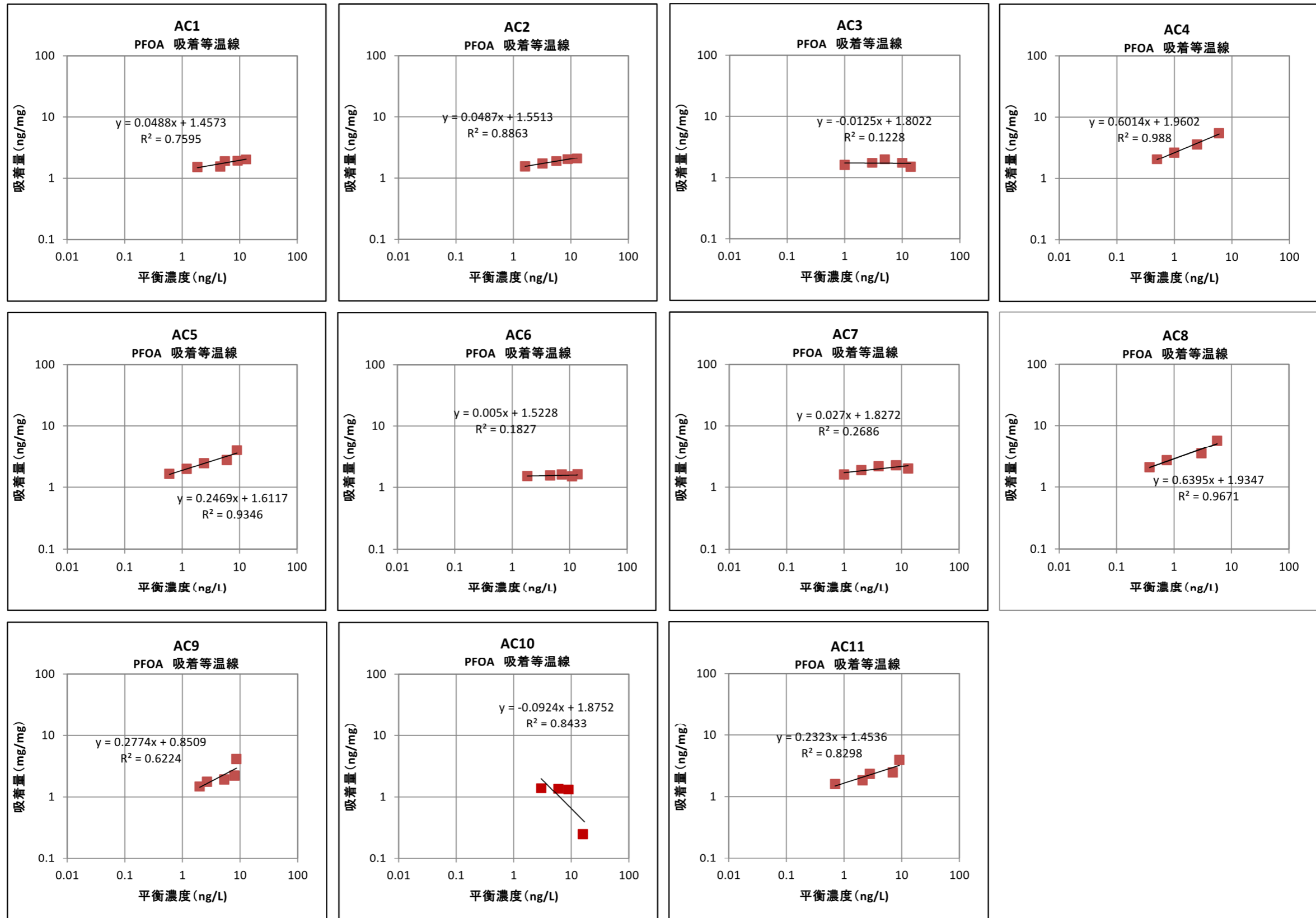


図 3-19 72 時間換算値吸着等温線 (PFOA) (その 2)

※Microsoft Excel を使用

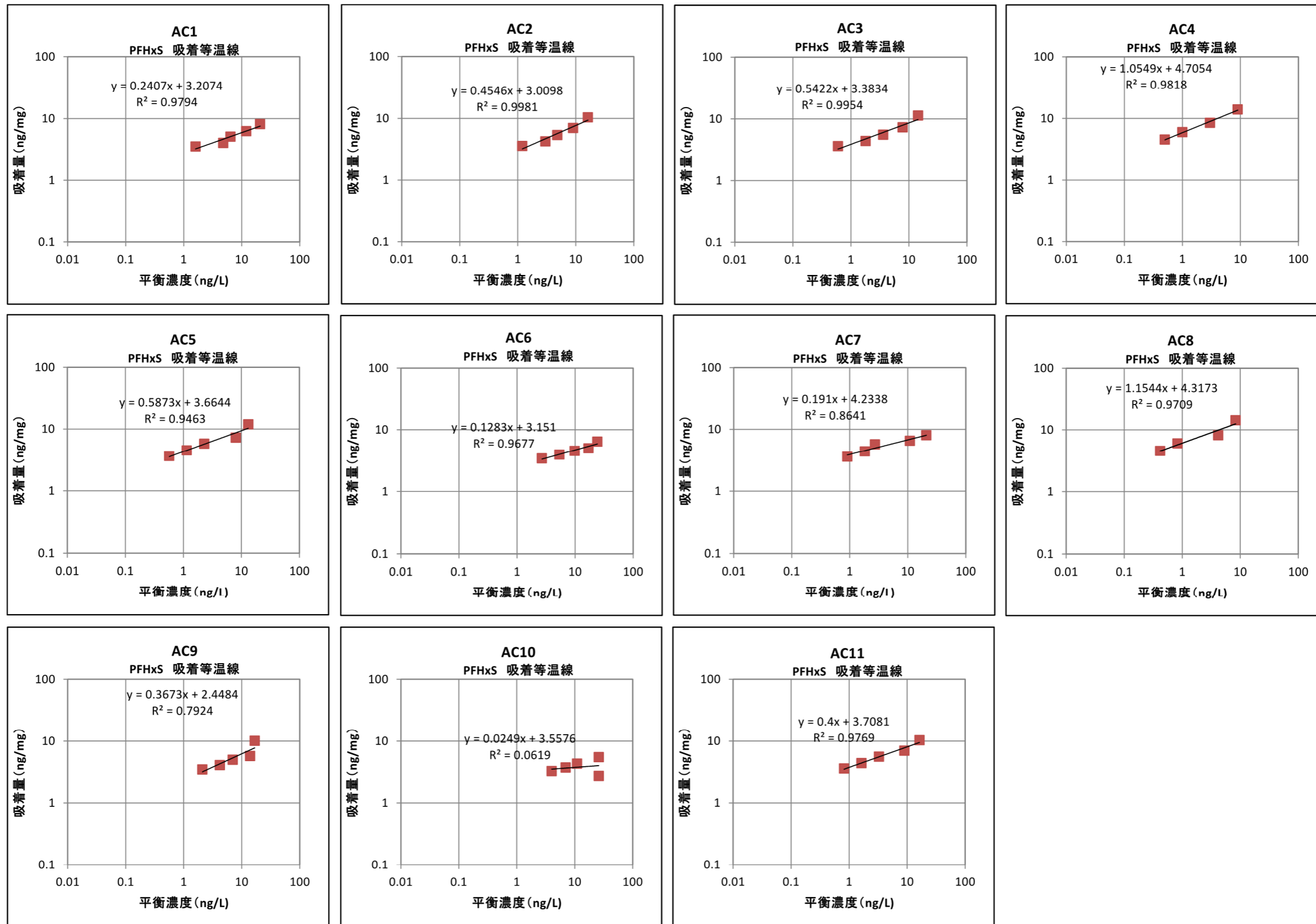


図 3-20 72 時間換算値吸着等温線 (PFHxS) (その 3)

※Microsoft Excel を使用

4) 吸着定数のまとめ

図 3-18~20 で得られた近似式より K 、 $1/n$ を求めると、表 3-17 に示すとおりであった。

表 3-17 72 時間換算値吸着定数 K、1/n

PFOS 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			その他の活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (—)	8.88	9.49	12.98	15.01	12.82	10.44	12.57	14.49	9.16	9.84	13.04
1/n (—)	4.08	5.34	7.30	8.31	11.41	1.68	0.83	5.75	2.09	0.67	3.33
R ²	0.990	0.994	0.994	0.994	0.720	0.973	0.954	0.993	0.875	0.904	0.991

PFOA 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			その他の活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (—)	1.46	1.55	1.80	1.96	1.61	1.52	1.83	1.93	0.85	1.88	1.45
1/n (—)	0.05	0.05	-0.01	0.60	0.25	0.01	0.03	0.64	0.28	-0.09	0.23
R ²	0.760	0.886	0.123	0.988	0.935	0.183	0.269	0.967	0.622	0.843	0.830

