公募区分　　：環境問題対応型
推進戦略重点課題：【重点課題⑭】化学物質等の包括的なリスク評価・管理の推進に係る研究
行政ニーズ　　：(5-6) 塩素化エチレン・エタン類に関する土壌・地下水中の分解メカニズムと移送挙動の研究

令和2年8月6日
研究成果報告会資料

研究開発課題：　5−1701

土壌・地下水中のクロロエチレン等の分解・吸脱着等挙動解析と汚染状況評価技術の開発

研究実施期間　　2017~2019年度
研究経費（累計額）145,264 千円

代表者　小林　剛　（横浜国立大学）
分担者　張　　銘　（産業技術総合研究所）
保高 徹生（産業技術総合研究所）
細見 正明（東京農工大学）

背景（社会的背景）

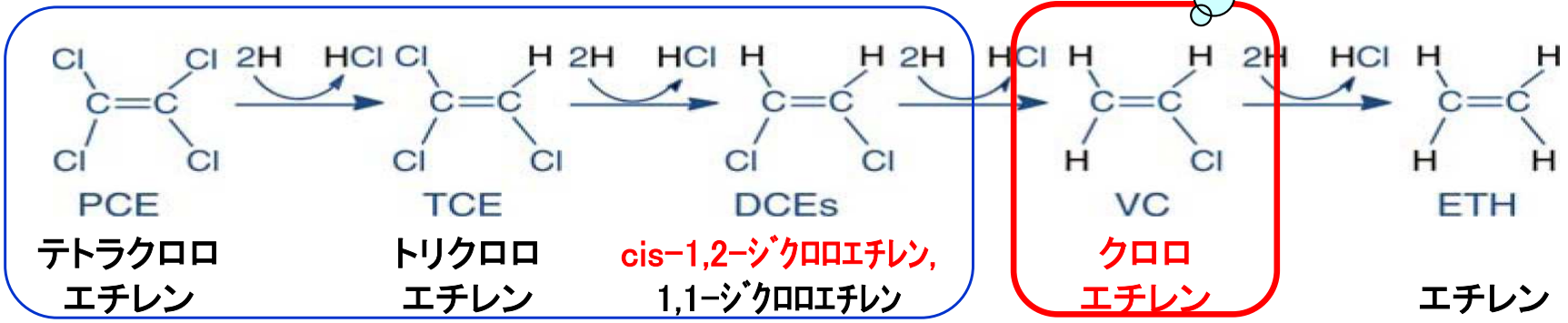
2017年4月より
クロロエチレン
（塩化ビニルモノマー）が
土壌汚染対策法の
特定有害物質に追加

浄化済みサイトで
再度、汚染が
指摘される？！

土地売買の
不安要因

既存の規制物質
テトラクロロエチレン
トリクロロエチレン等
の分解生成物

主要分解経路



以前の規制物質　+α：trans−1,2−ジクロロエチレン　新規制物質

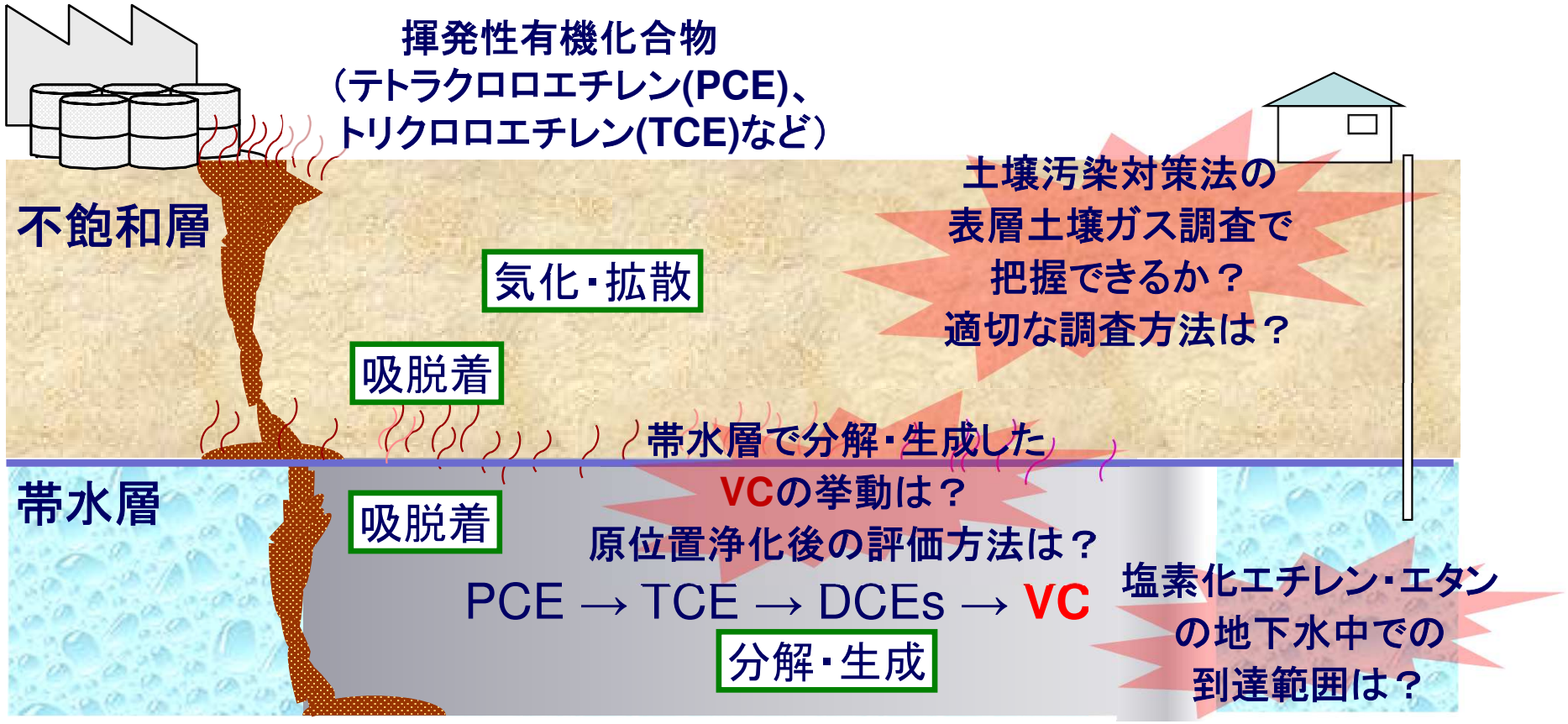
（無害）

※cis体、**trans体**合計濃度による規制に改定

新規制物質の調査や措置の必要性判断のために、次の手法の構築が**喫緊の課題**

(1) 汚染物質の到達範囲の評価手法(要措置区域判定時に重要，一般値1000m)
(2) 汚染状況把握のための適切なモニタリング手法（分解生成物の挙動は？）
(3) 原位置での措置の目標レベルや評価手法

背景（技術・科学的課題）



研究の主対象のクロロエチレン（VC）をはじめ

親物質の塩素化エチレン類からの土壌・地下水中の挙動把握が必要

(1) 長期の吸脱着挙動、不飽和層への気化・拡散挙動の解明
(2) 帯水層での塩素化エチレン類の分解、VCの生成挙動の解明

} 特にVCは十分な知見がない

(3) 多次元（帯水層・不飽和層での3次元的媒体間挙動）シミュレーション手法の構築
(4) VC汚染実態の現場調査データの収集・解析

→ 汚染到達範囲、適切なモニタリング手法、原位置浄化の目標レベルや評価方法

目的と構成

目的：新規の規制物質であるクロロエチレンに着目し、
帯水層と不飽和層での前駆物質の移動も含めた土壌中挙動を
総合的に把握するための検討を行う。

研究構成（サブテーマ）

【室内実験】

（1）塩素化エチレン・エタン類の吸脱着挙動、気化・拡散挙動に関する研究

（2）塩素化エチレン・エタン類の微生物分解挙動に関する研究

【数値解析】

（3）多次元シミュレーションに基づく土壌・地下水中の挙動の予測解析に
関する研究

【実汚染現場調査】

（4）実汚染現場における汚染状況調査と挙動予測の検証および
原位置浄化手法の評価に関する研究

**→ 汚染到達範囲、適切なモニタリング手法、
原位置浄化の目標レベルや評価方法について、検討、提案する。**

研究体制と各サブテーマの連携

●アウトプット1：データベースの構築

■室内試験

サブテーマ1　物理化学的データ
吸脱着・気化拡散挙動の測定・解析

横浜国大　小林 剛　准教授（環境安全工学）

【主な実績】塩素化エチレン類等の吸着パラメータの実測と文献調査、気化拡散実験準備

サブテーマ2　生物学的データ
微生物分解挙動の測定・解析

産総研　張　銘　研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ長（地盤環境工学）

【主な実績】塩素化エチレン類の分解速度の実測と分解挙動に関する文献調査

入力パラメータ
実験条件等確認

調査サイトの土壌や
地下水 を用いた試験
＋α

■数値解析

サブテーマ3 土壌・地下水中の挙動解析

産総研　保高　徹生　主任研究員（環境リスク学）
（和歌山大　江種伸之 教授と連携　（一部委託））

【主な実績】PCEと分解生成物の分解生成を考慮した土壌中挙動予測、計算シートの作成

■実汚染現場調査

サブテーマ4　実現場での挙動把握・浄化

東京農工大　細見　正明　教授（環境工学）

【主な実績】実汚染サイト2箇所での調査

妥当性評価
改善

●アウトプット2 ： 行政ニーズへの貢献
- 地下水汚染の到達範囲の評価手法構築・評価結果公開
- 汚染把握のための適切なモニタリング手法の提案
- 原位置浄化の目標レベルの提案・評価方法の構築

情報提供や技術的な意見を得る
アドバイザリーボード
元上智大学　　中杉修身委員
放送大学　　平田健正委員(H30-31)
国際環境ｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ　中島誠 委員

環境省の関連の検討会等とも連携、適宜研究成果の情報提供・意見発信
（汚染の到達距離、trans-DCEの分解性、VOCの調査・管理の手法など）

サブテーマ1：塩素化エチレン・エタン類の吸脱着挙動、気化・拡散挙動に関する研究

小林　剛、末継　淳（横浜国立大学）

研究ポイント：親物質の共存影響や有機物以外への吸着の把握、多くの土壌でのパラメータ集積

最終目標

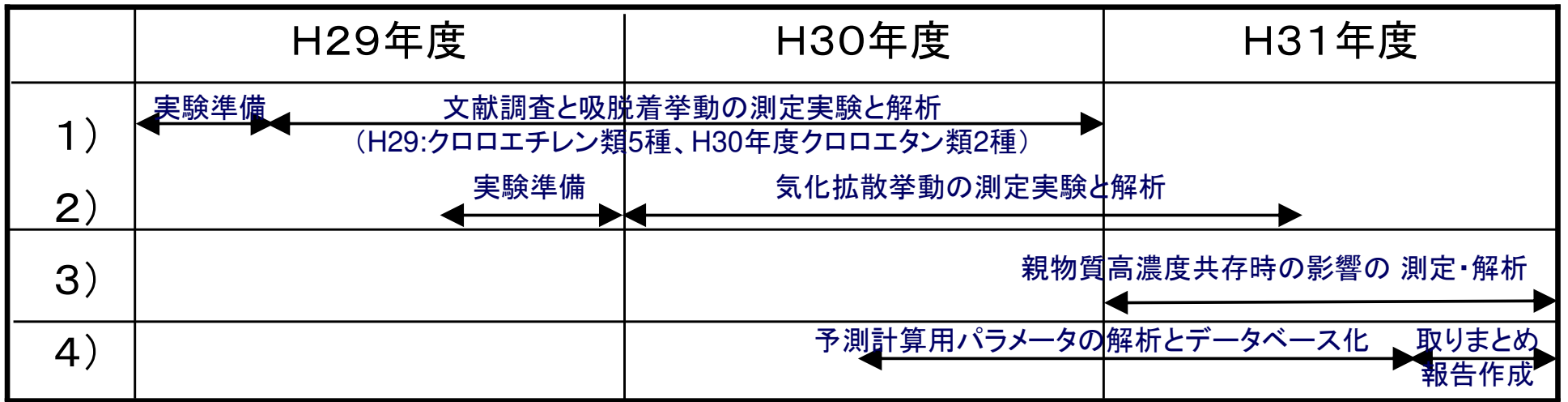
+α：8種（t-DCE）

・クロロエチレンと前駆物質である塩素化エチレン・エタン類 7種の
　土壌・地下水中での吸脱着挙動、気化・拡散挙動の測定と
　土壌特性値等との関係の解析、親物質の高濃度共存時の影響の解析
・国内における土壌・地下水中での各パラメータのデータベース化

→ サブテーマ3：得られたパラメータやその幅は予測計算に活用
→ サブテーマ4：調査地の汚染物質の挙動の理解に活用

年度計画

1）吸脱着挙動の調査と土壌特性値等との関係解析（H29–30）
2）気化・拡散挙動の調査と土壌特性値等との関係解析（H29–31）
3）親物質の高濃度共存時のVCの土壌中挙動への影響の測定・解析（H31）
4）各パラメータのデータベース化（代表値と分布）（H30–31）



結果　吸着平衡実験結果：土壌特性値と吸着平衡定数Hsw

土壌試料	有機炭素含有率	50 nm以下の細孔容量	吸着平衡定数Hsw(L/kg)							
	[%]	[mL/g-dry soil]	PCE	TCE	*c*DCE	*t*DCE	VC	MC	1,2-DCA	1,1-DCE
豊浦砂	0.01	0.00	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3
真砂土	0.02	0.02	0.5	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2
鹿沼土	0.06	0.30	2.3	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.7	<0.1	1.0
赤色土	0.84	0.09	2.3	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3
荒木田土	0.54	0.08	0.9	0.2	0.1	0.3	<0.1	0.4	<0.1	0.5
関東ローム	1.37	0.33	1.2	0.3	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6
黒ボク土	7.13	0.12	16.4	3.8	1.6	1.4	0.1	2.4	0.8	2.3
泥炭土	30.06	0.161(H_2O)	128.4	23.3	14.3	15.5	5.9	20.1	6.6	19.2
粘土混じり砂質土	1.11	0.03	8.3	1.6	0.9	1.9	0.1	1.5	0.3	1.3
実態調査地表土	0.78	0.03	3.8	0.5	0.2	0.5	<0.1	0.6	<0.1	0.7
実態調査地深さ1m	0.76	0.04	3.7	1.2	0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	2.1
実態調査地深さ5m	0.05	0.01	1.6	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4
実態調査地深さ8m	0.86	0.02	7.8	4.9	0.6	0.6	0.2	0.5	0.3	0.6
		Koc (L/kg-C)	417	77	49	50	22	40	22	63

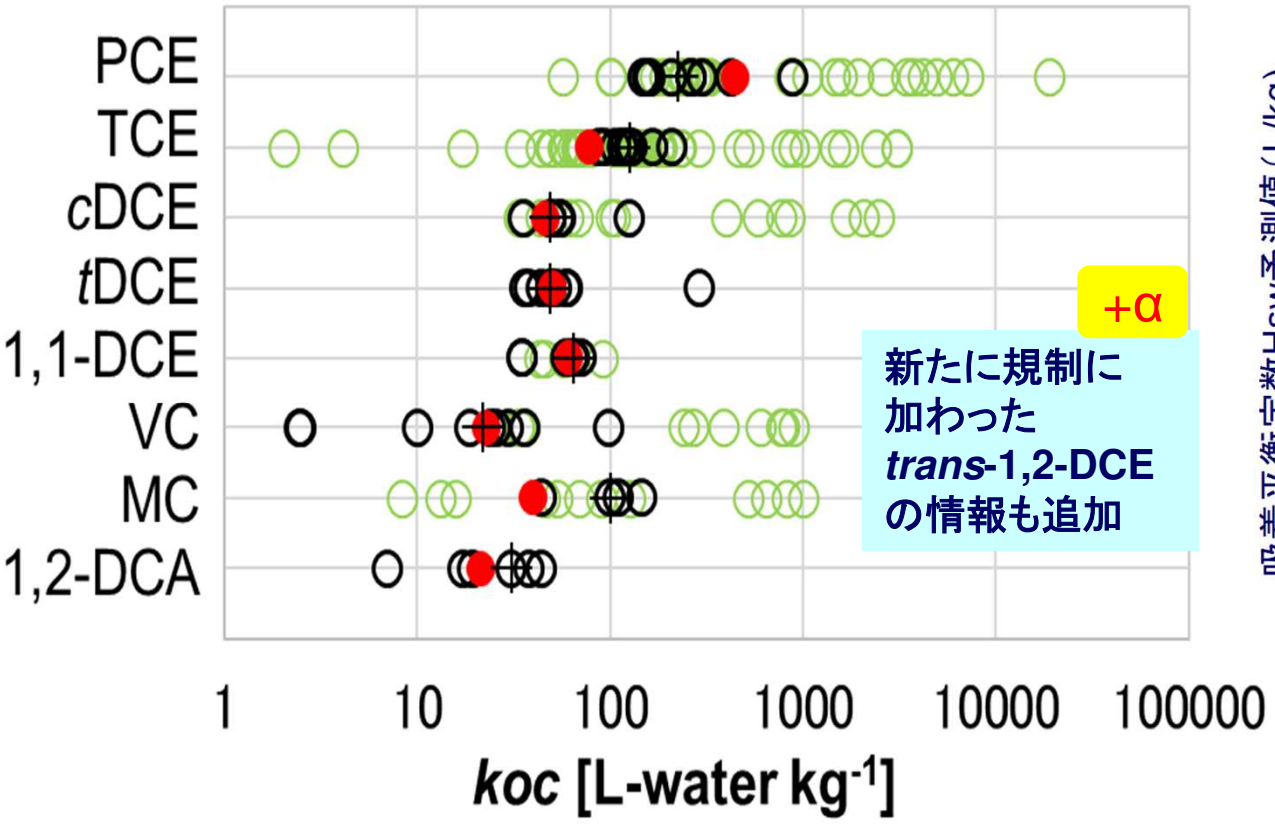
→ ***trans*-DCE**も追加

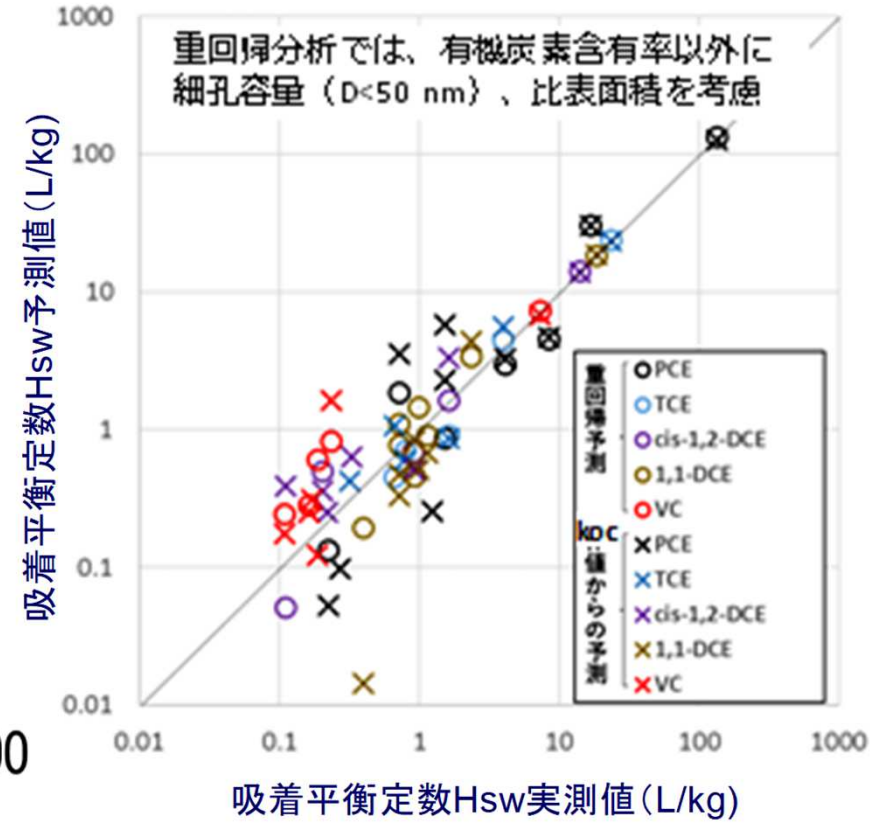
+α

Hsw=Cs/Cw
帯水層中での土壌への吸着性を表す

サブテーマ3の知見から、
Hsw=0.1未満で吸着性は、帯水層中の移動に影響しない。

結果　文献検索結果と実測値：（Koc値）　　土壌特性値からの予測

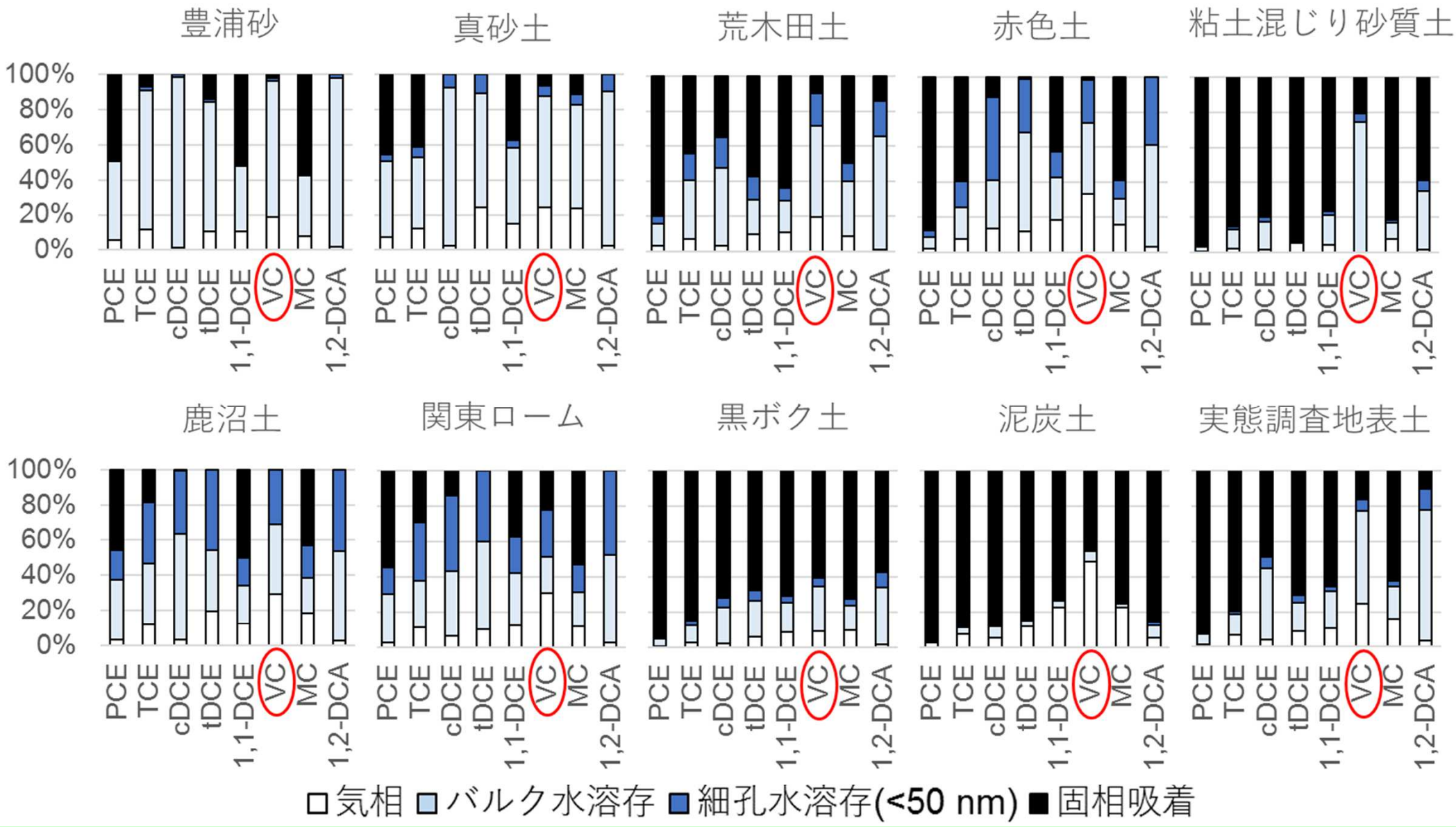




○公的文書の値、複数の土壌での実験結果から得られた報告値
＋ 報告値の中央値（外れ値の影響が大きいため平均値を使用しなかった）
◯ 文献に記載の単一の土壌のHsw値と有機炭素含有率とから算出した値
●今回の研究での実験値（15℃）

- VCのデータは文献値でも大きくばらつく。（値が小さく実験精度が悪い、情報が少ない）
- *trans*-DCEの吸着性は*cis*体と同程度となった。
- 低吸着性土壌では、Kocのみでの予測（×）より、表面積や細孔容量も用いると精度が向上（○）。

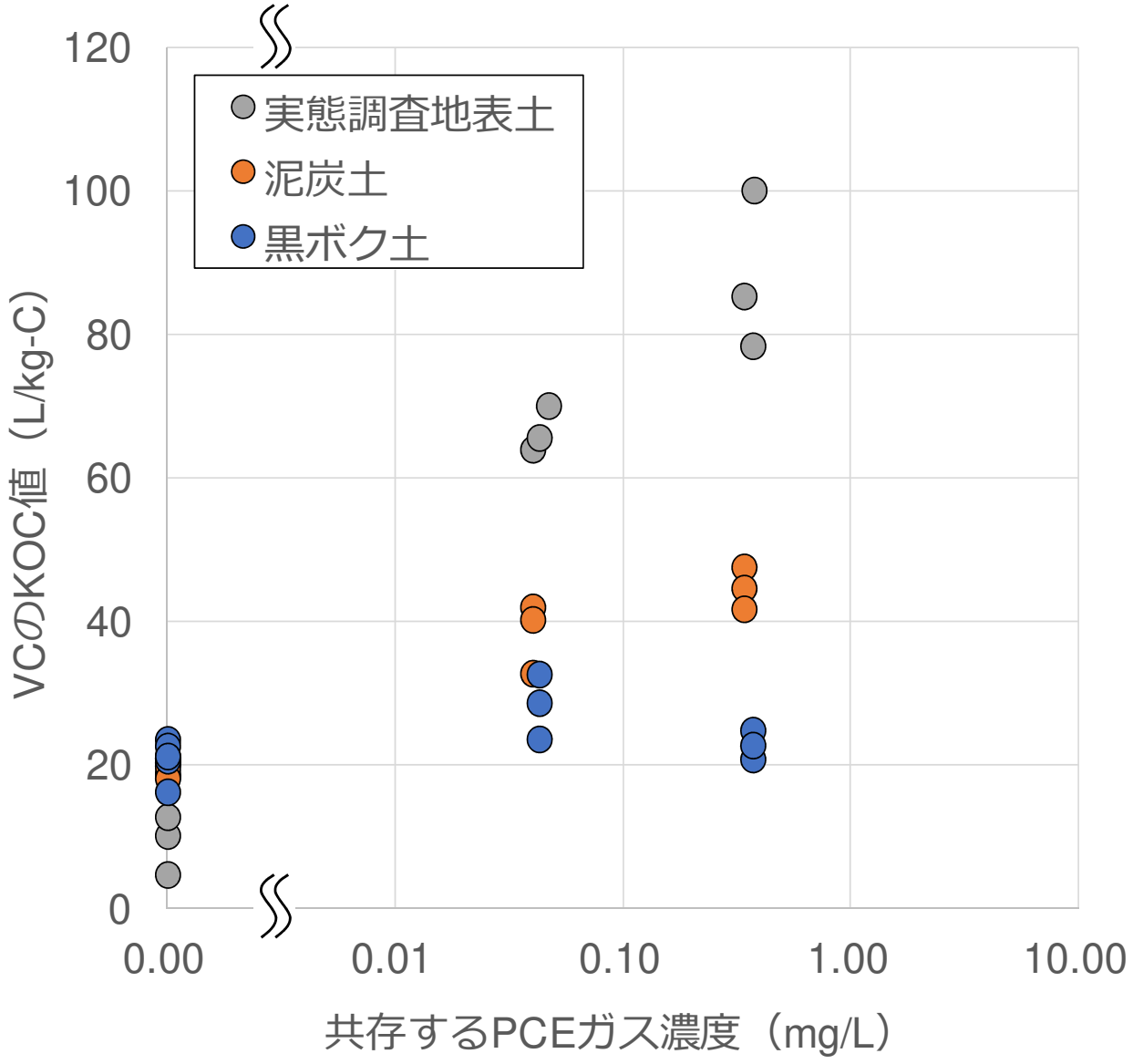
結果　吸着平衡実験結果：**不飽和**土壌中のクロロエチレン等の存在形態



- **クロロエチレン(VC)では、土壌固相への吸着分は非常に少ない。**
- **多くの土壌で、土壌中での挙動は、有機炭素含有量によらず、水分の含有量に大きく影響されることが推察される。**
- **VCは、降水の影響など、水分の挙動の影響(間隙水の移動)を受けやすいことが示唆。**