PFHxS 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			その他の活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (—)	3.21	3.01	3.38	4.71	3.66	3.15	4.23	4.32	2.45	3.56	3.71
1/n (—)	0.24	0.45	0.54	1.05	0.59	0.13	0.19	1.15	0.37	0.02	0.40
R ²	0.979	0.998	0.995	0.982	0.946	0.968	0.864	0.971	0.792	0.062	0.977

5) 活性炭物性項目の関連性及び吸着定数 (K、1/n) との関連性

参考文献 (

) で、PFOS 等の除去性に関連すると言われている細孔容積 (マイクロ孔+メソ孔) を含め、亜炭を除く石炭系 9 種類の活性炭の物性項目の関連性を把握するため散布図を作図し図 3-21 に、表 3-18 に決定係数 (R^2) 及び相関の傾向を示した。

(1) 物性項目の関連性

物性項目の関連の相関をまとめると以下のとおりとなる。

- ヨウ素吸着性能とメチレンブルー脱色力は強い正の相関が明確である。
- ヨウ素吸着性能と ABS 価、メチレンブルー脱色力と ABS 価は強い負の相関が認められる。
- ヨウ素吸着性能とマイクロ孔+メソ孔や、メソ孔は強い正の相関がある。
- ABS 価とマイクロ孔+メソ孔、マイクロ孔は強い負の相関がある。
- フェノール価とマイクロ孔は正の相関がある。
- マイクロ孔+メソ孔とマイクロ孔は強い正の相関がある。
- その他、ヨウ素吸着性能とフェノール価やメチレンブルー脱色力とフェノール価、ABS 価とフェノール価の間では相関が弱い。

表 3-18 物性項目間の相関

項目	メチレンブルー脱色力		ABS価		フェノール価		マイクロ孔+メソ孔		マイクロ孔		メソ孔	
	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関
ヨウ素吸着性能	0.65	正	0.77	負	0.05	正	0.60	正	0.56	正	0.14	正
メチレンブルー脱色力			0.67	負	0.03	正	0.27	正	0.42	正	0	なし
ABS価					0.07	負	0.66	負	0.54	負	0.21	負
フェノール価							0.34	正	0.58	正	0	なし
マイクロ+メソ孔									0.67	正	0.45	正
マイクロ孔											0.02	正

: 決定係数 (R^2) 0.5以上

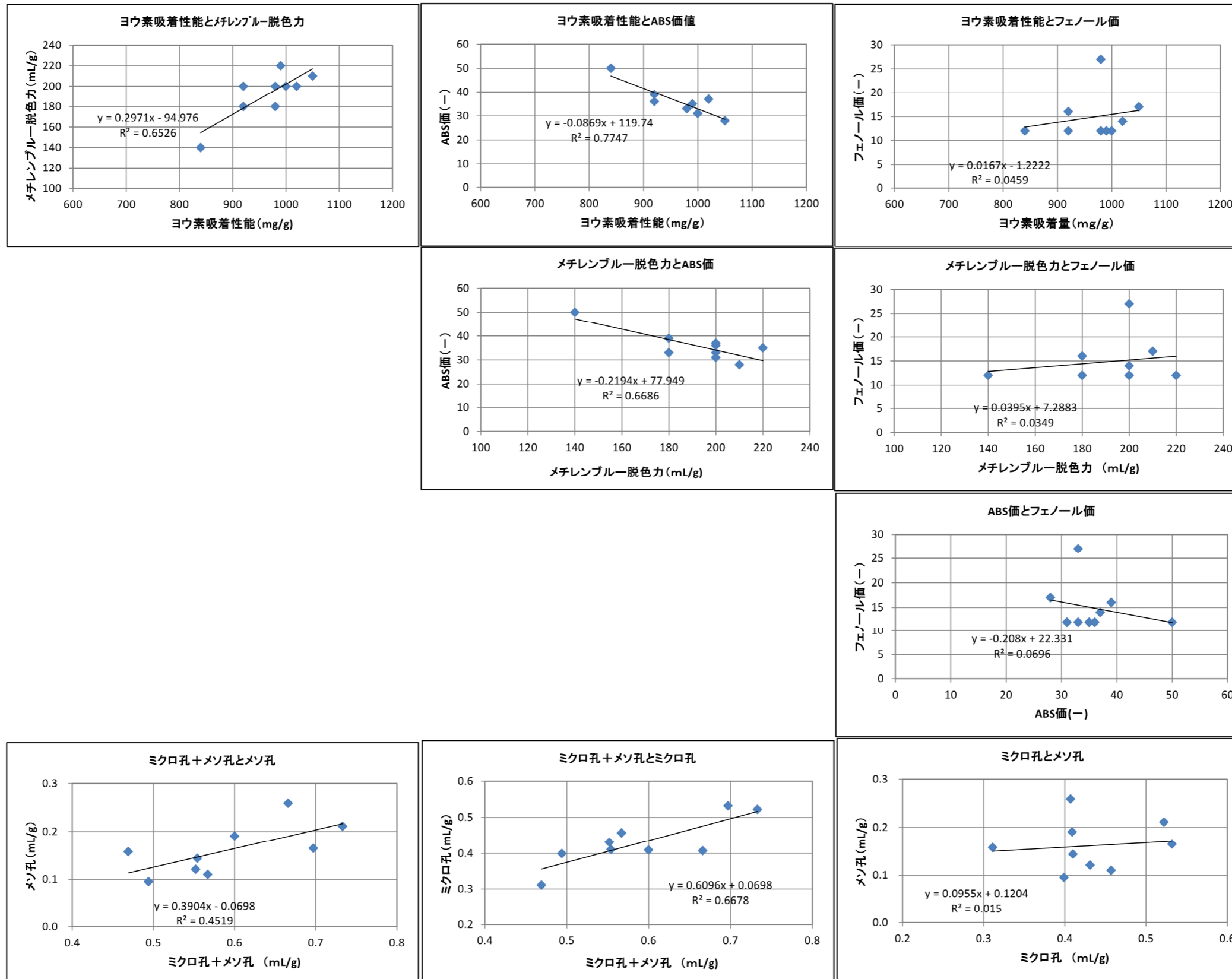


図 3-21 物性項目間の相関

※Microsoft Excel を使用

(2) 細孔容積と他の物性値の関連性

参考文献（活性炭性能評価法 安部邦夫、炭素 TANSO 2002 No.204 200-208）によると、フェノール価は孔径の小さなマイクロ孔領域の評価に用いられ、ABS 価はメソ孔領域と関連があると考えられ、メチレンブルー脱色力は、細孔径の小さい活性炭で低くなる傾向があり、ヨウ素吸着性能は比表面積の値に近似しているとされている。

細孔容積（マイクロ孔+メソ孔、マイクロ孔、メソ孔）それぞれと他の物性値の関連性を図 3-22 に示し、傾向を以下に記す。

a. 細孔容積（マイクロ孔+メソ孔）

- 決定係数（ R^2 ）は小さいがヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価ではやや右上がりの傾向がみられていた。
- フェノール価では右下がりの傾向がみられていた。

b. 細孔容積（マイクロ孔）

- ヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価において、右上がりの相関が高い傾向がみられていた。
- フェノール価は右下がりの傾向がみられていた。

c. 細孔容積（メソ孔）

- 決定係数（ R^2 ）は小さいがヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価ではやや右下がりの傾向がみられていた。
- フェノール価では関連性がみられなかった。