結果 吸着平衡測定結果：VC吸着への高濃度PCEの共存影響

PCEとVCの
同時通気による
吸着実験



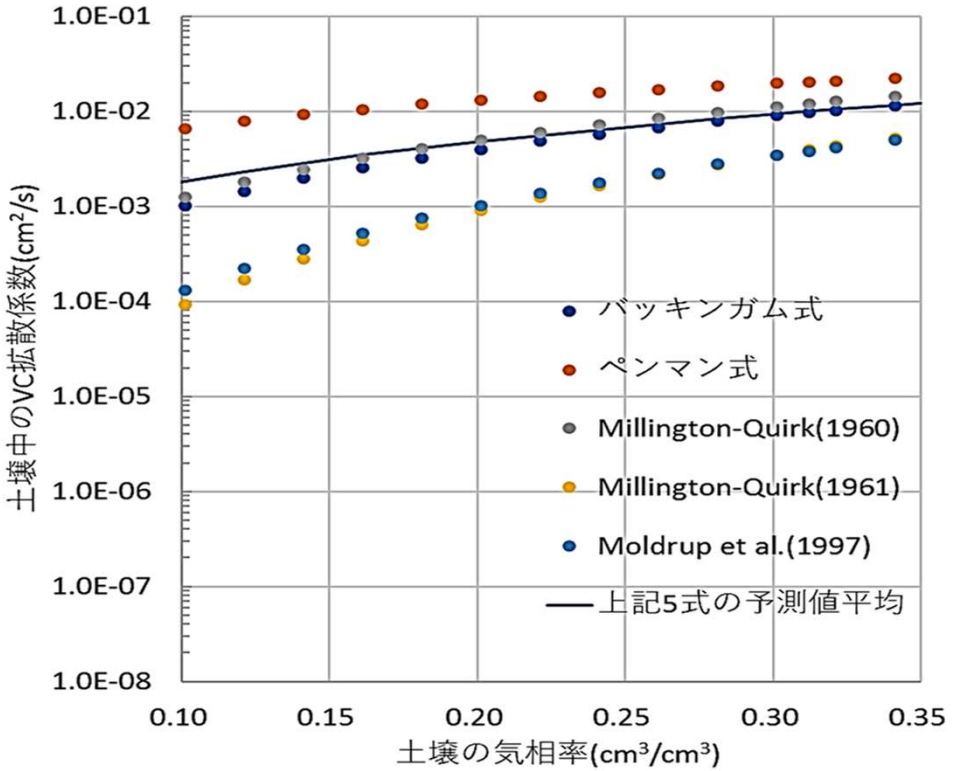
PCE共存条件でのVCのKOC値

◆ VCの吸着に対して、PCEの共存が吸着性を高める可能性があり、
特に、有機炭素含有率の低い土壌ではその影響が大きく数倍程度となることが示唆。

文献検索結果 分子拡散係数の温度補正

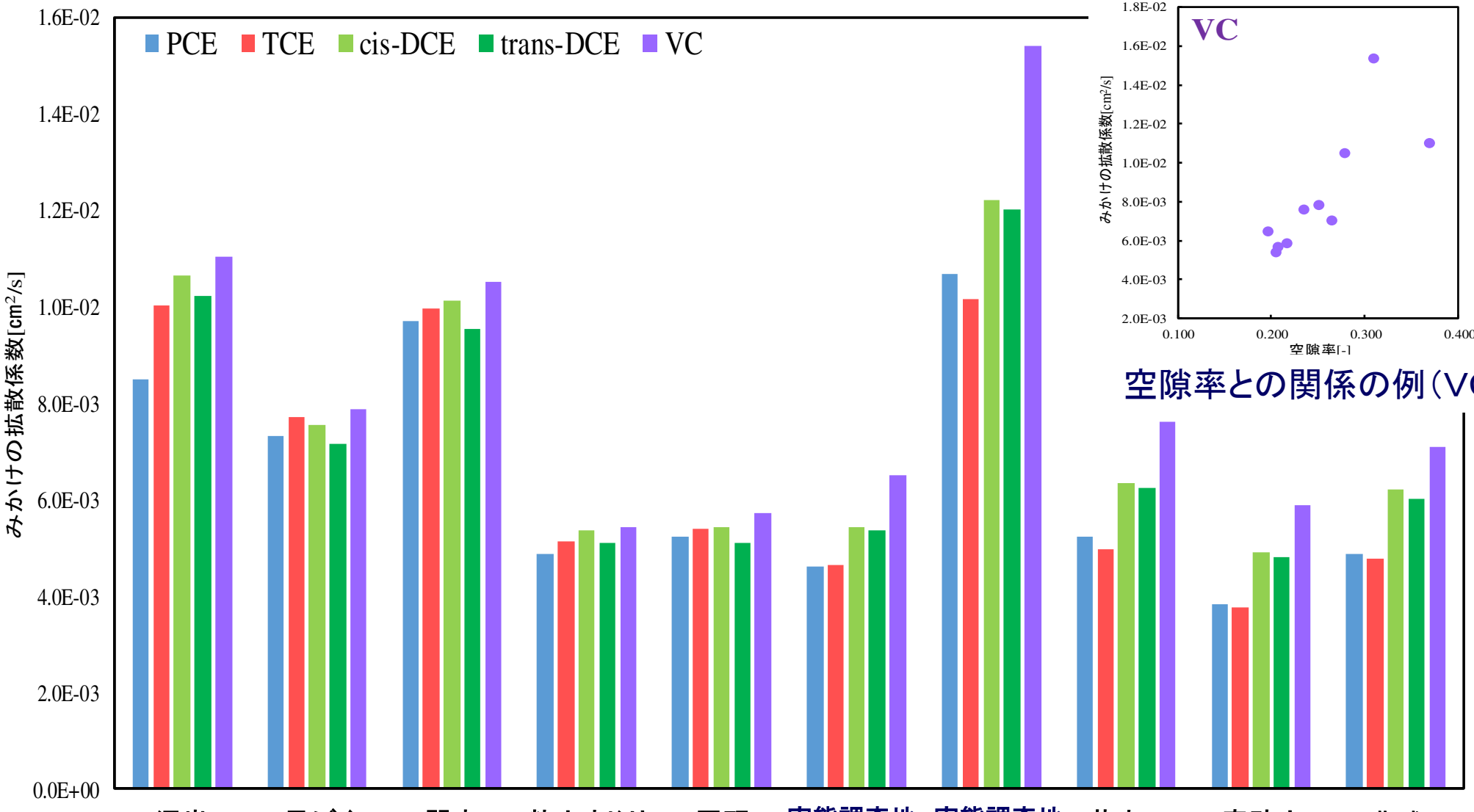
温度補正→
（15℃に換算）

Chemical Species	D in air (cm²/s) 25℃での報告値を2乗則で補正した値	D in air (cm²/s) 25℃での報告値を1.75乗則で補正した値	D in water(cm²/s) 水の粘性係数による変化をTucker & Nelkin式で評価した値
	気相中分子拡散係数（15℃）		水中分子拡散係数（15℃）
VC	0.099	0.099	9.90E-06
PCE	0.071	0.071	6.20E-06
TCE	0.076	0.077	6.97E-06
1,1-DCE	0.084	0.085	7.86E-06
cis-1,2-DCE	0.083	0.083	8.54E-06
MC	0.074	0.074	6.65E-06
1,2-DCA	0.091	0.092	7.48E-06



- 15℃に補正。
  空気中では、水中より4 桁程度、
  分子拡散係数が小さい。
- 空隙率等を考慮した、みかけの拡散係数の推定式が提案されている。
  （不活性ガス）
  黒ぼく土では、砂質土と比べて
  予測結果のばらつきが大きかった。

結果　不飽和土壌中でのみかけの拡散係数



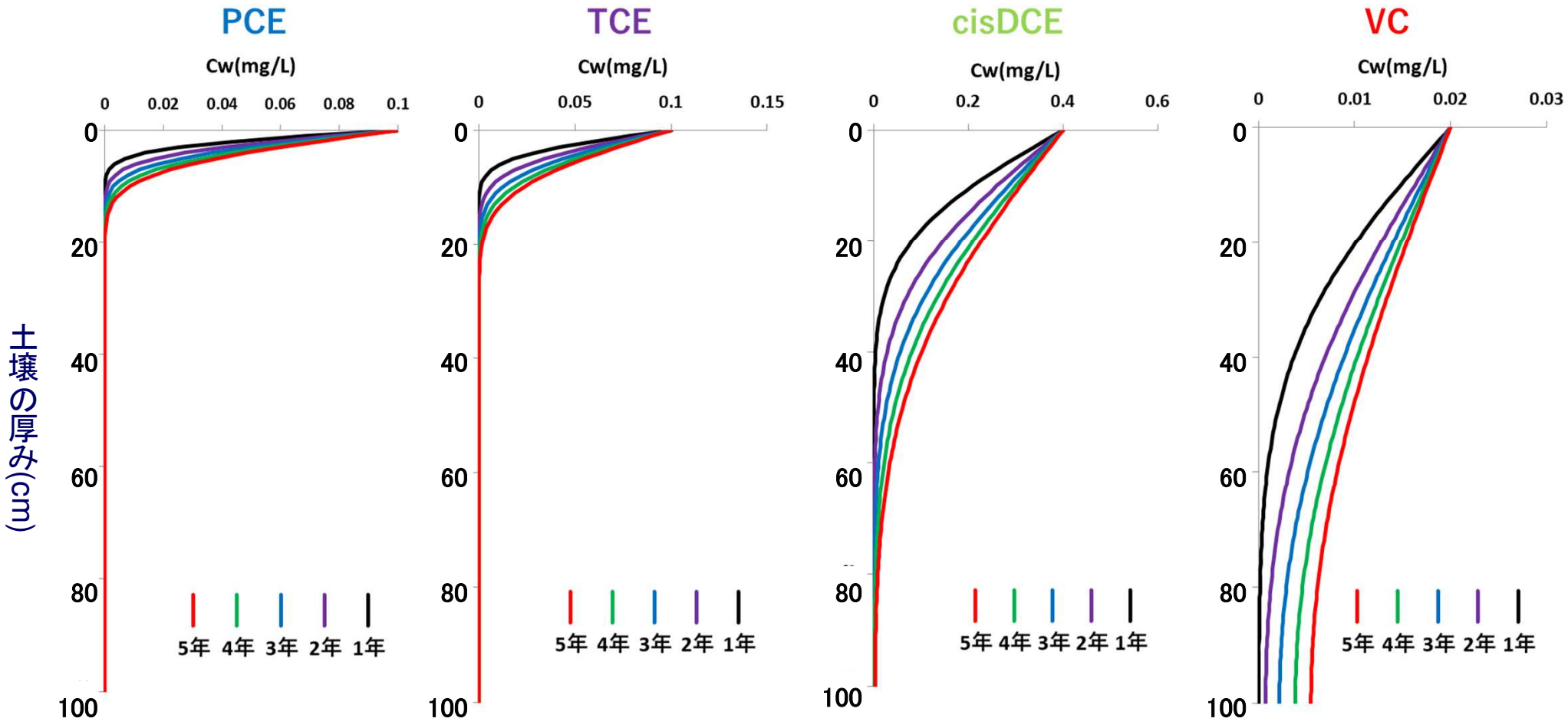
空隙率との関係の例（VC）

各CVOCのみかけの拡散係数は、大 PCE ≒ TCE ＞ trans-DCE、cis-DCE ＞ VC 小
土壌による違いは、空隙率との相関は見られたが、他の特性値と相関は見られていない。
物質による違いは、数10%程度。　＞ 土壌中挙動については、吸着・吸収による影響の方が大きい

結果 実測した粘性土の拡散係数を用いた汚染の侵入挙動予測例

粘性土中でのみかけの拡散係数の実測値

8.5×10^{-8} cm²/s　3.9×10^{-7} cm²/s　1.9×10^{-6} cm²/s　1.6×10^{-6} cm²/s



地下水から粘性土壌への浸入挙動解析の例（間隙水濃度Cwの計算結果）（15℃）

+α

◆ 粘性土中の見かけの拡散係数は、PCEやTCEに比べて VC やcDCEは2桁大きい。
VCやDCEは粘性土中の奥部まで浸透しやすい。　※**実汚染現場でも確認**

まとめ
ｻﾌﾞﾃｰﾏ１:塩素化ｴﾁﾚﾝ・ｴﾀﾝ類の吸脱着挙動、気化・拡散挙動に関する研究

主な研究成果と結論

塩素化ｴﾁﾚﾝ・ｴﾀﾝ類の吸着平衡値、拡散係数を室内実験と文献調査によりDB化
＞テーマ３へデータ提供。

+α:t-DCEを追加、土壌の種類も多く実施

吸着

吸着性の順　PCE ＞ TCE ＞ cis,trans-DCE、1,1-DCE、MC ＞ VC、1,2-DCA
有機炭素含有率の低い土壌で、細孔水への吸収が多孔質土壌では無視できない。
有機炭素含有率の低い土壌で、 PCE共存によりVCの吸着性が数倍高まる可能性。
VCは土壌への吸着性が低く、帯水層の土壌では吸着性はほぼ無視できる。

拡散

空隙率が高く、含水率が低い土壌ではみかけの拡散係数は高まる。
VCの拡散係数が最も大きいが、物質による差は小さく2倍以内程度。
粘性土中の見かけの拡散係数は、PCEやTCEに比べて VC やcDCEは非常に速い。
不飽和帯での拡がりについて、黒ボク土中ではVCでも拡がりが非常に遅く、
拡散速度の違いではなく土壌への吸着と間隙水への吸収とによる。

+α:粘性土での試験、油の影響の試験

環境行政への提言

１．帯水層中でVCは吸着しにくく拡がりやすい。到達距離の一般値に収まるか要確認
PCEより１桁小さな吸着性。帯水層の土壌の多くで吸着性は無視できる。

２．不飽和帯でVCは降水などの環境変動の影響を受けやすい。
VCは、多くが間隙の気相と水相に分配されるため、雨水の浸透等の影響大。
表層土壌ガス調査で、値がよりばらつく可能性。

３．帯水層中で生成したVCやcDCEは、粘性土中に残留しやすいので要注意?
長期汚染されたサイトでは、VCやcDCEはPCEと比べて粘性土の奥まで浸入しやすい。
PCE、TCEの高濃度部を除去・浄化しても、さらに奥に残存する可能性。

サブテーマ2：塩素化エチレン・エタン類の微生物分解挙動に関する研究

張　銘・吉川美穂　（産業技術総合研究所）

研究ポイント：実土壌中での長期を考慮した分解速度パラメータ集積、阻害メカニズムの明確化

最終目標

+α：8種

・クロロエチレンと前駆物質である塩素化エチレン・エタン類 7種の
　土壌・地下水中での分解速度の測定や微生物分解に影響を及ぼす
　環境雰囲気や分解生成物による阻害・促進メカニズムの解明
・国内外における土壌・地下水中での生分解パラメータのデータベース化

+α：実態調査地での微生物生育環境調査、
分解菌のモニタリング

→ サブテーマ3：予測計算に活用
→ サブテーマ4：調査地の挙動理解に活用

年度計画

1）分解挙動の調査と分解の阻害・促進メカニズムの解明（H29-31）
2）複合汚染時の分解挙動の評価（H30-31）
3）各パラメータのデータベース化（代表値と分布）（H30-31）

	H29年度	H30年度	H31年度
1）	実験準備 ←→ 親物質からVCを中心とした分解実験 ←→	阻害・促進メカニズムの解明 ←→	
2）		複合汚染分解挙動評価 室内分解実験 ←→	
3）	←→	土壌特性値等との関係解析 予測計算用パラメータの整理とデータベース化 ←→	取りまとめ 報告作成 ←→

結果　実汚染サイトでの分解速度に関する文献調査

文献調査で得られた汚染サイトにおける分解定数

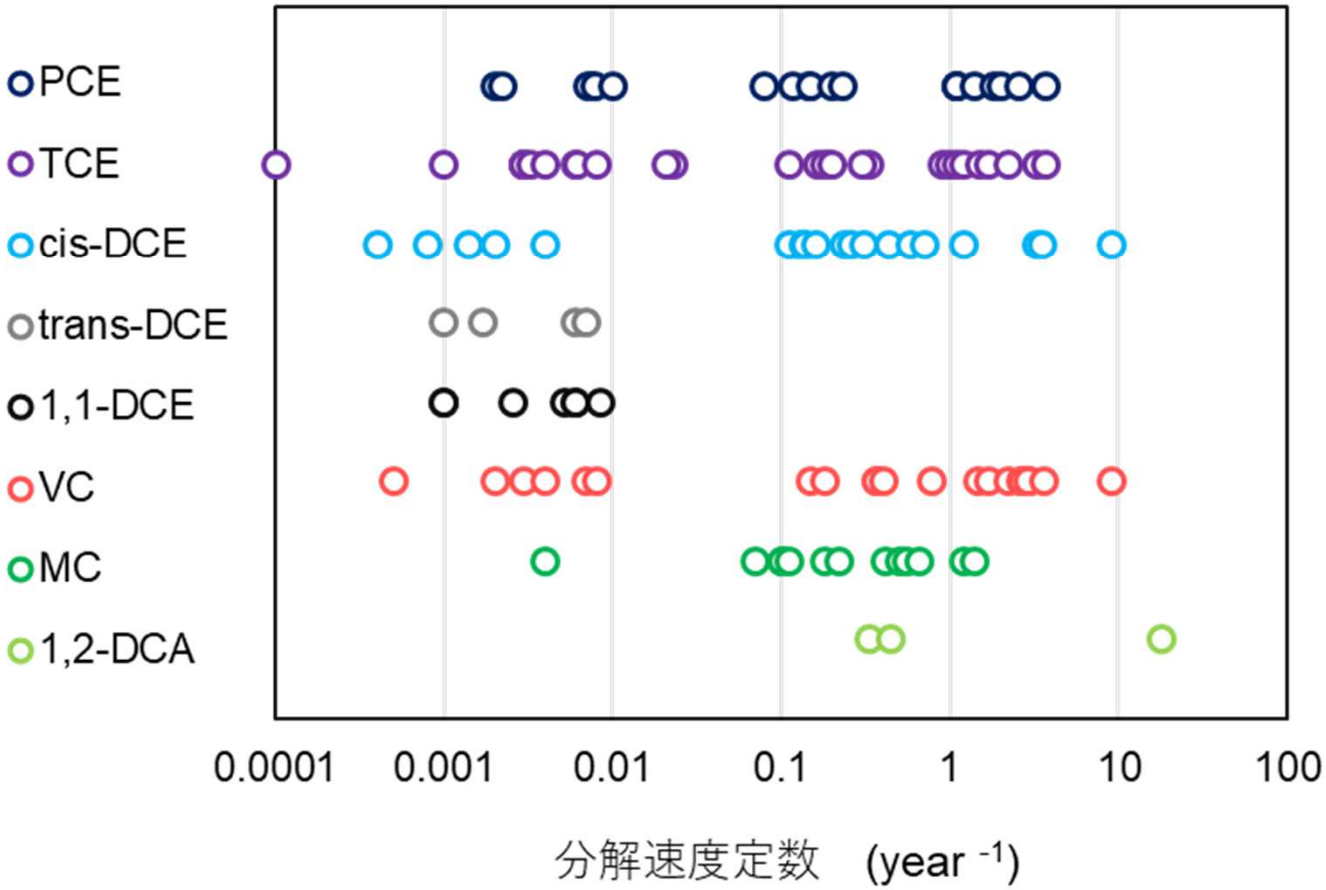


図　文献調査で得られたクロロエチレン類およびクロロエタン類の分解定数の幅

◆ クロロエチレン類の分解定数は幅広く、サイト条件により大きく変化する
得られたデータは、サブテーマ③の予測計算に活用

+α：*trans*-DCE の調査も実施

結果　実内分解実験結果の例（各種VOC類、環境影響）

実験方法

①高濃度PCEの影響 (Slide No.6－7)