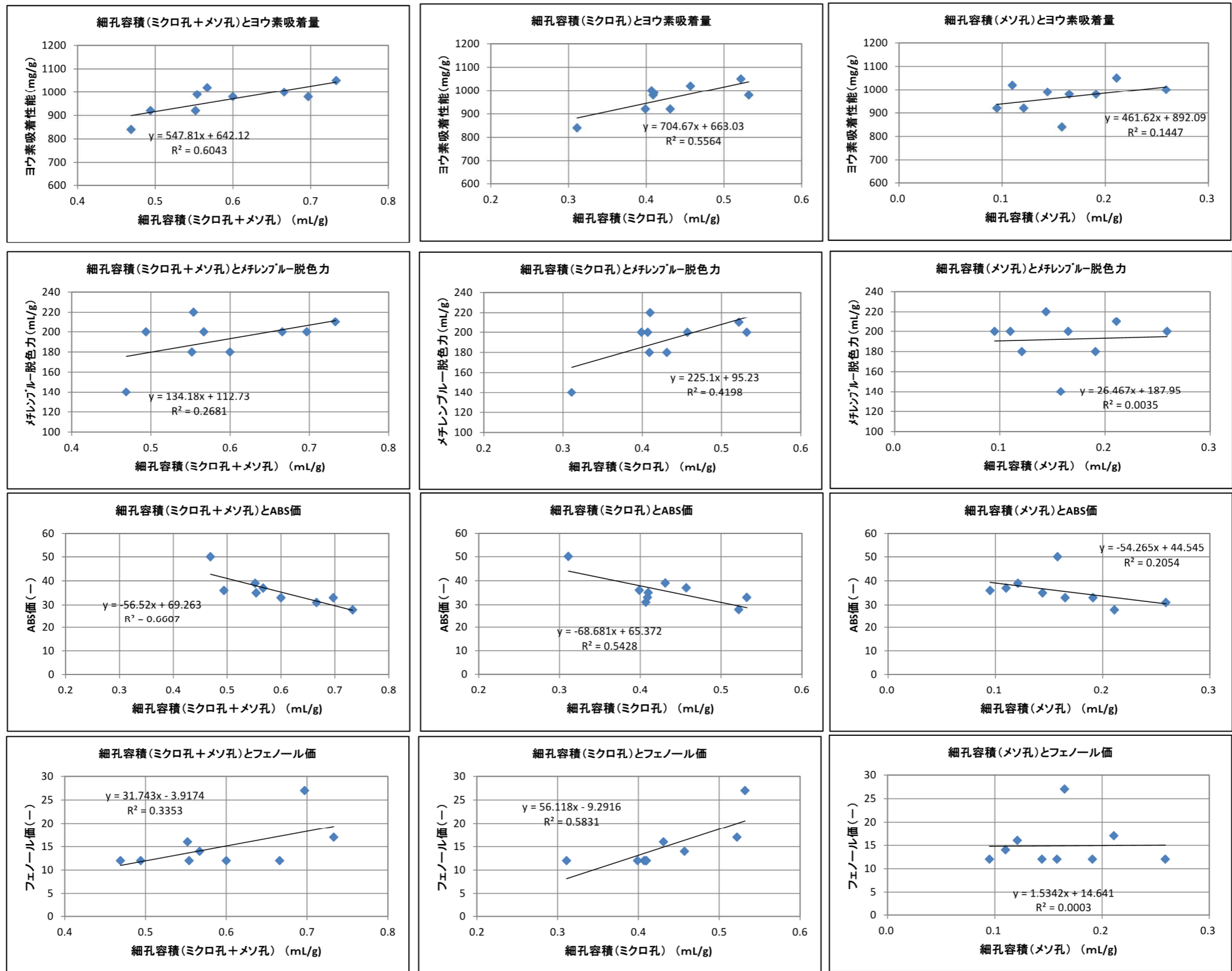


図 3-22 細孔容積と他の物性値の関連性

※Microsoft Excel を使用

(3) 吸着定数と物性値の関連性

72 時間換算値を用いて得られた定数 K 、定数 $1/n$ と物性値の関連性について散布図を作図して図 3-23、24 に、決定係数 (R^2) 及び相関傾向を表 3-19 に示した。

表 3-19 回分式吸着実験結果（吸着定数）と物性値の相関

PFOS等	指標	ヨウ素吸着性能		メチレンブルー脱色力		ABS価		フェノール価		マイクロ孔+メソ孔		マイクロ孔		メソ孔	
		R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関	R^2	相関
PFOS	K	0.41	正	0.16	正	0.32	負	0.25	正	0.59	正	0.60	正	0.11	正
	1/n	0.19	正	0.02	正	0.21	負	0.47	正	0.69	正	0.34	正	0.45	正
PFOA	K	0.00	なし	0.01	負	0.07	負	0.04	正	0.11	正	0.08	正	0.04	正
	1/n	0.42	正	0.20	正	0.19	負	0.16	正	0.39	正	0.45	正	0.05	正

決定係数 (R^2) 0.5以上

回分式吸着実験で得られた K 値や $1/n$ 値と物性値の相関を以下に示す。

- K 値についてみると、PFOS についてはマイクロ孔+メソ孔やマイクロ孔との強い正の相関がみられている。
- PFOA について K 値を見るといずれの物性値も相関がみられない。PFOA は原水濃度が低かったため、明確な結果が得られなかった可能性がある。
- $1/n$ 値について見ると、PFOS ではマイクロ孔+メソ孔との強い正の相関がみられた。
- PFOA の $1/n$ 値はいずれの項目とも相関が低い結果となっている。 K 値と同じく、原水濃度が低かったために明確な結果が得られなかった可能性がある。

(4) 物性値の関連性のまとめ

決定係数 (R^2) の大小はあるが、物性値の関連性をまとめると以下のとおりである。

- 細孔容積（マイクロ孔）と他の物性値の関連性をまとめると、ヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価では正の相関傾向がみられ、比較的決定係数 (R^2) が高かった。
- 定数 K 及び定数 $1/n$ と他の物性値の関連性としては、ヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価、細孔容積（マイクロ孔+メソ孔）、細孔容積（マイクロ孔）は正の相関傾向がみられていたのに対して、ABS 価は負の相関、細孔容積（マイクロ孔）は決定係数 (R^2) が低かった。

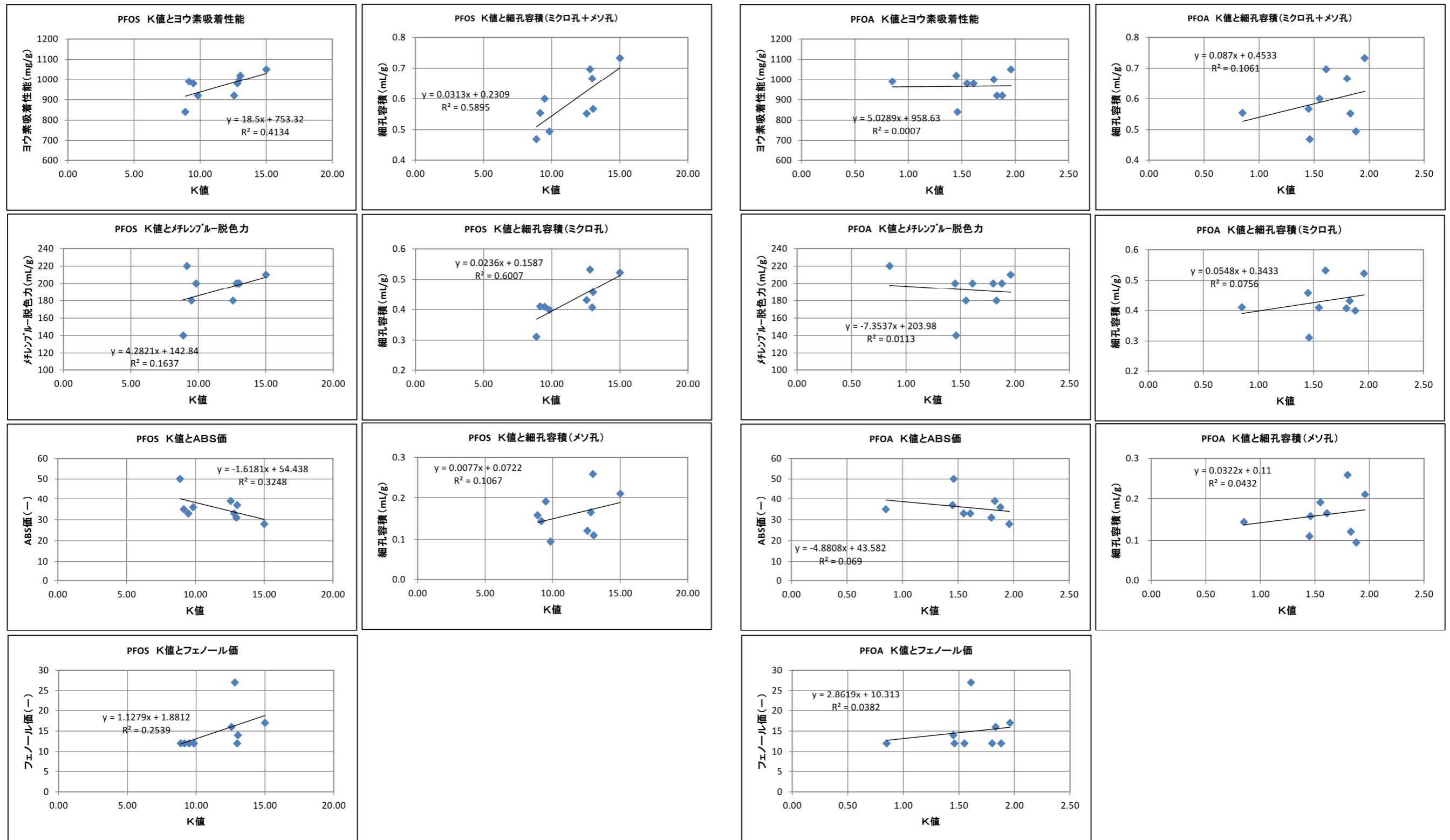


図 3-23 定数 K と他の物性値の関連性 (PFOS、PFOA : 72 時間換算値)

※Microsoft Excel を使用

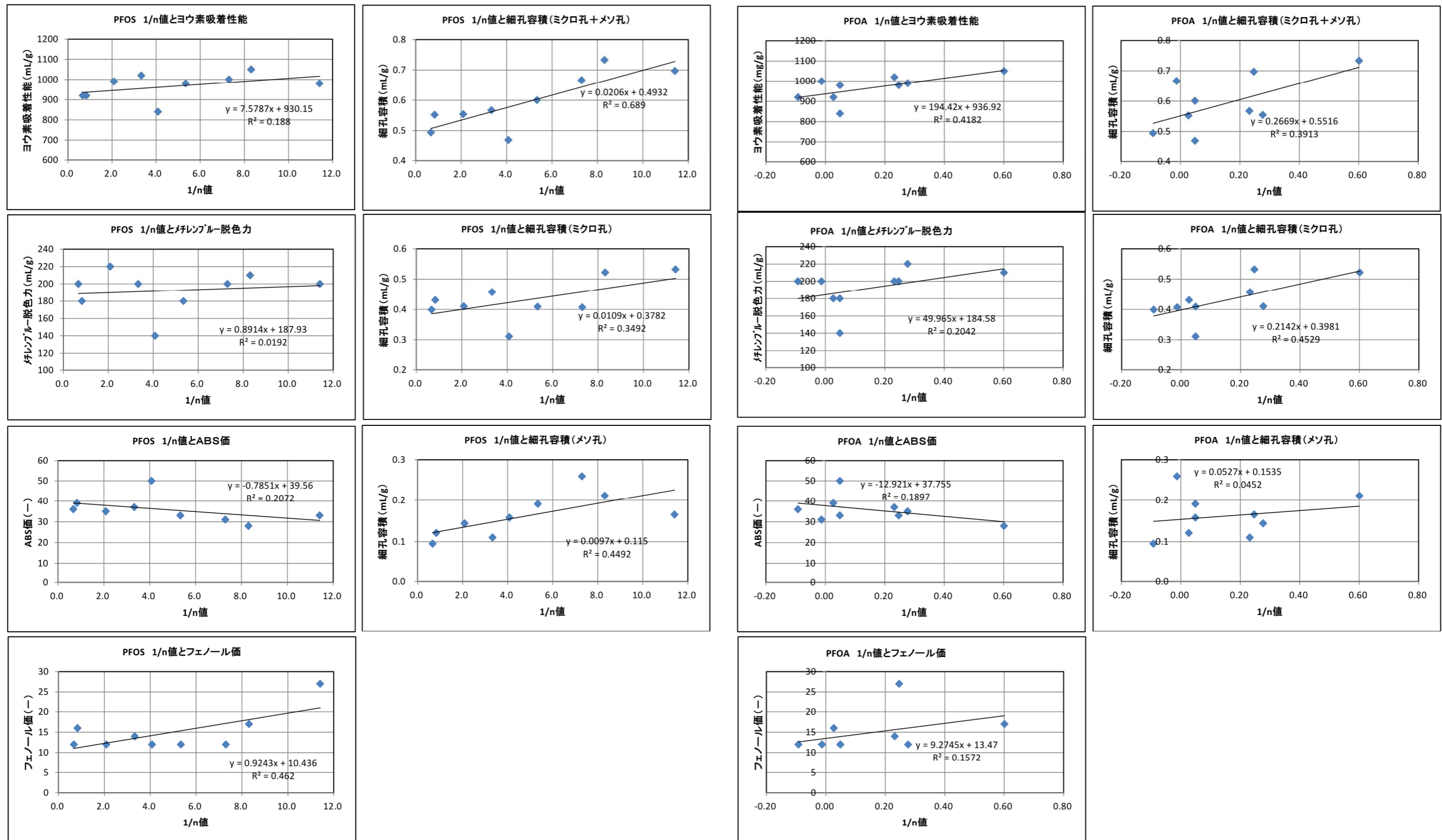


図 3-24 定数 1/n と他の物性値の関連性 (PFOS、PFOA : 72 時間換算値)

※Microsoft Excel を使用

3-4. 反応速度と K 値、1/n 値の関係

回分試験結果を Freundlich の式に適用して求めた K 値、1/n 値と反応速度を被吸着物質毎にまとめると表 3-20 のとおりである。被吸着物質の初期濃度は次のように異なるため、各指標の絶対値を異なる被吸着物質の間で比較する意味はない。このため、被吸着物質毎に反応速度と K 値、1/n 値の関係を検討することを主な視点とした。

K 値、1/n 値の 11 炭種間の相対的な大小で 4 象限のマトリクスを作成し、該当する炭種と反応速度を整理した結果は、表 3-21～23 のとおりである。なお、K 値、1/n 値の大小は 11 炭種の平均値に対する比率（1.0 以上⇒大、1.0 未満⇒小）から設定した相対比較である。

【回分試験の初期濃度】

PFOS	: 100ng/L
PFOA	: 20ng/L
PFHxS	: 60ng/L

【PFOS 吸着における反応速度と K 値、1/n 値の関係】

- 第Ⅳ象限（K 値が大きくかつ 1/n 値が大きい）
AC4、8、3、5 が該当し、平均反応速度は 3.14ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 2.85ng/(mg・hr)よりも速い。
- 第Ⅲ象限（K 値が小さくかつ 1/n 値が大きい）
AC2 が該当し、平均反応速度は 2.80ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 2.85ng/(mg・hr)と同程度であった。
- 第Ⅱ象限（K 値が大きくかつ 1/n 値が小さい）
AC11、7 が該当し、平均反応速度は 2.76ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 2.85ng/(mg・hr)と同程度であった。
- 第Ⅰ象限（K 値が小さくかつ 1/n 値が小さい）
AC6、10、9、1 が該当し、平均反応速度は 2.63ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 2.85ng/(mg・hr)より遅い。

【PFOA 吸着における反応速度と K 値、1/n 値の関係】

- 第Ⅳ象限（K 値が大きくかつ 1/n 値が大きい）
AC4、8、5 が該当し、平均反応速度は 0.25ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.17ng/(mg・hr)よりも速い。
- 第Ⅲ象限（K 値が小さくかつ 1/n 値が大きい）
AC11、9 が該当し、平均反応速度は 0.22ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.17ng/(mg・hr)よりも速い。
- 第Ⅱ象限（K 値が大きくかつ 1/n 値が小さい）
AC10、7、3 が該当し、平均反応速度は 0.18ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値

0.17ng/(mg・hr)と同程度であった。

- 第I象限 (K値が小さくかつ1/n値が小さい)

AC2、6、1 が該当し、平均反応速度は 0.05ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.17ng/(mg・hr)より遅い。

【PFHxS 吸着における反応速度と K 値、1/n 値の関係】

- 第IV象限 (K値が大きかつ1/n値が大きい)

AC4、8、5 が該当し、平均反応速度は 0.75ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.57ng/(mg・hr)よりも速い。

- 第III象限 (K値が小さくかつ1/n値が大きい)

AC3 が該当し、平均反応速度は 0.54ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.57ng/(mg・hr)と同程度であった。

- 第II象限 (K値が大きかつ1/n値が小さい)

AC7、11、10 が該当し、平均反応速度は 0.60ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.57ng/(mg・hr)と同程度であった。

- 第I象限 (K値が小さくかつ1/n値が小さい)

AC1、6、2、9 が該当し、平均反応速度は 0.41ng/(mg・hr)と、11 炭種平均値 0.57ng/(mg・hr)より遅い。

表 3-23 のマトリクスより、第IV象限 (K 値、1/n 値がいずれも大きい) に分類された活性炭の平均反応速度は他の象限に分類された活性炭の平均反応速度よりも速い傾向がみられる。回分試験から得られたこのような特性は、他の象限の活性炭に比べて実施設における次のようなメリットにつながる可能性を示すものと考えられる。

- 被吸着物質の原水濃度に変動が生じた場合に処理水中に検出されるリスクが少ない (反応速度、1/n 値が大きい)。
- 被吸着物質の検出が始まる期間が長い (反応速度、K 値が大きい)

ただし、実施設における破過曲線の形状や寿命との関連については、接触機構が異なり、回分試験は AC1～AC11 のポテンシャルの相対比較のための試験であるため、回分試験結果からの推察はできないと考える。

表 3-20 反応速度と K 値、1/n 値 (PFOS、PFOA、PFHxS)