PCE濃度1.5～150mg/L　8条件

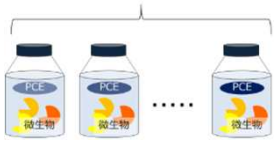


図　試験模式図

スケール
　160 mL塩類培地
　　+32 mL微生物コンソーシアム
電子供与体
　酢酸ナトリウム、乳酸ナトリウム、
　イースト、メタノール
培養条件
　30℃、150 rpm、暗所

②Feおよびメタン菌の影響 (Slide No.11－12)

4条件

図　試験模式図

スケール　実汚染サイト地下水
　　48 mL、F-2-2(II)
初期PCE濃度　1 mg/L
電子供与体　乳酸ナトリウム、イースト
実験条件　$FeCl_2$ and/or BES添加
培養条件　20℃、静置、暗所

③クロロエタン類の影響 (Slide No.14)

4条件

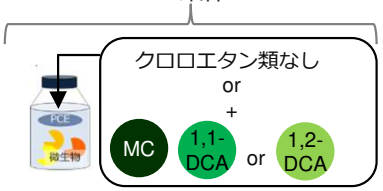


図　試験模式図

スケール　実汚染サイト地下水　46 mL
　　F-2(II)
　　(*クロロエチレン類とクロロエタン類が共存)
初期VOCs濃度　各々1 mg/L
電子供与体　乳酸ナトリウム、イースト
実験条件　PCE + クロロエタン類
培養条件　20℃、静置、暗所

微生物分解速度の評価方法

First-order (一次反応式)

$$v = -k[S]$$

反応速度vは基質Sの濃度に依存
k：分解定数（day^{-1}）

+α　Michaelis-MentenおよびMonod式での評価手法も確立

結果　分解パラメータ

表　室内実験で得られた分解定数パラメータ(day^{-1})

	PCE	TCE	*cis*-DCE	VC
①高濃度PCEの影響	0.31-0.70	0.10-1.05	0.03-0.60	0.01-0.04
②Feおよびメタン菌の影響				
Fe低濃度、メタン菌生息	0.12	9.34	0.03	0.06
Fe高濃度、メタン菌生息	0.14	7.23	0.08	0.09
Fe低濃度、メタン菌不在	0.13	3.86	-	-
Fe高濃度、メタン菌不在	0.12	4.57	-	-
③クロロエタン類の影響				
PCEのみ	0.71	0.13	0.50	0.07
PCE＋MC	1.04	0.39	0.16	0.05
PCE+1,1-DCA	1.41	0.15	0.18	0.02
PCE+1,2-DCA	1.77	0.21	0.26	0.02
	MC	**1,1-DCA**	**1,2-DCA**	

VCの分解定数

◆ 他のクロロエチレン類より小さい傾向
初期PCE濃度30 mg/L以下では
微生物分解によりVC生成
VC濃度による定数の差は見られない
メタン菌生息下でVC生成
Fe濃度 2 → 30 mg/Lで分解定数1.5倍
クロロエタン類 1 mg/Lの共存で
分解定数0.2-0.7倍

高濃度クロロエチレン類による影響（VOCs分解）

実験目的

**高濃度のPCEが、微生物による
クロロエチレン類の嫌気的脱塩素分解を
阻害するメカニズムを、硫酸還元や
発酵のプロセスも踏まえ解明**

実験方法

スケール　微生物コンソーシアム 32 mL +
リン酸緩衝液を主体とした塩類培地 160 mL

**初期PCE濃度　1.5、2.0、3.0、6.0、
30、75、125、150 mg/L**

電子供与体　酢酸ナトリウム、乳酸ナトリウム、
メタノール、イースト

培養条件　30℃、150rpm、暗所

**PCE濃度1.5～150mg/L
8条件**

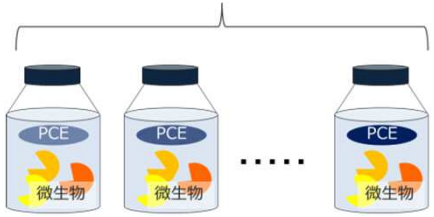


図　微生物分解試験の模式図

***実験開始時
Dehalococcoides
16S rRNA遺伝子濃度**

2.98×10^{1} copies/mL

結果　VOCs分解および分解微生物

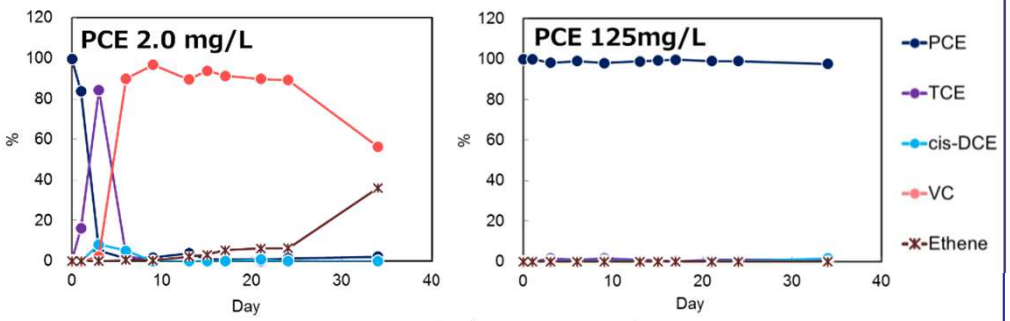


図　VOCs濃度変化　（左）初期PCE濃度2mg/L
（右）初期PCE濃度125mg/L

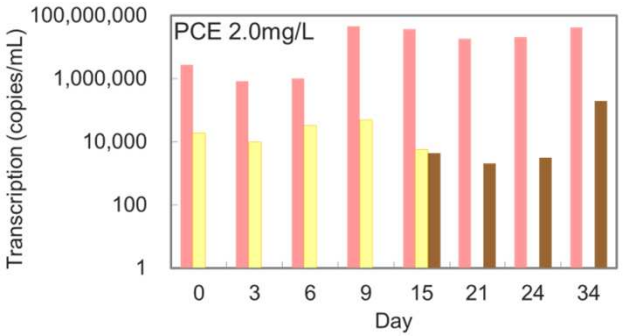


図　PCE2mg/L条件における遺伝子発現の経時変化

**低PCE濃度（1.5-30 mg/L）
微生物による嫌気的脱塩素分解が生じ、
VC生成。*Dehalococcoides* 16S
rRNAや分解酵素遺伝子が
分解に伴い発現。**

**高PCE濃度（75-150 mg/L）
PCEは分解阻害。PCEが高濃度の場合、
VC生成濃度は低い可能性を示唆**

高濃度クロロエチレン類による影響（硫酸還元、発酵）

結果　硫酸還元および発酵

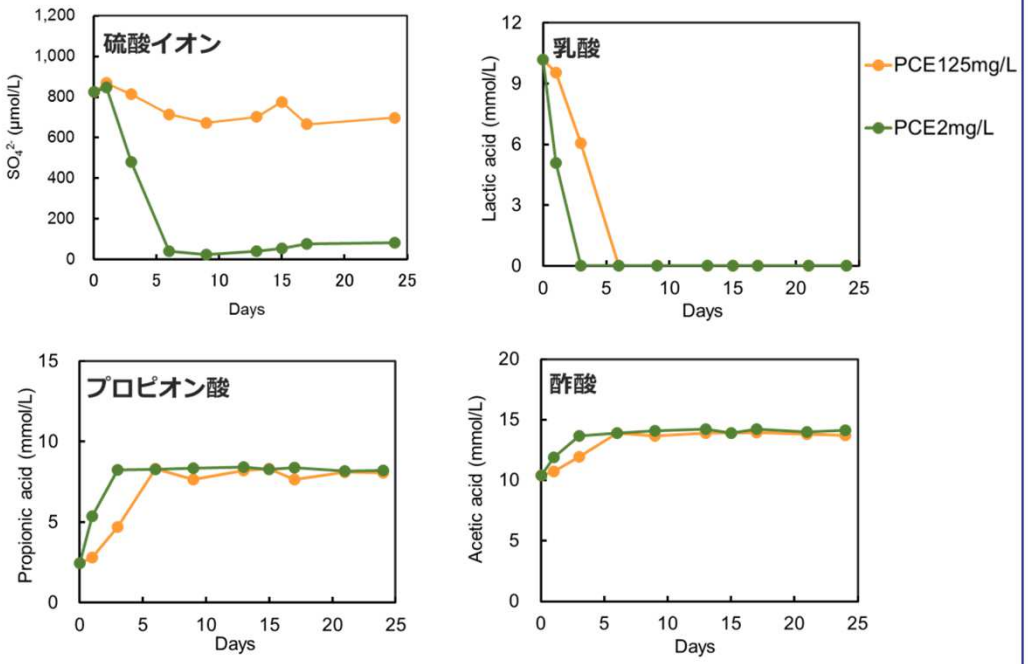


図　硫酸および有機酸濃度変化

硫酸還元や有機物の発酵はPCE濃度が高いことにより阻害された

高濃度のPCEが存在する事で、クロロエチレン類の分解のみならず、他の微生物反応も阻害を受けていると考えられる

結果　微生物叢

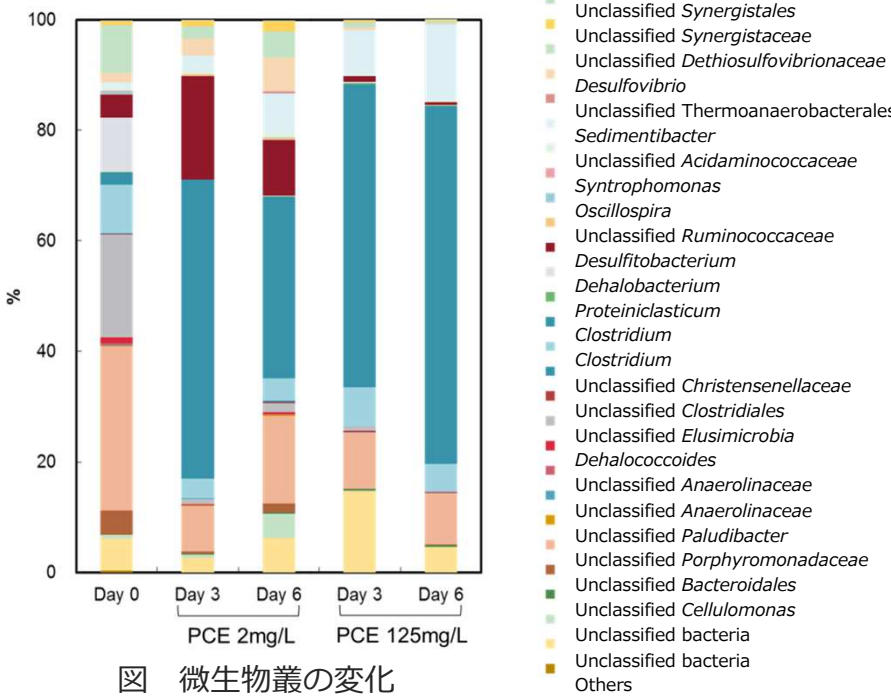


図　微生物叢の変化

低PCE濃度（2 mg/L）
　PCE分解時に*Desulfitobacterium* 16S rRNAが高い割合で発現。

高PCE濃度（125 mg/L）
　Desulfitobacterium 16S rRNAはあまり発現せず。

*Desulfitobacterium*がPCE分解を担っており、高濃度PCEによりその分解が阻害されたと考えられる

結果　分解挙動の調査と分解の阻害・促進メカニズムの解明
二価鉄、メタン生成菌による影響（VOCs分解）

実験目的

地下水の化学性（二価鉄）および生物性（メタン生成菌）が、クロロエチレン類の微生物分解挙動へ与える影響を解明

実験方法

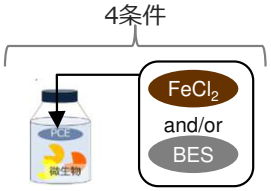


図　試験模式図

図　微生物分解試験の模式図

スケール　**実汚染サイト地下水** 48 mL、**F-2-2(II)**
初期PCE濃度　1 mg/L
電子供与体　乳酸ナトリウム、イースト
実験条件　$FeCl_2$ and/or BES添加
培養条件　20℃、静置、暗所

表　分解実験条件

条件名	塩化鉄（II）	BES*	
Fe (-)　BES (-)	—	—	
Fe (+)　BES (-)	+	—	
Fe (-)　BES (+)	—	+	メタン生成菌生育阻害
Fe (+)　BES (+)	+	+	

*2-ブロモエタンスルホン酸ナトリウム（BES）は、**メタン生成菌の生育阻害剤**として知られる。

結果　分解挙動

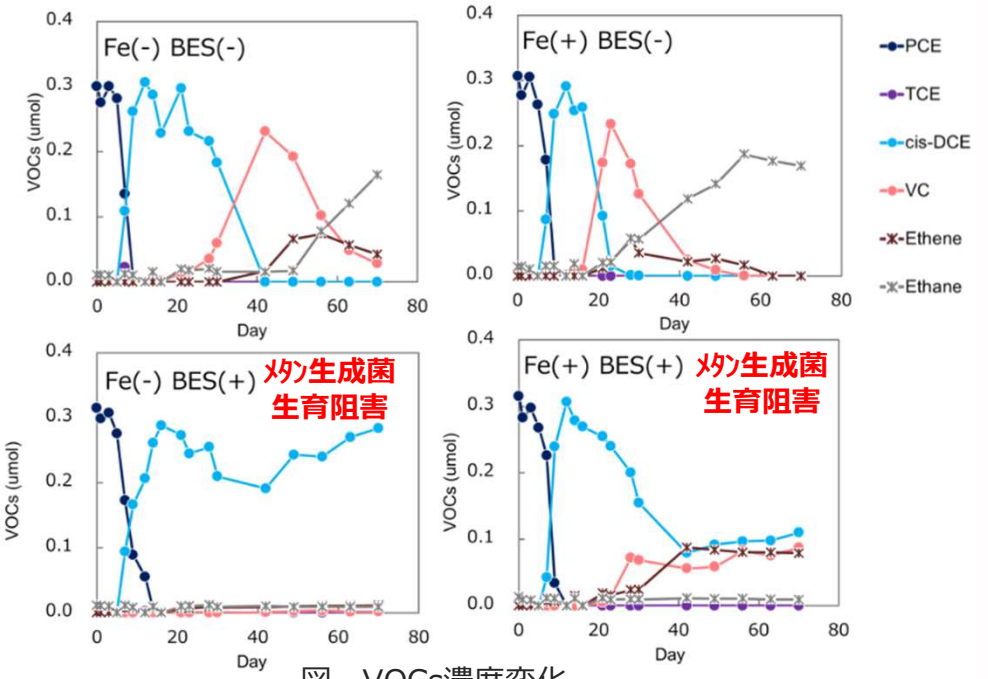


図　VOCs濃度変化

cis-DCEおよびVCの分解

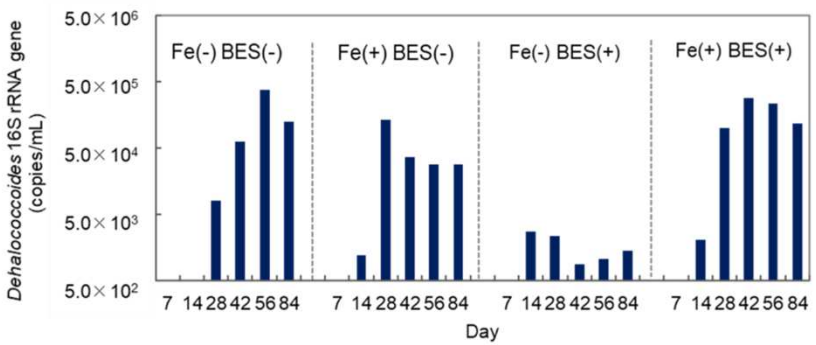
- 塩化鉄(II)添加により分解が促進
  メタン生成菌生育阻害剤添加で分解阻害
- 高Fe濃度およびメタン生成菌の生息する地下水では分解が速いことが示唆
- VCはエチレンを経てエタンへ分解