PFOS

項目 AC No.	単位 —	実施設運用炭			その他の活性炭									平均	意味
		AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11			
原料	—	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭			
反応速度 (0⇒6hr)	ng/(mg・hr)	2.80	2.80	3.17	3.67	2.50	2.75	2.97	3.22	2.50	2.47	2.55	2.85	0から6時間までの反応速度	
K (0⇒72hr)	—	8.88	9.49	12.98	15.01	12.82	10.44	12.57	14.49	9.16	9.84	13.04	11.70	0から72時間のデータで算出 活性炭の吸着容量 Kが大きい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が高い Kが小さい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が低い	
平均値に対する 比率	—	0.76	0.81	1.11	1.28	1.10	0.89	1.07	1.24	0.78	0.84	1.11			
1/n (0⇒72hr)	—	4.08	5.34	7.30	8.31	11.41	1.68	0.83	5.75	2.09	0.67	3.33	4.62	0から72時間のデータで算出 被吸着物質との親和性 1/nが大きい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。 1/nが小さい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。	
平均値に対する 比率	—	0.88	1.16	1.58	1.80	2.47	0.36	0.18	1.25	0.45	0.14	0.72			

PFOA

項目 AC No.	単位 —	実施設運用炭			その他の活性炭									平均	意味
		AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11			
原料	—	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭			
反応速度 (0⇒6hr)	ng/(mg・hr)	0.08	0.00	0.13	0.17	0.25	0.08	0.25	0.33	0.22	0.17	0.22	0.17	0から6時間までの反応速度	
K (0⇒72hr)	—	1.46	1.55	1.80	1.96	1.61	1.52	1.83	1.93	0.85	1.88	1.45	1.62	0から72時間のデータで算出 活性炭の吸着容量 Kが大きい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が高い Kが小さい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が低い	
平均値に対する 比率	—	0.90	0.96	1.11	1.21	0.99	0.94	1.13	1.19	0.52	1.16	0.90			
1/n (0⇒72hr)	—	0.05	0.05	-0.01	0.60	0.25	0.01	0.03	0.64	0.28	-0.09	0.23	0.18	0から72時間のデータで算出 被吸着物質との親和性 1/nが大きい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。 1/nが小さい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。	
平均値に対する 比率	—	0.27	0.26	-0.07	3.27	1.34	0.03	0.15	3.48	1.51	-0.50	1.26			

PFHxS

項目 AC No.	単位 —	実施設運用炭			その他の活性炭									平均	意味
		AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11			
原料	—	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭			
反応速度 (0⇒6hr)	ng/(mg・hr)	0.42	0.33	0.54	0.75	0.71	0.42	0.75	0.79	0.50	0.46	0.58	0.57	0から6時間までの反応速度	
K (0⇒72hr)	—	3.21	3.01	3.38	4.71	3.66	3.15	4.23	4.32	2.45	3.56	3.71	3.58	0から72時間のデータで算出 活性炭の吸着容量 Kが大きい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が高い Kが小さい:原水濃度が低濃度の場合、活性炭 単位重量当たりの吸着性能が低い	
平均値に対する 比率	—	0.90	0.84	0.94	1.31	1.02	0.88	1.18	1.21	0.68	0.99	1.04			
1/n (0⇒72hr)	—	0.24	0.45	0.54	1.05	0.59	0.13	0.19	1.15	0.37	0.02	0.40	0.47	0から72時間のデータで算出 被吸着物質との親和性 1/nが大きい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。 1/nが小さい:原水濃度の増加に対して、活性 炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。	
平均値に対する 比率	—	0.51	0.97	1.16	2.26	1.26	0.27	0.41	2.47	0.79	0.05	0.86			

表 3-21 回分試験で得られた K 値、1/n 値の大小による活性炭の分類と反応速度の整理 (PFOS)

PFOS		K 値 (-) 11 活性炭種の相対比較	
		小 ^{※1}	大 ^{※2}
1/n 値 (-) 11 炭種の相対比較	小 ^{※1}	<p>【活性炭の反応速度】 AC6 : 2.75ng/(mg・hr) AC10 : 2.47ng/(mg・hr) AC9 : 2.50ng/(mg・hr) AC1 : 2.80ng/(mg・hr)</p> <p>【平均反応速度】 2.63ng/(mg・hr)</p> <p>I</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が低い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。</p>	<p>【活性炭の反応速度】 AC11 : 2.55ng/(mg・hr) AC7 : 2.97ng/(mg・hr)</p> <p>【平均反応速度】 2.76ng/(mg・hr)</p> <p>II</p> <p>【実処理に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が高い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。</p>
	大 ^{※2}	<p>【活性炭の反応速度】 AC2 : 2.80ng/(mg・hr)</p> <p>【平均反応速度】 2.80ng/(mg・hr)</p> <p>III</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が低い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。</p>	<p>【活性炭の反応速度】 AC4 : 3.67ng/(mg・hr) AC8 : 3.22ng/(mg・hr) AC3 : 3.17ng/(mg・hr) AC5 : 2.50ng/(mg・hr)</p> <p>【平均反応速度】 3.14ng/(mg・hr)</p> <p>IV</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が高い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。</p>

※1 小 AC1~AC11の平均値に対する比率が1.0未満

※2 大 AC1~AC11の平均値に対する比率が1.0以上

- 第 I 象限
- 第 II 象限
- 第 III 象限
- 第 IV 象限

表 3-22 回分試験で得られた K 値、1/n 値の大小による活性炭の分類と反応速度の整理 (PFOA)

PFOA		K値(-) 11活性炭種の相対比較			
		小		大	
1/n値 (一)	小 ^{※1}	【活性炭の反応速度】 AC2 :0.00ng/(mg・hr) AC6 :0.08ng/(mg・hr) AC1 :0.08ng/(mg・hr)	【平均反応速度】 0.05ng/(mg・hr)	【活性炭の反応速度】 AC10:0.17ng/(mg・hr) AC7 :0.25ng/(mg・hr) AC3 :0.13ng/(mg・hr)	【平均反応速度】 0.18ng/(mg・hr)
	大 ^{※2}	【活性炭の反応速度】 AC11:0.22ng/(mg・hr) AC9 :0.22ng/(mg・hr)	【平均反応速度】 0.22ng/(mg・hr)	【活性炭の反応速度】 AC4 :0.17ng/(mg・hr) AC8 :0.33ng/(mg・hr) AC5 :0.25ng/(mg・hr)	【平均反応速度】 0.25ng/(mg・hr)

※1 小 AC1～AC11の平均値に対する比率が1.0未満

※2 大 AC1～AC11の平均値に対する比率が1.0以上

第I象限

第II象限

第III象限

第IV象限

表 3-23 回分試験で得られた K 値、1/n 値の大小による活性炭の分類と反応速度の整理 (PFHxS)

PFHxS		K値(-) 11活性炭種の相対比較	
		小	大
1/n値 (-)	小 ^{※1}	<p>【活性炭の反応速度】 AC1 :0.42ng/(mg・hr) AC6 :0.42ng/(mg・hr) AC2 :0.33ng/(mg・hr) AC9 :0.50ng/(mg・hr)</p> <p style="text-align: center;">I</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が低い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。</p>	<p>【平均反応速度】 0.41ng/(mg・hr)</p> <p>【活性炭の反応速度】 AC7 :0.75ng/(mg・hr) AC11:0.58ng/(mg・hr) AC10:0.46ng/(mg・hr)</p> <p style="text-align: center;">II</p> <p>【平均反応速度】 0.60ng/(mg・hr)</p> <p>【実処理に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が高い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が少ない。</p>
	大 ^{※2}	<p>【活性炭の反応速度】 AC3 :0.54ng/(mg・hr)</p> <p style="text-align: center;">III</p> <p>【平均反応速度】 0.54ng/(mg・hr)</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が低い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。</p>	<p>【活性炭の反応速度】 AC4 :0.75ng/(mg・hr) AC8 :0.79ng/(mg・hr) AC5 :0.71ng/(mg・hr)</p> <p style="text-align: center;">IV</p> <p>【平均反応速度】 0.75ng/(mg・hr)</p> <p>【実施設に係る特性】 原水濃度が低濃度の場合、活性炭単位重量当たりの吸着性能が高い。 原水濃度の増加に対して、活性炭単位重量当たりの吸着量の増加が大きい。</p>

※1 小 AC1~AC11の平均値に対する比率が1.0未満

※2 大 AC1~AC11の平均値に対する比率が1.0以上

- 第I象限
- 第II象限
- 第III象限
- 第IV象限

【参考資料】 24 時間実測値による吸着定数及び吸着量の算出

Freundlich の式に基づき、24 時間実測値を整理する。

24 時間実測値の結果を表 3-26 に示す。各活性炭全てのデータを両対数上で近似解析を行うと、指数近似の相関となり、直線近似が得られない。そこで、平衡濃度より低濃度から 5 点について近似解析を行うと、図 3-26～28 に示すとおり、決定係数も高い直線近似相関が得られた。

令和 2 年 4 月より水質管理目標設定項目として、PFOS+PFOA 合計値が 50ng/L（暫定目標値）以下とさだめられたことから、吸着量の検討には、PFOS+PFOA 合計値についても検討した。

吸着量を想定するに当たって、破過濃度の設定は以下の 2 ケースとした。

ケース 1：北谷浄水場原水の PFOS 等濃度実績から設定

ケース 2：北谷浄水場活性炭流入水の PFOS 等濃度実績から設定

以上で設定した 2 ケースの破過濃度を表 3-24 に示す。

表 3-24 破過濃度の設定

	PFOS	PFOA	PFHxS	備考
単位	ng/L	ng/L	ng/L	
ケース1	28	6	17	原水構成比率5:1:3より算出
ケース2	11	4	9	活性炭流入水の最大値

【ケース 1】

北谷浄水場原水の PFOS+PFOA 合計の平均値（平成 30 年度）は 32ng/L であり、PFOS 等の含有比率は 5 : 1 : 3（PFOS : PFOA : PFHxS）であることから、PFOS 等は 48ng/L（PFOS+PFOA : PFHxS = 6 : 3 = 32 : 16）となる。そこで、PFOS 等原水濃度を 50ng/L とし、前述の含有比率を用いて PFOS・PFOA・PFHxS の濃度を設定した。この結果を以下に示す。

$$\text{PFOS} = 50\text{ng/L} \times 5/9 = 27.77 \div 28\text{ng/L}$$

$$\text{PFOA} = 50\text{ng/L} \times 1/9 = 5.55 \div 6\text{ng/L}$$

$$\text{PFHxS} = 50\text{ng/L} \times 3/9 = 16.66 \div 17\text{ng/L} \quad \text{合計} \quad 51\text{ng/L}$$

【ケース 2】

北谷浄水場活性炭流入水の PFOS 等の合計濃度については、直近実績（令和元年 12 月～令和 2 年 4 月）の最大値で 24ng/L であり、その内訳は PFOS が 11ng/L、PFOA が 4ng/L、PFHxS が 9ng/L であったことから、この値で設定した。

得られた近似式より、定数 K、定数 1/n、吸着量ケース 1、2 を求めると、表 3-25、図 3-25 に示すとおりであった。

表 3-25 PFOS・PFOA・PFHxS 吸着量の結果 (24 時間データ)

PFOS 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			実験候補活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (-)	9.88	10.18	13.93	15.42	13.55	11.19	12.72	13.86	10.66	10.96	13.67
1/n (-)	1.006	1.426	0.682	2.407	0.226	0.674	0.669	0.800	0.216	0.416	0.920
R ²	0.976	0.984	0.966	0.989	0.513	0.932	0.953	0.972	0.832	0.875	0.972
ケース1 28ng/L時吸着量 (ng/mg)	38.0	50.1	33.0	82.8	19.9	30.1	31.5	36.3	16.7	22.6	39.4
ケース2 11ng/L時吸着量 (ng/mg)	20.9	25.9	21.4	41.9	16.0	18.6	20.1	22.7	13.0	15.5	23.8

PFOA 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			実験候補活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (-)	1.60	1.91	1.80	2.36	2.00	1.67	1.83	2.48	1.41	1.51	1.76
1/n (-)	0.002	-0.069	-0.013	0.027	-0.051	-0.039	0.027	-0.083	0.018	-0.061	0.015
R ²	0.004	0.632	0.123	0.108	0.489	0.808	0.269	0.664	0.085	0.550	0.116
ケース1 6ng/L時吸着量 (ng/mg)	1.6	1.5	1.7	2.5	1.7	1.4	2.0	2.0	1.5	1.1	1.9
ケース2 4ng/L時吸着量 (ng/mg)	1.6	1.6	1.8	2.5	1.8	1.5	1.9	2.1	1.5	1.3	1.8

PFHxS 直線部分を選定

項目 AC No.	実施設運用炭			実験候補活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
K (-)	3.21	3.01	3.38	4.71	3.66	3.15	3.81	3.71	2.45	4.89	3.71
1/n (-)	0.241	0.455	0.542	1.055	0.587	0.128	0.309	1.012	0.367	0.183	0.400
R ²	0.979	0.998	0.995	0.982	0.946	0.968	0.969	0.971	0.792	0.921	0.977
ケース1 17ng/L時吸着量 (ng/mg)	7.3	10.7	12.6	22.6	13.6	5.3	9.1	20.9	8.7	8.0	10.5
ケース2 9ng/L時吸着量 (ng/mg)	5.4	7.1	8.3	14.2	8.9	4.3	6.6	12.8	5.8	6.5	7.3

PFOS+PFOA合計値

項目 AC No.	実施設運用炭			実験候補活性炭							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻	石炭	石炭	石炭
ケース1 吸着量 (ng/mg)	40	52	35	85	22	32	33	38	18	24	41
ケース2 吸着量 (ng/mg)	23	27	23	44	18	20	22	25	15	17	26