+α　*本実験においてtrans*-DCE濃度は*cis*-DCE濃度の1桁低く検出

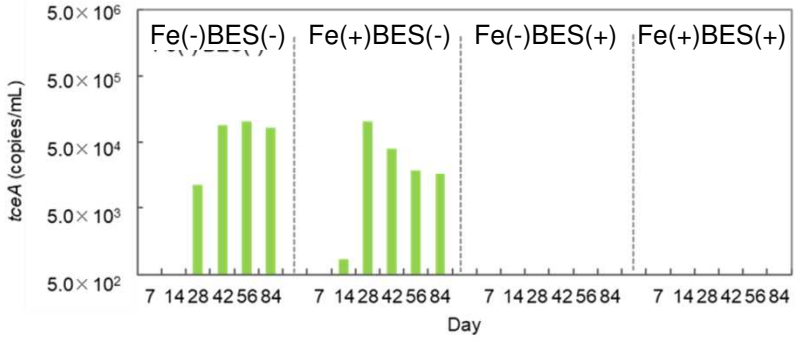
結果　分解挙動の調査と分解の阻害・促進メカニズムの解明
二価鉄、メタン生成菌による影響（微生物叢）

結果　分解微生物

Dehalococcoides 16S rRNA



tceA



vcrA

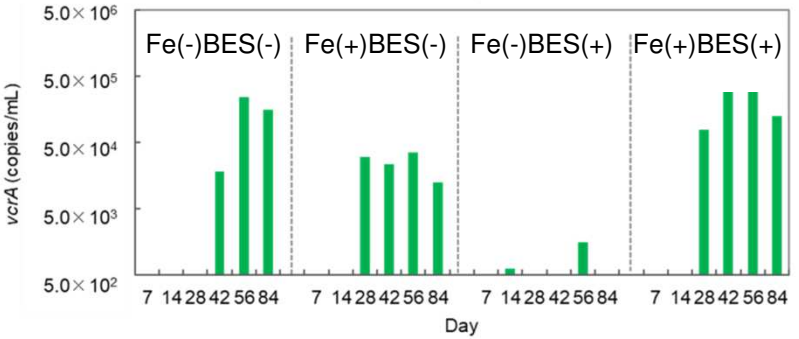


図　分解微生物*Dehalococcoides*の16S rRNA遺伝子および分解酵素遺伝子のコピー数

メタン生成菌不在による影響

- Dehalococcoides中でも、tceAを保持するDehalococcoidesの生息が抑制

結果　微生物叢

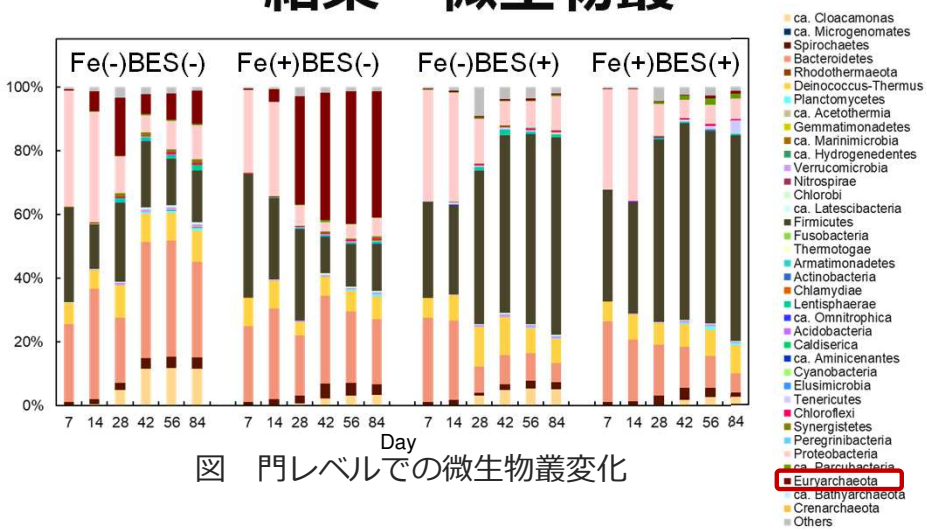


図　門レベルでの微生物叢変化

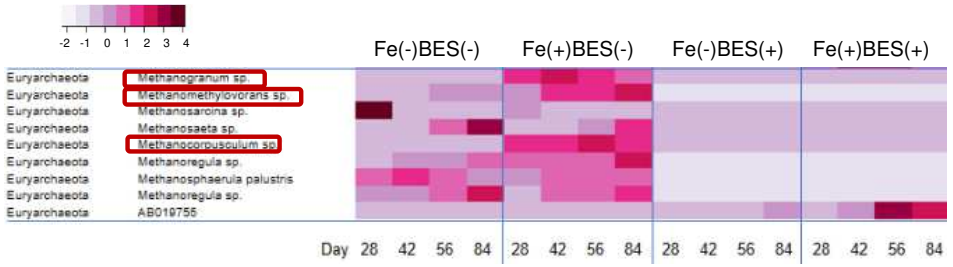


図　*Euryarchaeota*門における微生物叢のヒートマップ

二価鉄およびメタン生成菌による影響

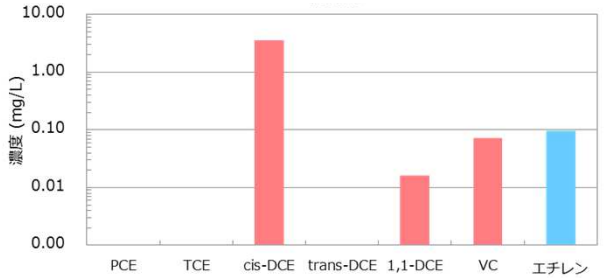
- 高Fe、メタン生成菌生息条件では、特定のメタン生成菌が優占して生息
- 高Feにより異なる種のメタン生成菌の生息が促進され、クロロエチレン類の分解が促進したことが示唆

結果　実汚染サイトでの調査結果の例（第二帯水層）

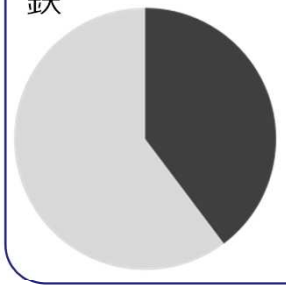
※サブテーマ4との連携

観測井E′-5′-④(II)

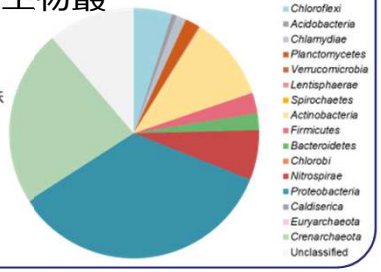
クロロエチレン類、エチレン

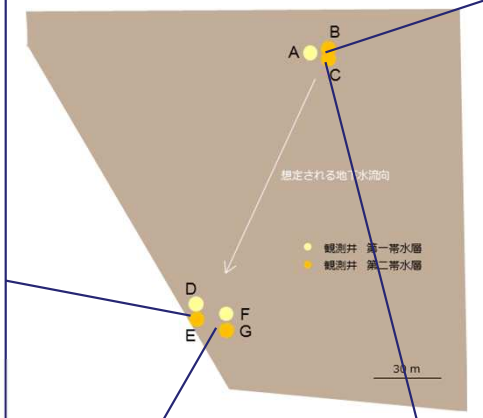


鉄



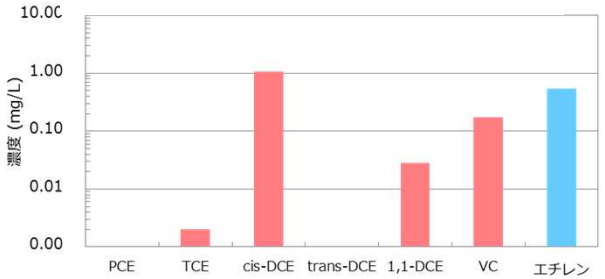
微生物叢



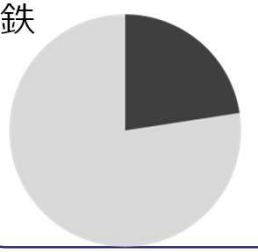


観測井F-2(II)

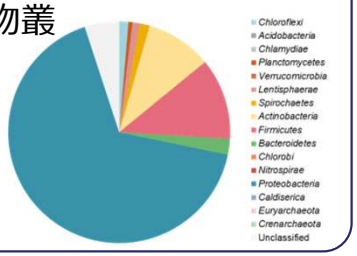
クロロエチレン類、エチレン



鉄

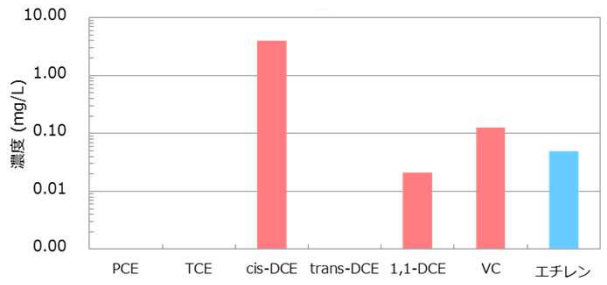


微生物叢

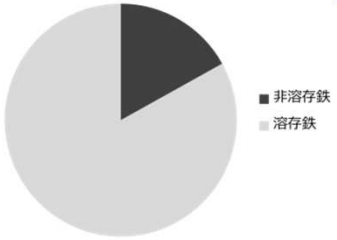


観測井D′-5′-⑤(II)

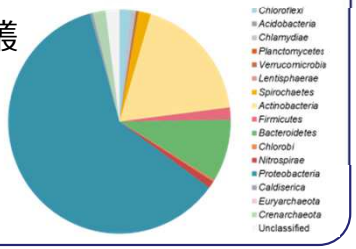
クロロエチレン類、エチレン



鉄

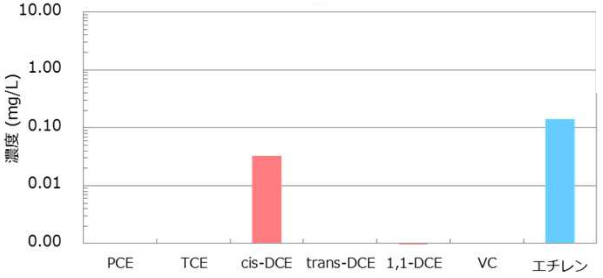


微生物叢

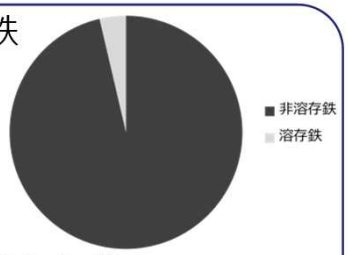


観測井F-2-2(II)

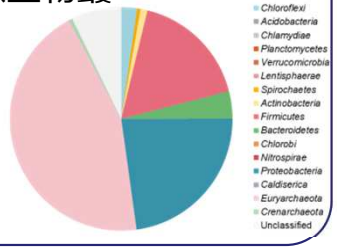
クロロエチレン類、エチレン



鉄



微生物叢



◆ F−2−2(II)　クロロエチレン類の濃度低。非溶存性鉄やメタン生成菌割合高

F−2(II)　クロロエチレン類の濃度高。F−2−2(II)のような特徴は見られず

まとめ
サブテーマ2: 塩素化エチレン・エタン類の微生物分解挙動に関する研究

主な研究成果と結論

- **分解速度を室内実験および文献調査によりデータベース化**
  微生物による塩素化クロロエチレン・エタン類の分解速度には大きな幅がある。
  サブテーマ３へデータ提供。
- **分解挙動の阻害・促進メカニズムを実験により解明**
  1．高PCE濃度（75 mg/L以上）では、PCEは分解阻害を受ける。
  PCEが高濃度の汚染源では、VC生成濃度は低い可能性。
  2．Fe濃度が高い場合、*cis*-DCEやVCの分解速度は増大する。
  3．メタン生成菌の共存により、クロロエチレン類の分解が促進される。
- **複合汚染時の分解挙動を実験結果を基に評価**
  クロロエタン類の共存により*cis*-DCEやVCの分解は阻害される。

環境行政への提言

1．汚染サイトでのVC生成

サイト調査から、残留した親物質からVCが生成して問題となり得ることが示された。

2．微生物の作用によるVC分解および分解促進条件

生成したVCが無害なエチレンへとさらに分解されるための条件は多岐に渡り、
従来考えられてきた、分解菌が生息（*Dehalococcoides*）、中性付近のpH、
低ORP、十分量のTOCに加え、クロロエタン類が共存しない、
特定の種のメタン生成菌が生息もしくは増殖可能、Fe濃度が高いことが
重要であることが本研究により示された。　**条件が整わないと高毒性のVCが残留**

サブテーマ3：多次元シミュレーションに基づく土壌・地下水中の挙動の予測解析に関する研究

保高 徹生 （産業技術総合研究所）

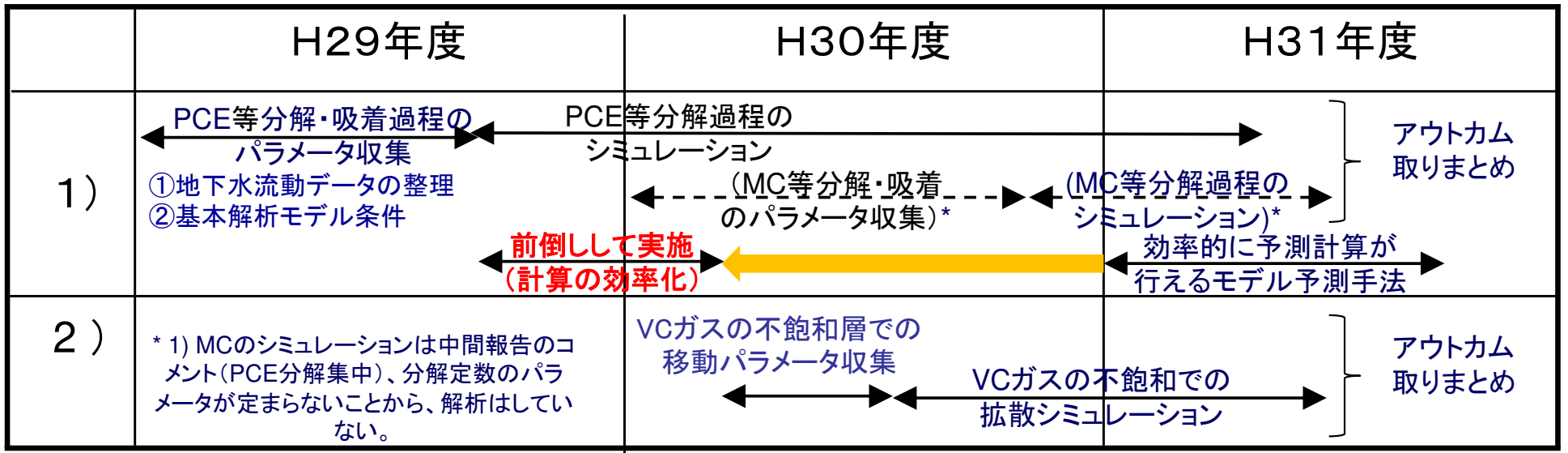
研究ポイント・シミュレーションによる地下水汚染到達距離評価モデルの構築
・数値解析による帯水層中のVCの揮発・地表面への移行特性評価

最終目標

- 帯水層と不飽和層での挙動予測について、
  微生物分解と吸脱着、不飽和層への揮発等の挙動を
  土壌／水／ガスの3相を考慮した予測、解析手法の構築
- サブテーマ1、2で収集整理、実測したパラメータを用いた感度解析
- 汚染の到達範囲の評価方法や適切なモニタリング手法・位置等の検討

年度計画

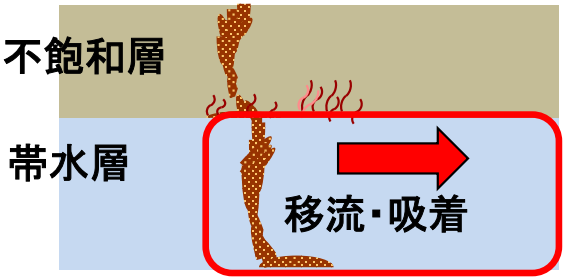
1）VC及び塩素化エチレン・エタンの地下水中での到達範囲評価（H29-31）
2）帯水層中のVCの揮発・地表面への移行特性評価（H30-31）