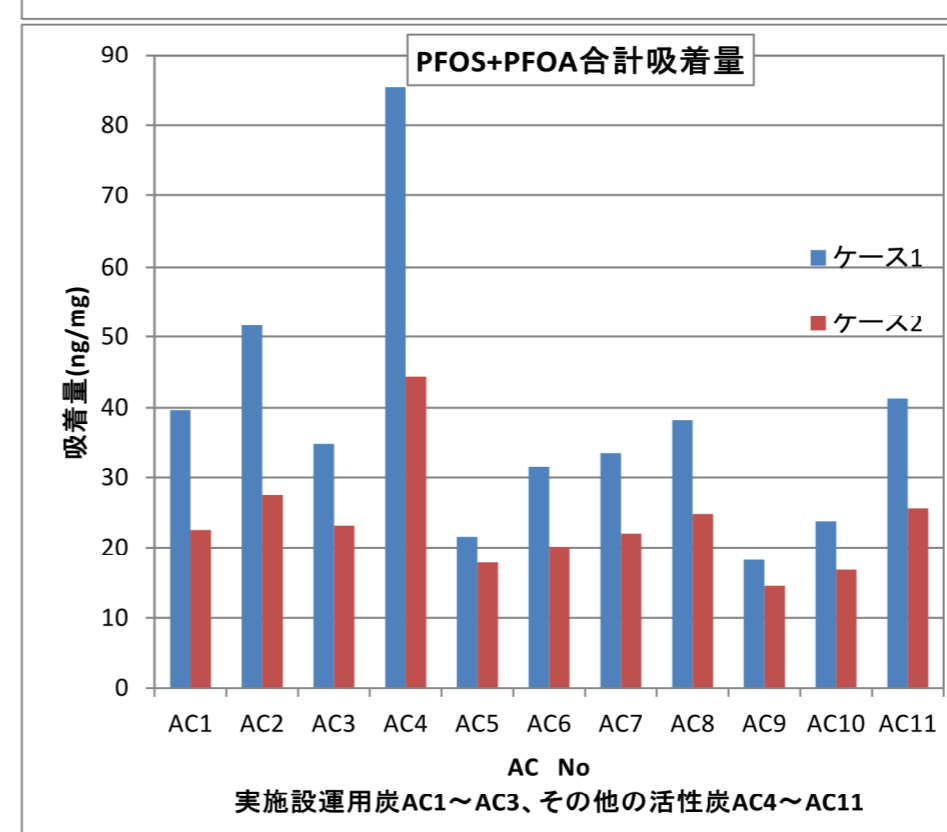
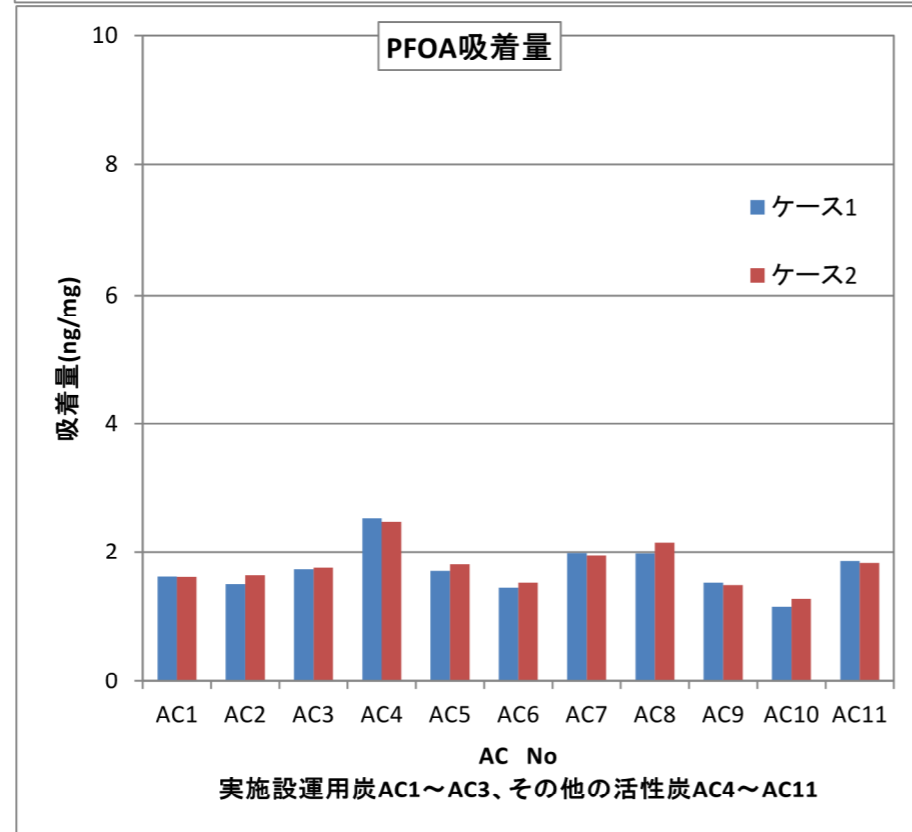
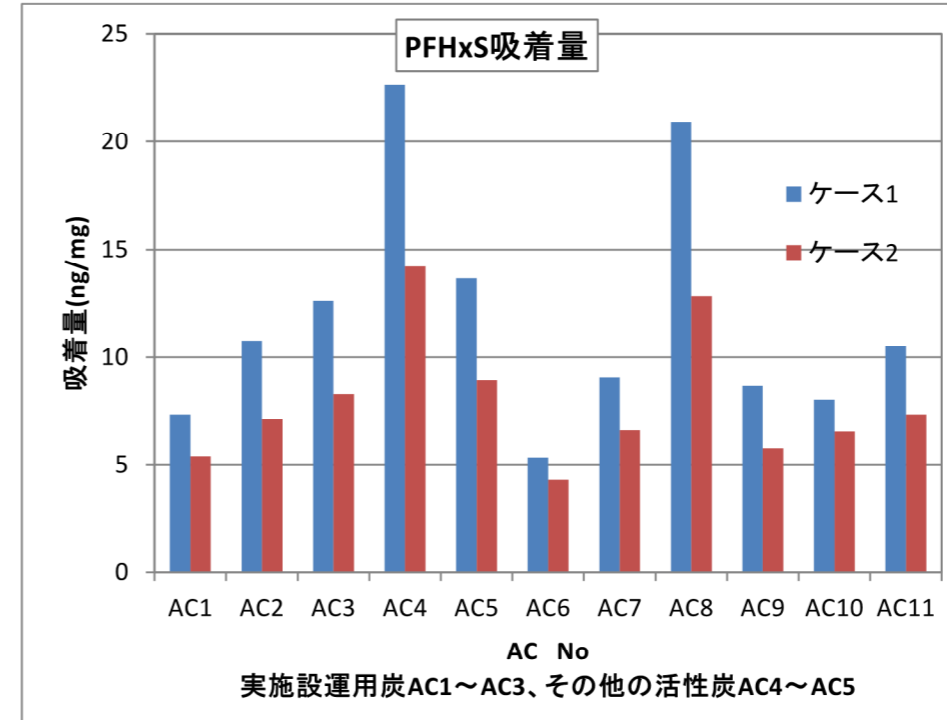
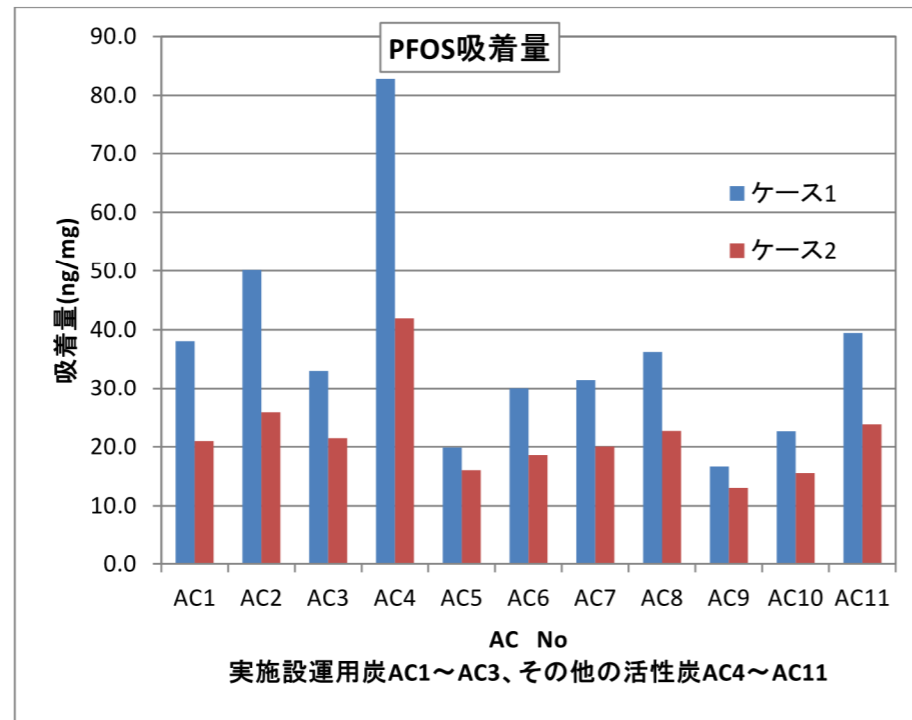


図 3-25 PFOS・PFOA・PFHxS 吸着量の結果 (24 時間データ)

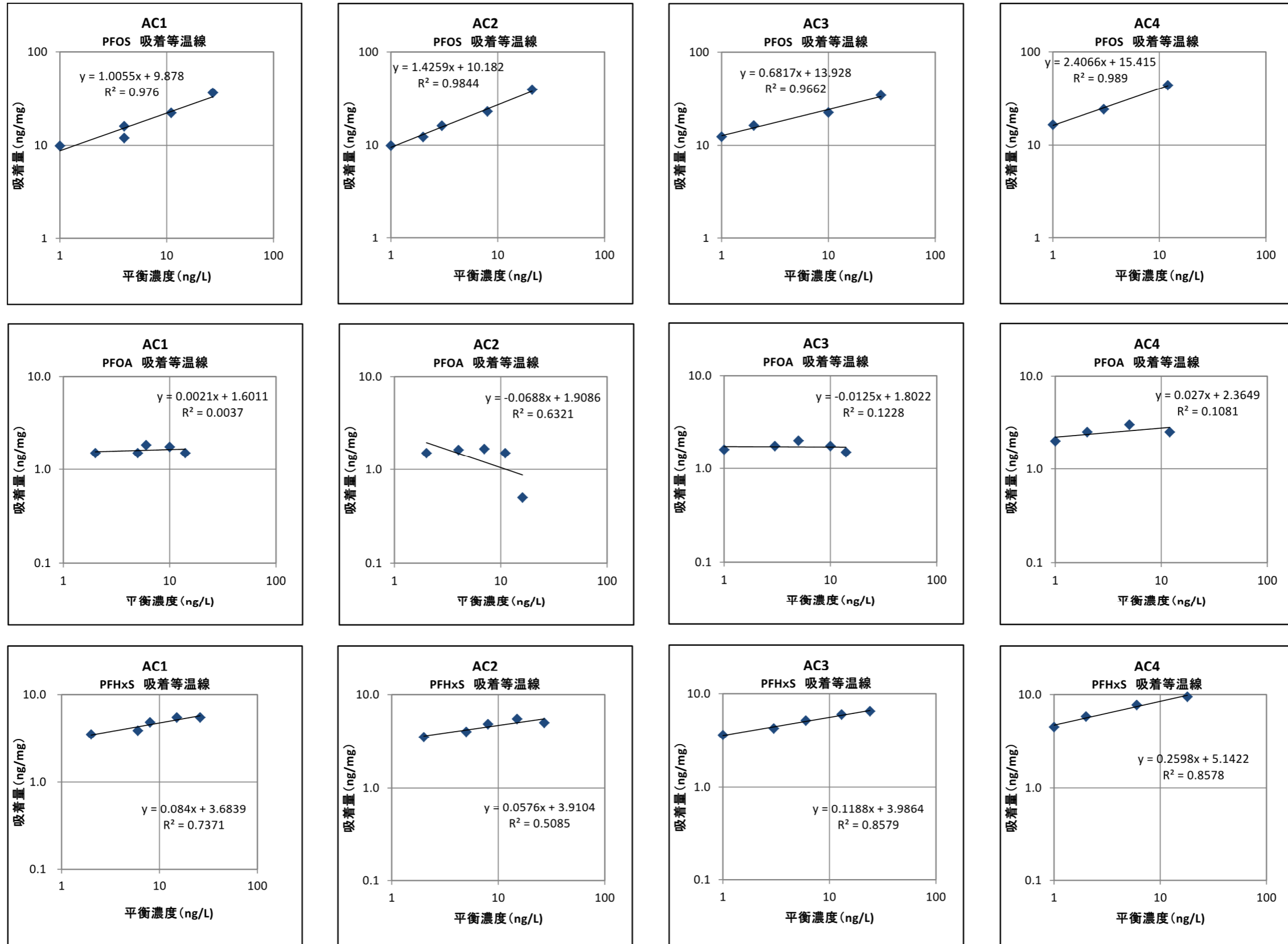


図 3-26 24 時間実測値による吸着等温線 (PFOS、PFOA、PFHxS) (その 1)

※Microsoft Excel を使用

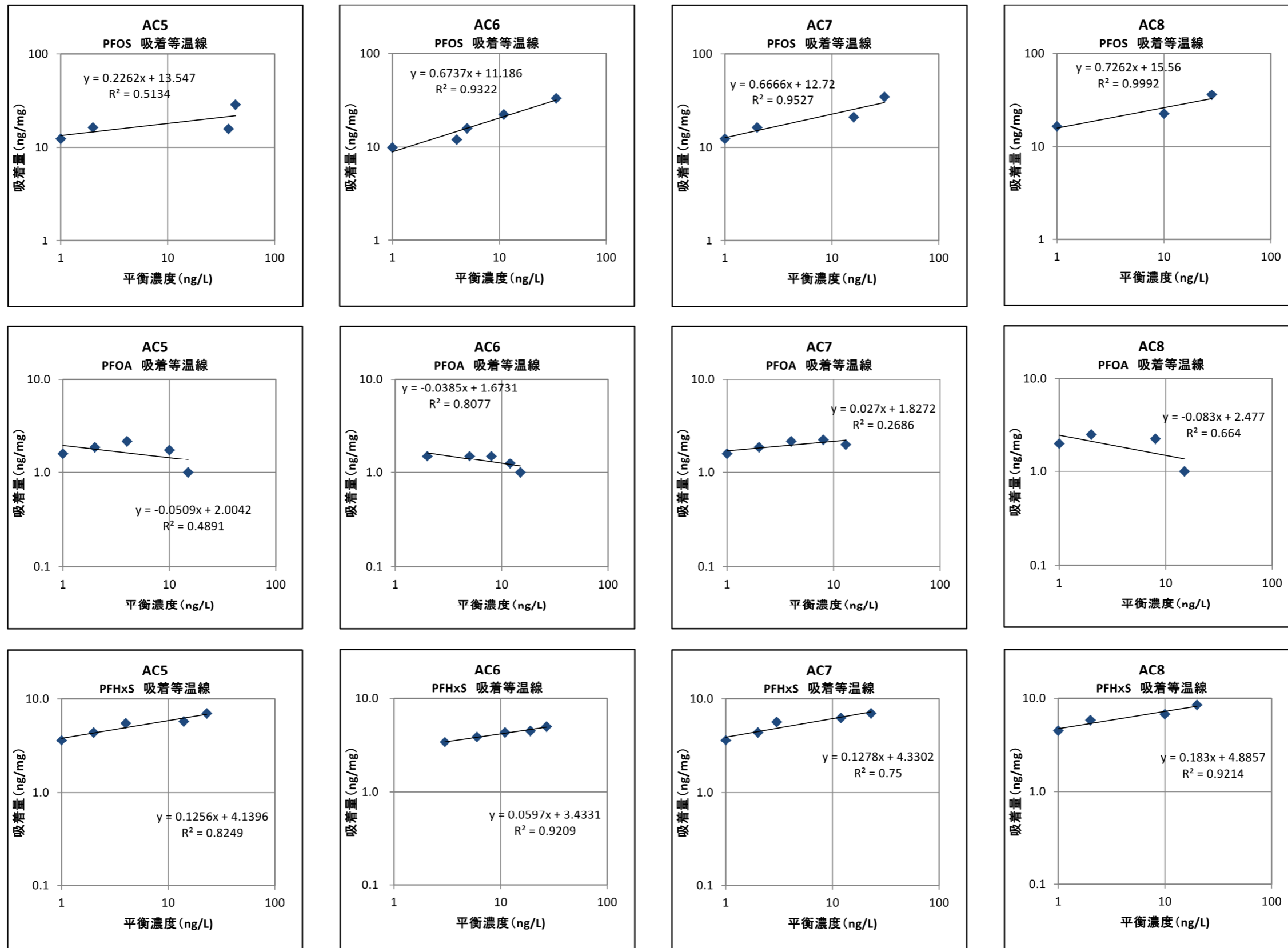


図 3-27 24 時間実測値による吸着等温線 (PFOS、PFOA、PFHxS) (その 2)

※Microsoft Excel を使用

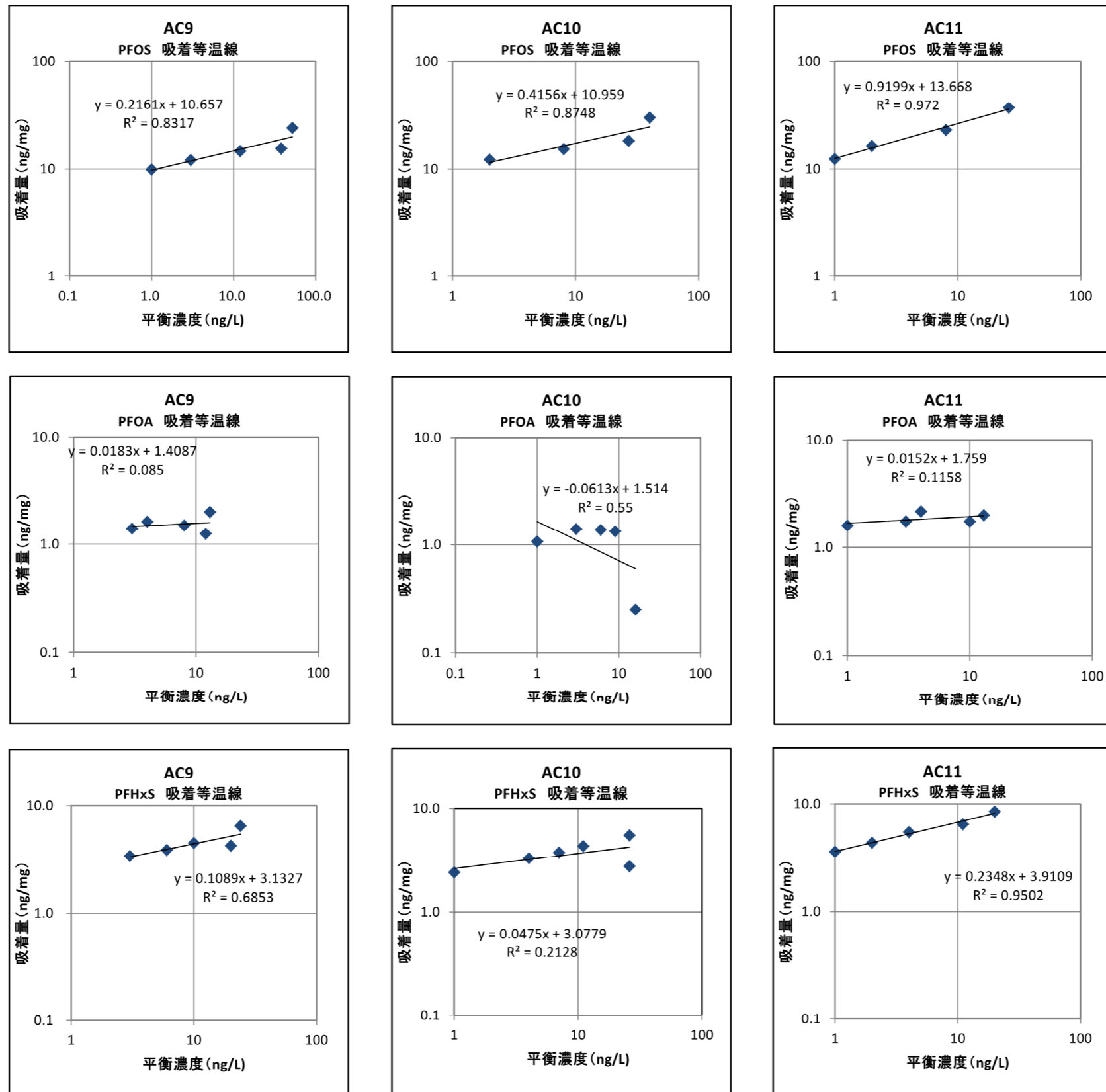


図 3-28 24 時間実測値による吸着等温線 (PFOS、PFOA、PFHxS) (その 3)

※Microsoft Excel を使用