結果B：効率的に予測計算が行えるモデル予測手法の開発

地下水の横方向移動に対する解析モデル（通称DOMENICOモデル）を改良して、効率的に予測計算が行えるモデル予測手法を検討、提案する（3年目の目標）

連鎖分解反応過程を含んだDomenicoモデル式の構築



PCE → TCE → cis-DCE → VC

連鎖分解反応

三次元理論解

$$R_1\frac{\partial c_1}{\partial t}=D_x\frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 c_1}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2}-v_x\frac{\partial c_1}{\partial x}-\lambda_1 c_1$$

$$R_2\frac{\partial c_2}{\partial t}=D_x\frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2}-v_x\frac{\partial c_2}{\partial x}+Y_{2/1}\lambda_1 c_1-\lambda_2 c_2$$

$$R_3\frac{\partial c_3}{\partial t}=D_x\frac{\partial^2 c_3}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 c_3}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 c_3}{\partial z^2}-v_x\frac{\partial c_3}{\partial x}+Y_{3/2}\lambda_2 c_2-\lambda_3 c_3$$

$$R_4\frac{\partial c_4}{\partial t}=D_x\frac{\partial^2 c_4}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 c_4}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 c_4}{\partial z^2}-v_x\frac{\partial c_4}{\partial x}+Y_{4/3}\lambda_3 c_3-\lambda_4 c_4$$

和歌山大学と連携して実施

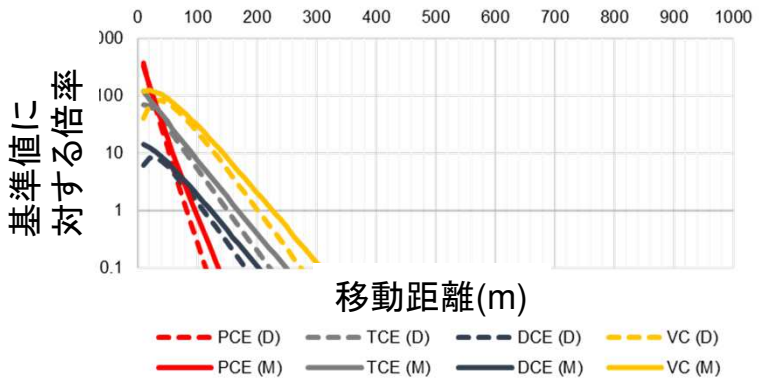
スプレッドシートモデルの開発と妥当性評価

入力パラメータ（表計算ソフト）

●計算に用いた諸数値

項目		記号	単位	数値
場の条件	帯水層厚	H	m	135
	透水係数	k	m/y	10.000
	動水勾配	i	—	0.100
	有効間隙率	n_e	—	0.100
	分配係数	K_d	L/kg	0.000
物性	半減期（物質1）	T_1	y	10.000
	半減期（物質2）	T_2	y	8.000
	半減期（物質3）	T_3	y	15.000
	半減期（物質4）	T_4	y	20.000
	分子量（物質1）	M_1	—	165.9
	分子量（物質2）	M_2	—	131.4
	分子量（物質3）	M_3	—	96.95
	分子量（物質4）	M_4	—	62.498
評価地点	流れ方向（移行距離）	x	m	1000
	垂直方向（水平）	y	m	0
	垂直方向（深さ）	z	m	0
汚染源	汚染源下流端濃度（物質1）	c'_1	mg/L	10.000
	汚染源下流端濃度（物質2）	c'_2	mg/L	1.000
	汚染源下流端濃度（物質3）	c'_3	mg/L	0.100
	汚染源下流端濃度（物質4）	c'_4	mg/L	0.100
	汚染源幅（y方向）	Y	m	10
	汚染源厚（z方向）	Z	m	10

MODFLOWとMT3D（3次元シミュレーション）と開発モデルの整合性を確認



半減期
PCE: 100d
TCE: 300d
DCE: 100d
VC: 100d

- **連鎖分解反応過程を含んだ三次元理論解に基づくスプレッドシートモデルを開発。**
- 専門家でなくても、計算時間５分以内で到達距離や濃度分布が予測可能。
  本年度内に試験配布開始

結果DE：PCE等の分解過程のシミュレーション結果例

サブテーマ(１)(２)で得られたPCE等の吸脱着、分解データの範囲を考慮して、汚染源濃度と到達距離の関係などの評価の精緻化と感度解析を実施。

吸着による影響

■変化させた計算条件
・各物質の吸着係数を0.001～100（L/kg）の6通りで計算
・半減期は7 通りで計算
■サブテーマ1の結果：
・有機炭素の少ない土壌では0.1（L/kg）程度以下である。

吸着平衡定数(L/kg)	最大濃度	到達距離
0.001～0.1	変化せず	変化せず
0.1～10	条件により減少	条件により短縮
10以上	大幅に減少	大幅に短縮

- ◆ 吸着平衡定数が0.001～0.1では最大濃度、到達距離への影響は小さい
- ◆ **サブテーマ1の結果を**考慮すると、帯水層ではVCの吸着性は低く影響は小さいと判断

分解による影響

■変化させた計算条件
・ 各物質の半減期10,100,300,1000,3000dayの5通りで計算
■サブテーマ2の結果：
・ 塩素数が少ないほど、分解速度が遅くなる。

汚染源	VC基準超過割合
PCE基準値（0.01mg/L）	0.16%
TCE基準値（0.03mg/L）	22.4%
DCE基準値（0.04mg/L）	56%

- ◆ **親物質半減期＜ VC半減期**の場合に基準超過が多い。
- ◆ **サブテーマ2の結果を**考慮するとTCE、cis-DCEの場合は、分解生成したVCが基準超過することに要注意

◆ **分解の半減期、吸着平衡定数について他サブテーマで得られたデータを考慮した900ケースで感度解析を実施できた。**

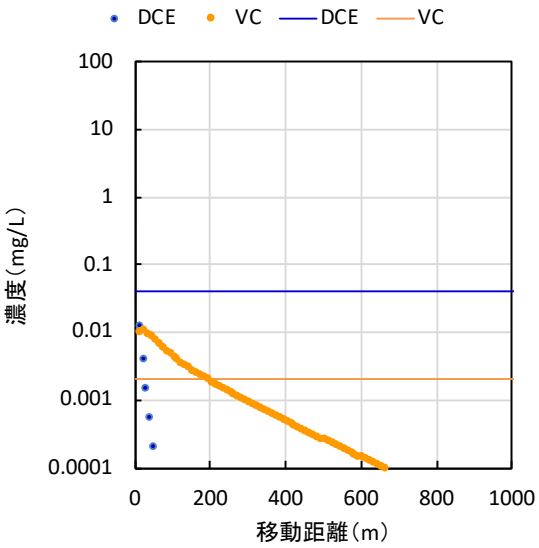
結果D：詳細なDCEの分解過程のシミュレーション結果（感度解析例）

■計算条件
・実流速：15.768m

■変化させた計算条件
・ 各物質の半減期は7通り　　：10,30,100,300,1000,3000,10000 day
・縦分散長は、4通り　　：3,10,30,100 m
・汚染源のDCE濃度は4通り　　：0.01、0.02、0.03、0.04 mg/L

VCの基準超過割合

		DCE濃度（mg/L）			
		0.04	0.03	0.02	0.01
縦分散長（m）	3	77%	-	-	-
	10	72%	64%	54%	33%
	30	59%	46%	36%	15%
	100	33%	-	-	-



・DCE半減期＜ VC半減期の場合に基準超過となりやすい。
・DCE濃度が基準の1/2，1/4程度まで低減すると、
VCの半減期が長くても、基準いかになるケースが増加。

計算結果例：
DCE半減期：100day
VC半減期：3000day
分散長：10 m

結果E：土対法の到達距離モデルとの比較　砂条件

比較条件

- 汚染源　PCE：100mg/L
- 汚染源長さ・深さ：10m×10m
- 帯水層厚：10m
- 土質：砂（透水係数 3×10^{-5}m/s）
- 動水勾配：1/1000
- 有効間隙率：0.3
- 実流速：4.73m/y
- 縦分散長 100m
- 横、鉛直分散長 10m
- 分配係数：0.16 L/kg
- 間隙率：0.4
- 遅延係数：2.08(土対法 1.864)
- 半減期：全て7.9年

サブテーマ(１)(２)で得られたPCE等の吸脱着、分解データの範囲を考慮して、汚染源濃度と到達距離の関係などの評価の精緻化と感度解析を実施。（2年目目標）

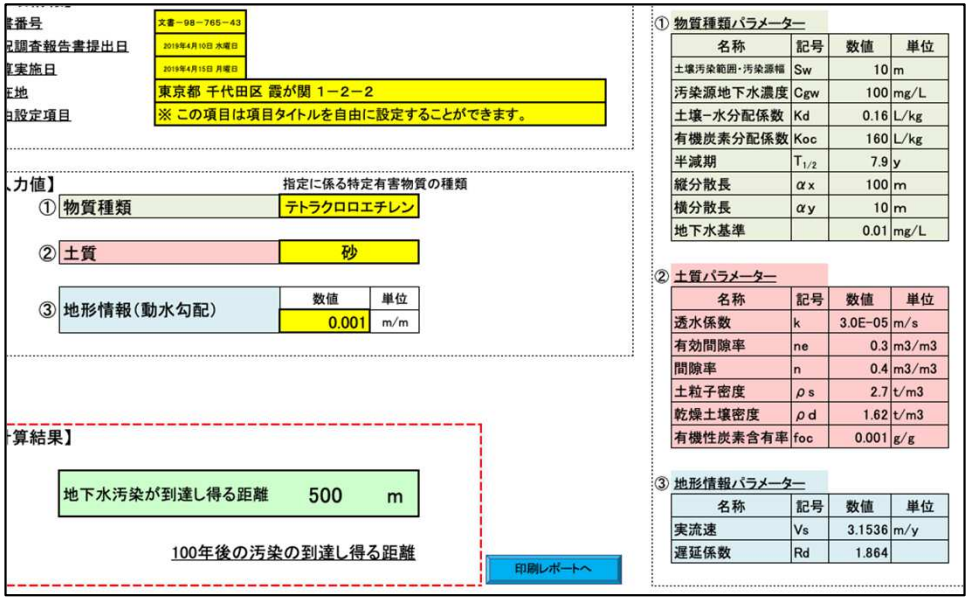
比較結果

	到達距離
土対法	500 m
PCE	460 m
TCE	440 m
DCE	420 m
VC	600 m

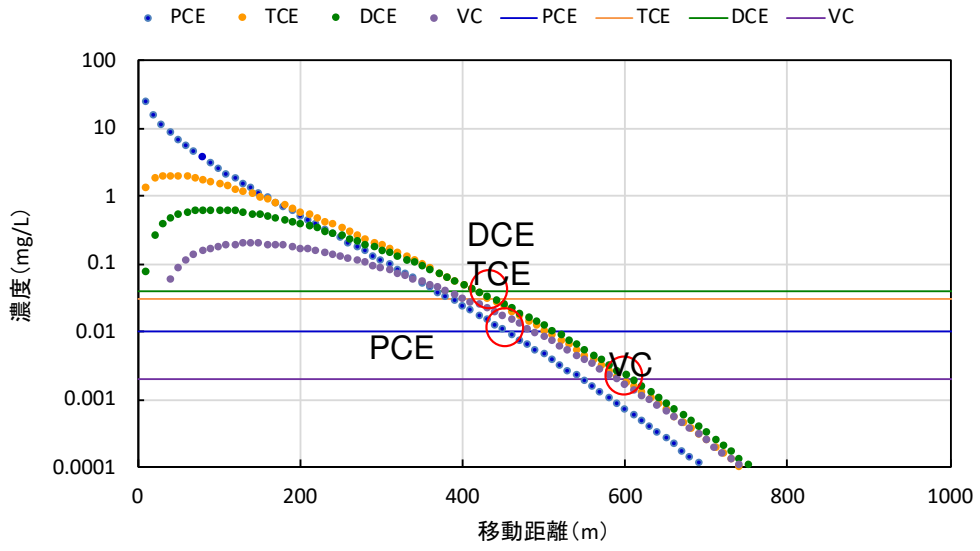
結果

- PCEは、土対法モデルと本評価モデルでほぼ同じ値を示した（切り上げ、切り下げ問題のみと思慮）。
- TCE，DCEの到達距離：
  →PCEとほぼ同等であり、短くなった。
- VCの到達距離：
  →PCEの1.2～1.3倍程度となった。

土対法　到達距離モデルの結果



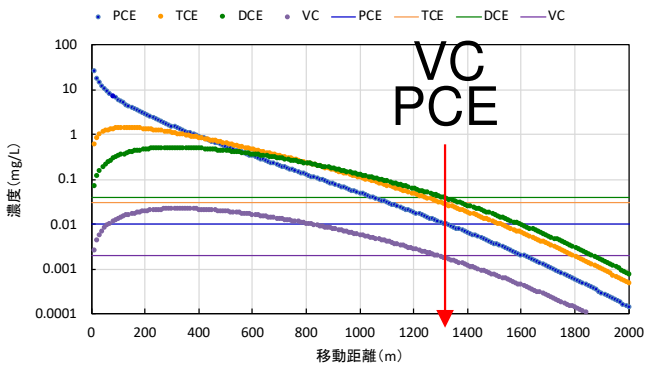
本評価モデルの結果



結果E：VCの半減期が到達距離に与える影響評価1半減期と到達距離

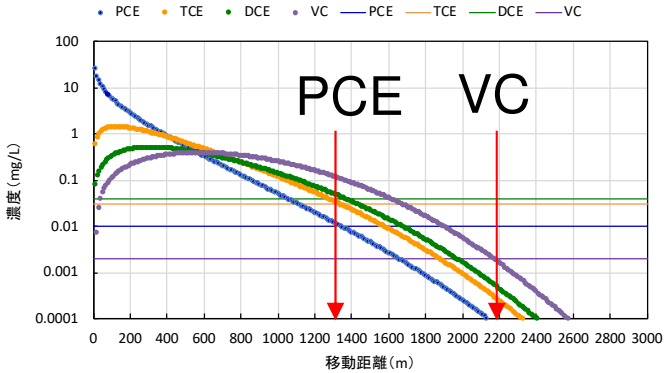
■VCの半減期を変数としたときの到達距離の変化（砂礫：PCE、TCE、DCE：半減期7.9年）

VC：半減期0.53年



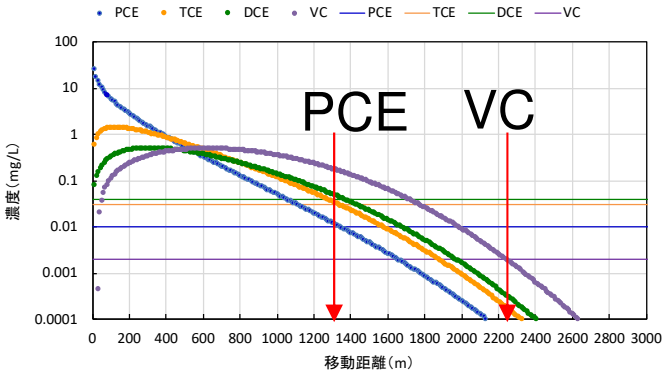
1350m

VC：半減期30年



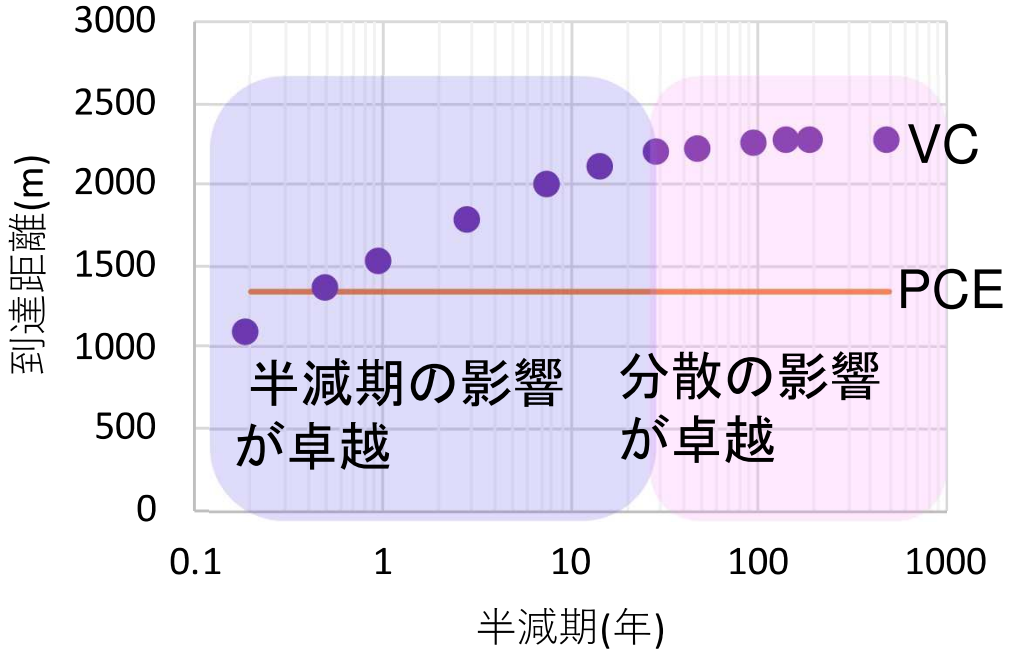
1350m　2180m

VC：半減期200年



1350m　2260m

■到達距離に対する、VCの半減期と分散の影響

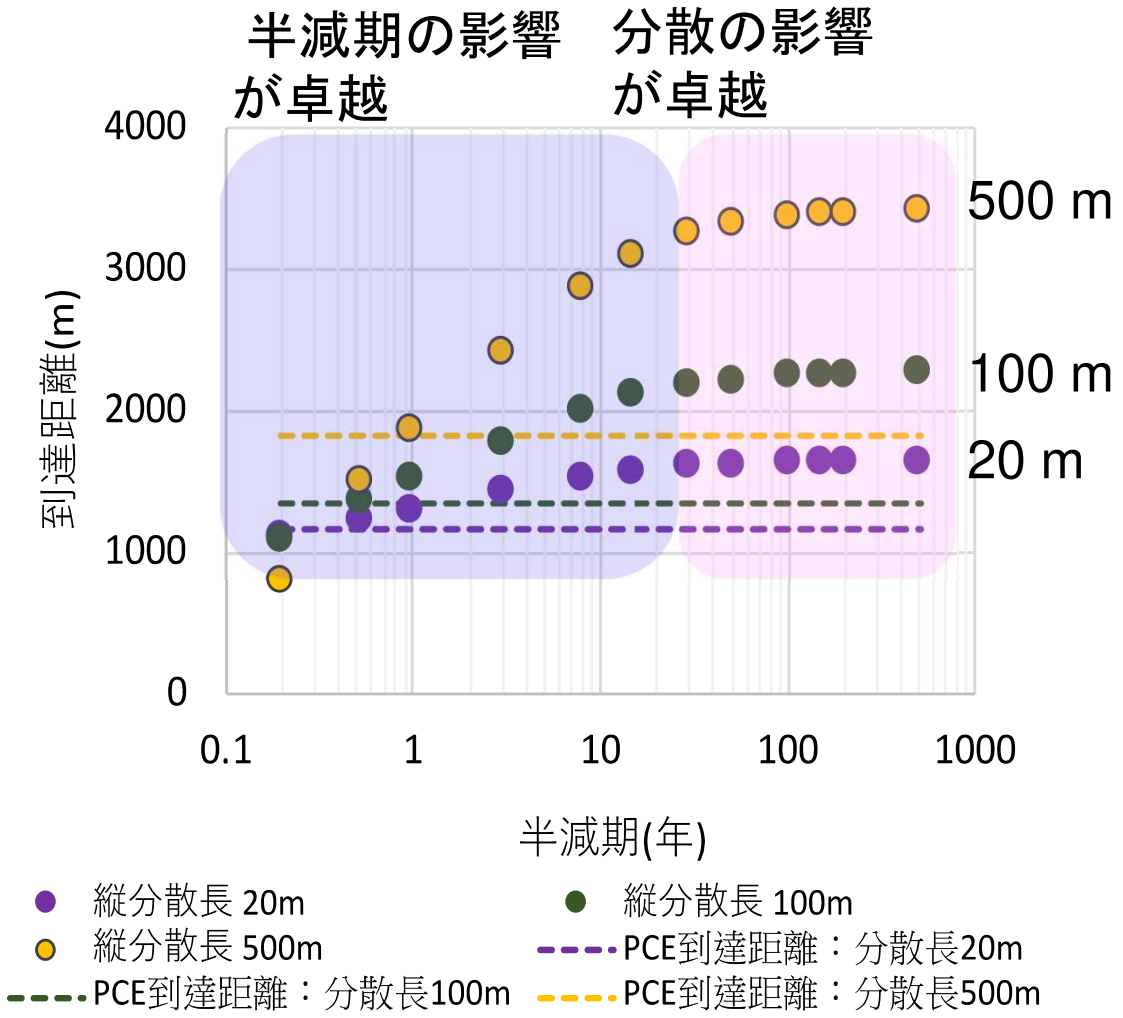


- 到達距離は、本評価の条件では、半減期が30年までは半減期の影響が、半減期が30年以上だと分散の影響が卓越する。
- そのため半減期が30年以上の場合には到達距離はほぼ一定になる。
- 本条件では、VCの到達距離は、半減期が30年以上では、約1.7倍となる。

結果E:VCの半減期が到達距離に与える影響評価　分散長の影響

■到達距離に対する分散の影響

実流速15.768m/year
半減期：PCE、TCE、DCE： 7.9年
半減期：VC：変数
縦分散長：変数：20m、100m、500m
横・深さ分散長：縦分散長の1/10



結果
・分散長が20m～500m変化した場合、VC到達距離は2.5倍程度差が出るが、「半減期の影響範囲」と「分散の影響範囲は大きく異ならない。
・半減期が30年以上のケースにおいて、「VC到達距離／ PCE到達距離」は分散長大きいほど大きくなるが、その倍率は1.4倍（分散長）～1.9倍の間であった。

■全体結論
・VCの分解が非常に遅いケースにおいても、分散効果が卓越することで、VCの到達距離はPCEの到達距離の1.4～2倍程度となることが確認された。

結果F:VC地下水汚染への土壌ガス調査の適用可能性:解析条件

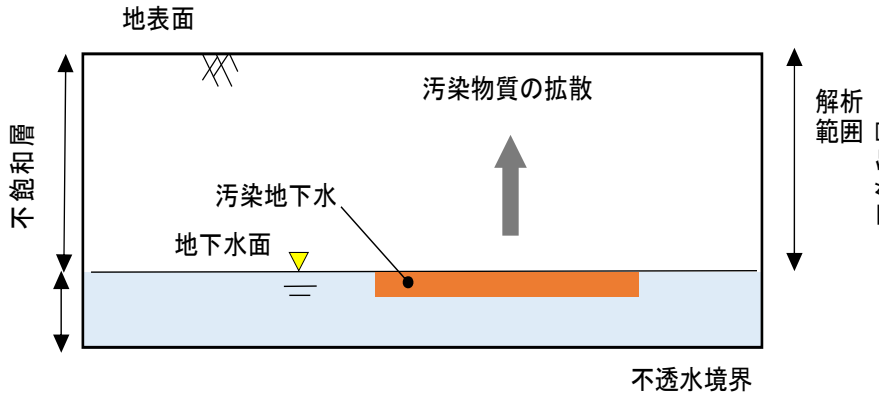


図:解析の概念モデル

- VC地下水汚染への土壌ガス調査の適用可能性を評価するため、シミュレーションを実施(概念モデルを左に示す)。
- 土壌中の物質移動は、一般的な1次元の移流拡散方程式により、汎用モデルであるHYDRUS-1Dを用いて実施。
- 解析の妥当性は、サブテーマ(1)の室内試験、サブテーマ(4)の現場調査の結果より確認。

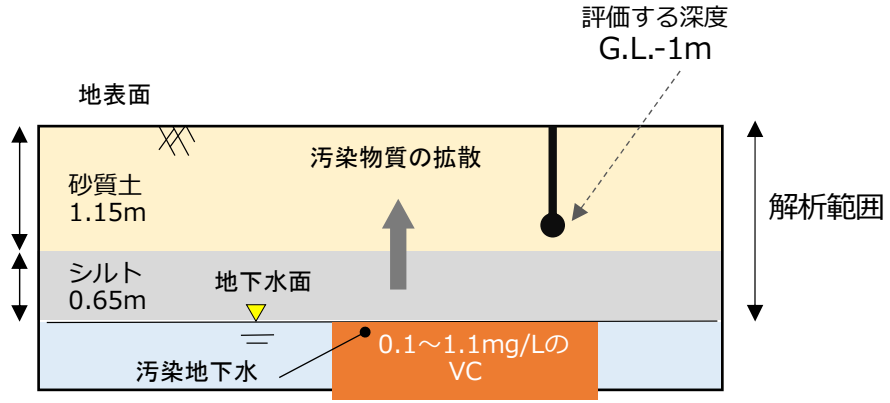


図:現場状況の概念モデル

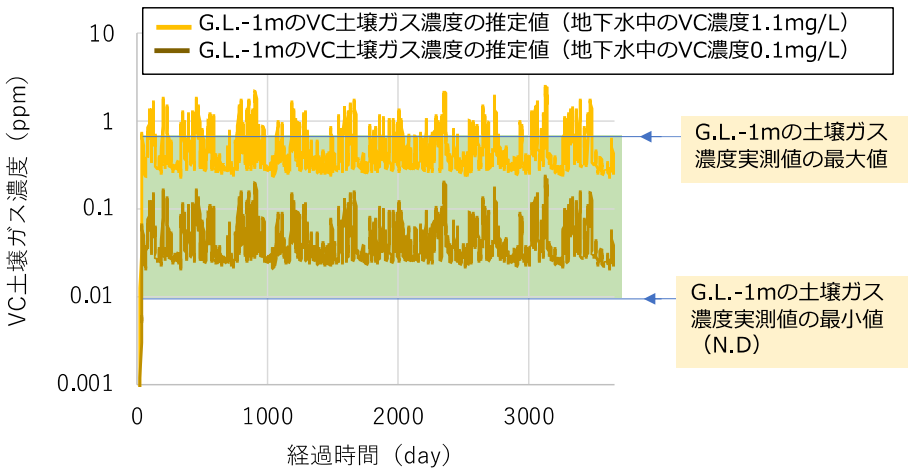


図:現で観測された土壌ガスの最小・最大値と推定値

結果F:VC地下水汚染への土壌ガス調査の適用可能性：解析条件

150ケースでHYDRUSを用いて計算を実施、

■基本パラメータ

・深度：2、4、6、8、10m

・汚染物質濃度：1 mg/L、0.002 mg/L

・土質パラメータ：

Sand、Loam，Silt，Clay、Loam2

乾燥密度、Kdを変更

・初期含水率：h=-100cmの初期含水率。

■境界条件

・水分上部境界条件：３ケース

①名古屋10年分の非定常降雨＋蒸発散

②名古屋10年分の非定常降雨

③降雨なし

・水分の下部境界条件：地下水面

・溶質の上部境界条件：濃度ゼロ境界

・溶質の下端境界条件：濃度一定

・解析期間：20年間

■物質移動

・Henry定数：1.11

・分子拡散係数：液相：DW　0.1063　cm2/日

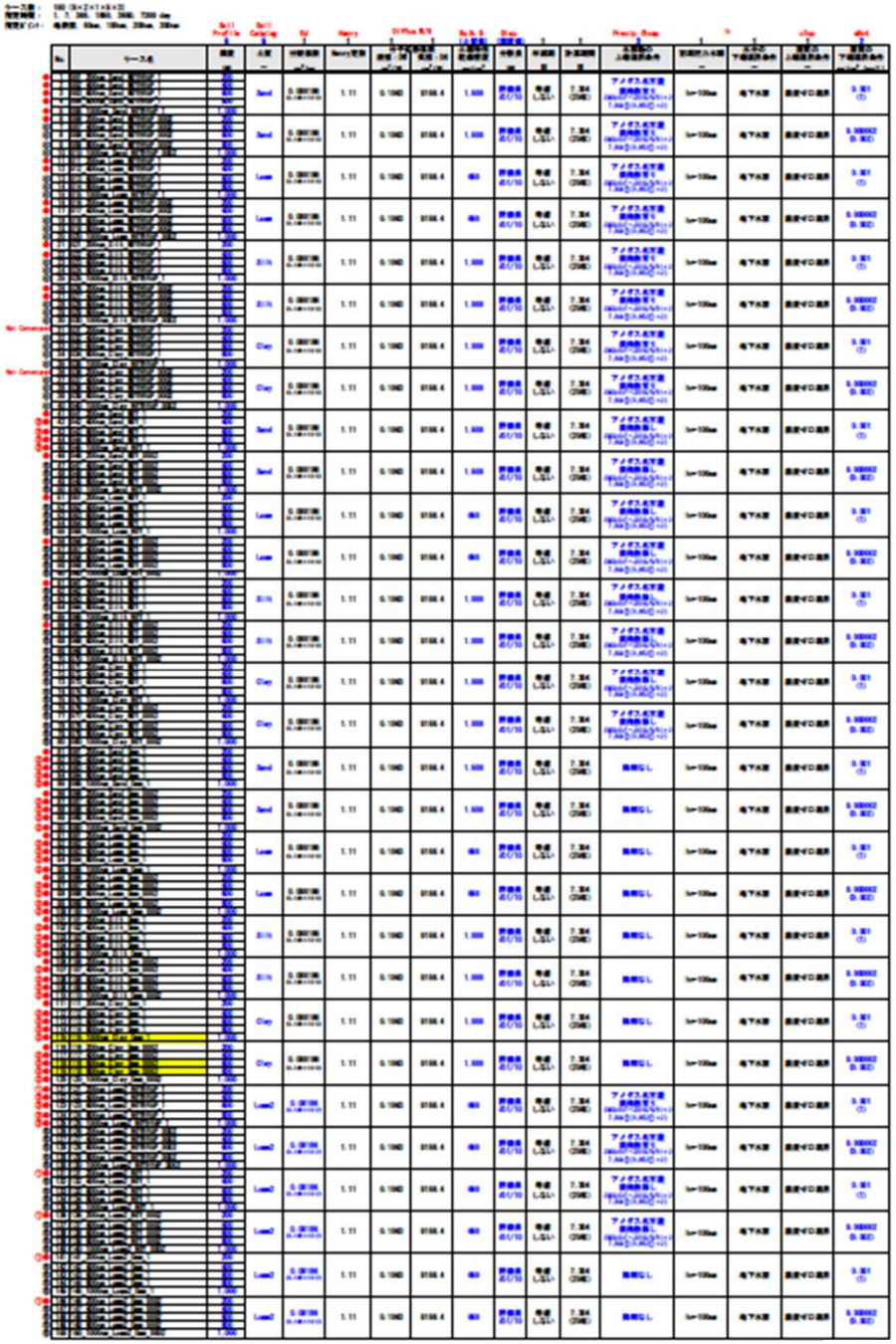
気相：DG　9158.4　cm2/日

・分配係数：0.000186（0.186×10^{-3}) cm3/mg

（有機物:1%）：Koc=0.0186 cm^3/mg

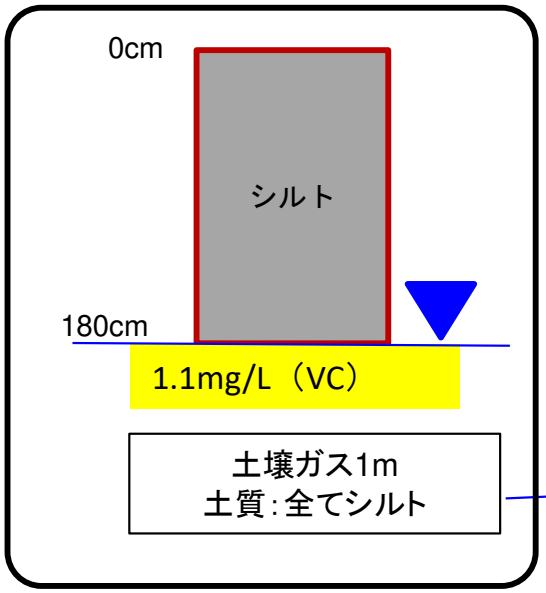
Loam2のみ10倍

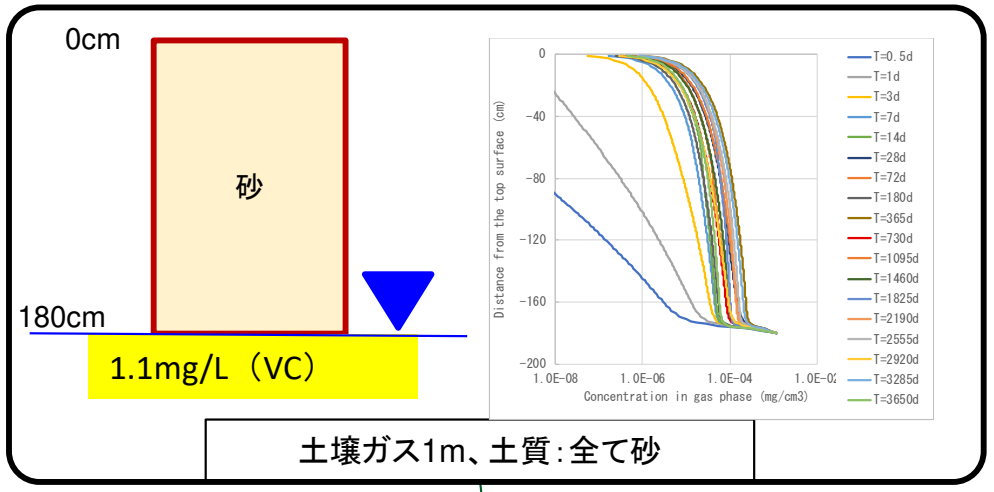
感度解析条件

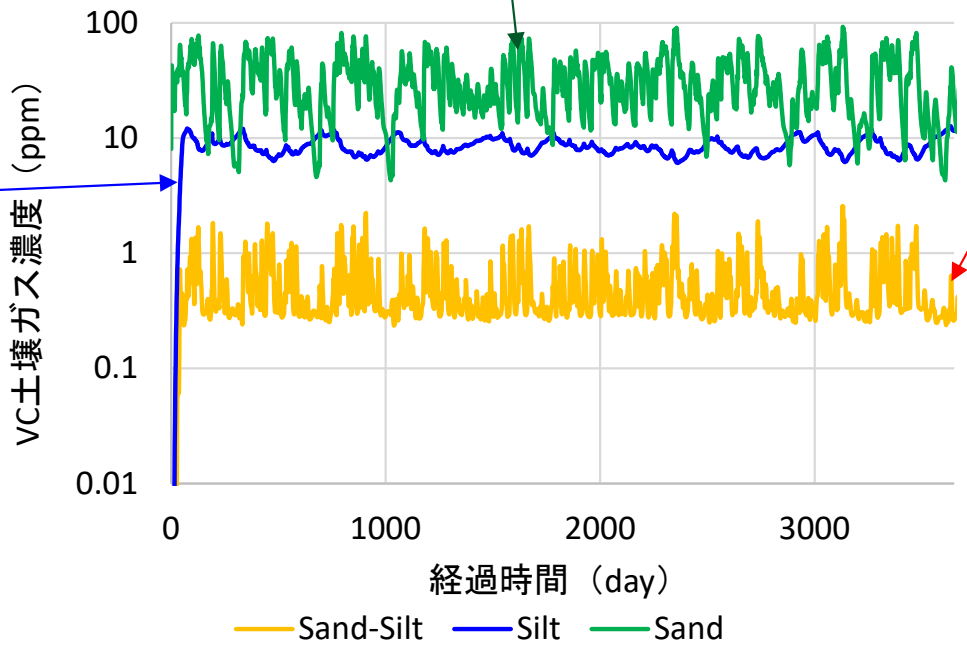


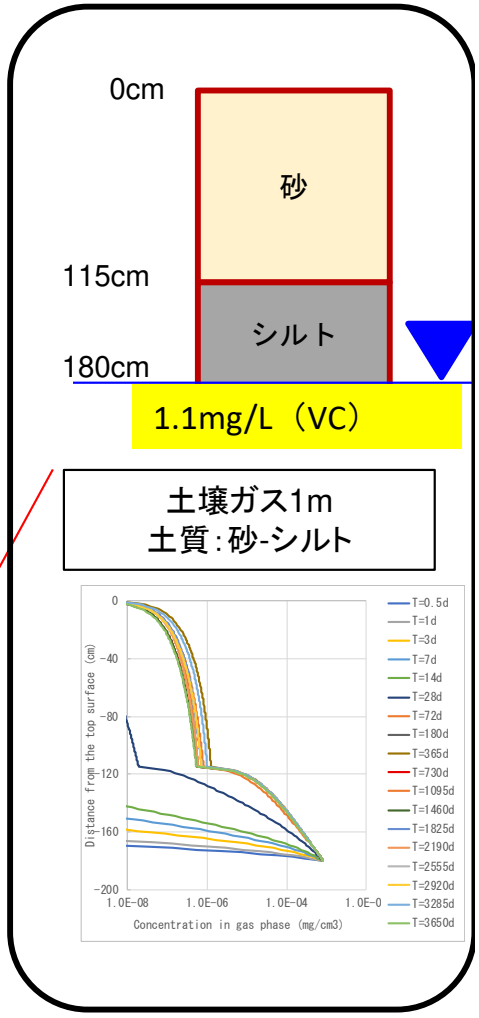
結果F: VC地下水汚染への土壌ガス調査の適用可能性:結果例

実現場データの
土質を変えた結果





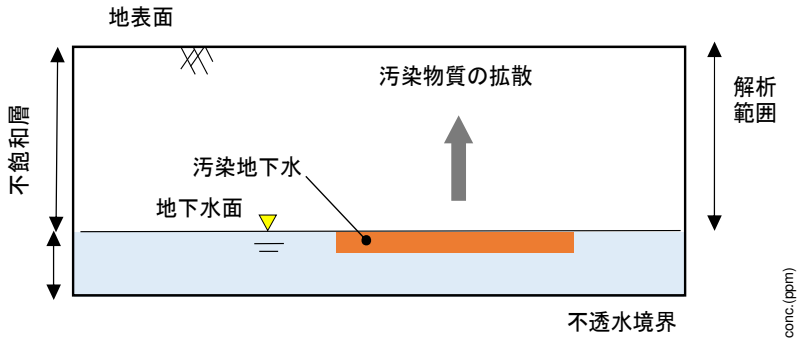




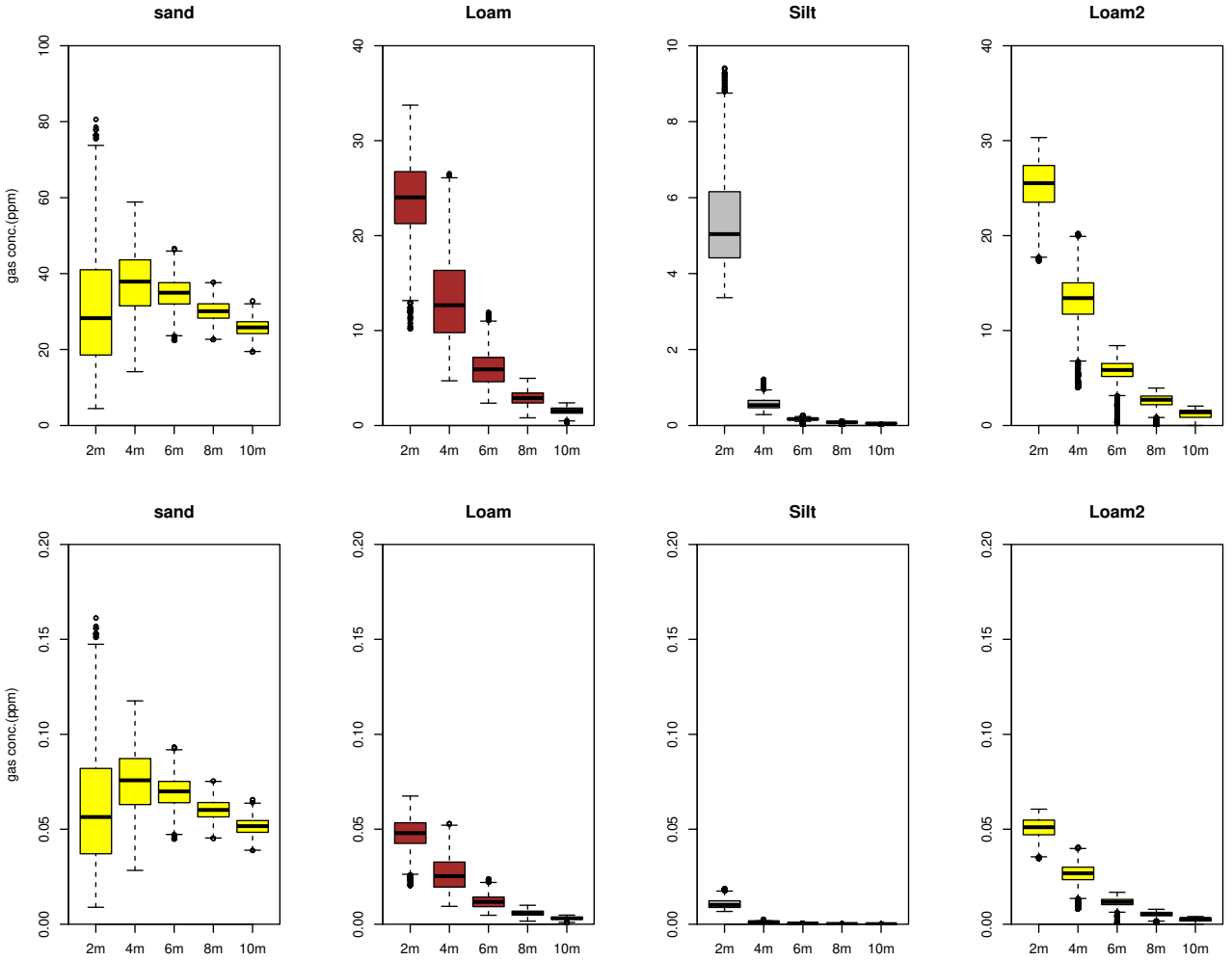
・砂層、シルト層のケースでは、砂-シルトの地層よりもガス濃度は10倍～100倍、高く検出された。
・これらの結果は、地下水面直上に2つ以上の種類の土壌が地下水面から地表面までの間に存在することで、土壌ガス調査でのVCの地下水汚染の把握は難しいことを示している。
・地下水中（土壌間隙水中）にVCが存在していた場合の土壌ガス調査での検出可能性を評価した。
一定条件（例えば土質が砂層のみ）であれば土壌ガス調査で検出は可能であるが、検出が難しいケース（地下水低濃度、土質条件）が多数あることから、適用は難しいことが示唆された。

結果F: VC地下水汚染への土壌ガス調査の適用可能性：結果例

地下水中のVC濃度が1mg/L



地下水中のVC濃度が0.002mg/L



不飽和層厚

- 地下水中のVC濃度が1mg/Lの場合に想定される土壌ガス濃度の中央値は、砂質土30-40 ppmと計算され、ロームは1.5～24 ppmと低くなり、シルトの土壌ガス濃度は0.05から5 ppmとロームよりも低い。
- 地下水中のVC濃度が0.002 mg/L（基準値）の場合では、砂質土、ローム、シルト、いずれの土質でも中央値が土壌ガス調査における一般的な定量下限値である0.1 ppmよりも小さい値となった。
- これらの結果から、地下水中に存在するVCは、高濃度であれば検出可能であるが、基準値レベルのVCを土壌ガス調査で把握することは難しいことが示唆された。基準値レベルの地下水中のVCを評価するためには、より高感度な土壌ガスの捕集・測定方法（引用）の適用を検討する必要がある。

まとめ　サブテーマ3：多次元シミュレーションに基づく土壌・地下水中の挙動の予測解析に関する研究

主な研究成果と結論

- **帯水層と不飽和層での挙動予測について、分解と吸脱着、不飽和層への揮発等の挙動を土壌／水／ガスの3相を考慮して予測評価、解析できるようにする**

1-①帯水層の挙動予測：

A：土壌／水の2相を考慮しMODFLOW-MT3Dを用いて3次元、2次元シミュレーションを実施。

B：DOMENICOモデルを改良し、PCE等の分解生成物を含めた効率的に予測計算できるスプレッドシート形式のモデルを開発。試験配布中。（次期の土対法改正にて活用可能）

1-②不飽和層の土壌ガスの挙動予測

C：HYDRUS-1Dを用いて帯水層中のVCの不飽和帯～地表への移動について、土壌／水／ガスの3相を考慮した1次元シミュレーション、2次元シミュレーションを実施。
（サブテーマ1の実験データや、実現場サイトのデータを用いた評価のバリデーションを実施）

- **サブテーマ1，2で収集・整理・実測したパラメータを用いた感度解析等を行うとともに、汚染の到達範囲の評価方法や適切なモニタリングの手法や位置等について検討する**

2-①帯水層の挙動予測：

D：開発したモデルで基準値程度のPCE，TCE，DCEが残留した場合の「VCが基準を超えるリスク」を評価。DCEのリスクが高いことが確認された。

E：開発したモデルで分解生成物を考慮した場合の汚染の到達範囲の感度解析を実施。
分解生成物を考慮しても到達距離は2倍程度に収まる可能性が高いことが示された。

2-②不飽和層の土壌ガスの挙動予測

F：土壌および地下水中にVCが存在した場合の「土壌ガス調査」での検出可能性を評価した。
一定条件（例えば土質が砂層のみ）であれば、地下水中の土壌ガス調査で検出は可能であるが、検出が難しいケース（地下水低濃度、土質条件）が多数あることから、適用は限定されることが示唆された。　※サブテーマ4の知見とも整合

まとめ　サブテーマ3：多次元シミュレーションに基づく土壌・地下水中の挙動の予測解析に関する研究

環境行政への提言

1．塩化ビニルモノマー汚染された「浄化済みサイト」への対処

VC（基準の数倍～100倍）は長期残存する恐れ。自然減衰は困難なことも多く、分解菌の有無により浄化可能性が大きく変わる。VCが検出された「浄化済みサイト」では、VCのモニタリング（半年に１回程度）を義務つける等が必要と考えられる。

2．土壌・地下水汚染判定の方法

表層土壌ガス調査で、VCの土壌・地下水汚染が無いことの判断は困難。
汚染サイトの状況（地表の被覆や帯水層上の粘土層の有無、VCの濃度）によって判定手法を変える必要があると考えられる。既に井戸が設置されている浄化済みサイトでは地下水濃度での判定が確実と考えられる。

サブテーマ4：実現場における汚染状況調査と挙動予測の検証および原位置浄化手法の評価に関する研究

細見　正明、利谷　翔平（東京農工大学）

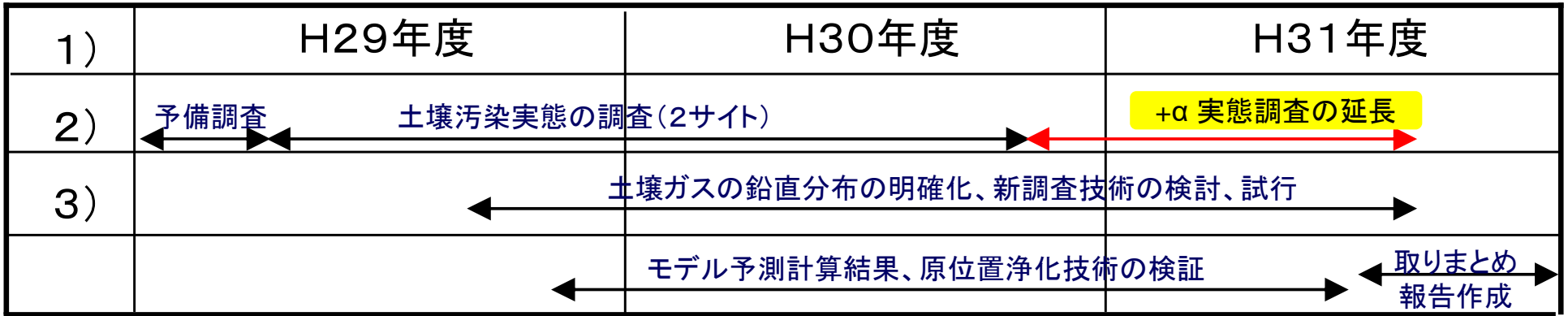
研究ポイント：新規汚染物質VCの汚染実態の解明、新調査技術、浄化技術検証

最終目標

・浄化済サイトでクロロエチレンによる汚染実態や帯水層中での移送特性、帯水層と不飽和層との間での物質移動の状況などの現地調査
・特にクロロエチレンの土壌ガス濃度の鉛直分布の把握　（新調査技術）
・サブテーマ3と連携して、実現場での調査結果を用いた計算結果の検証等
→　原位置浄化手法によるクロロエチレンの浄化効果の評価

年度計画

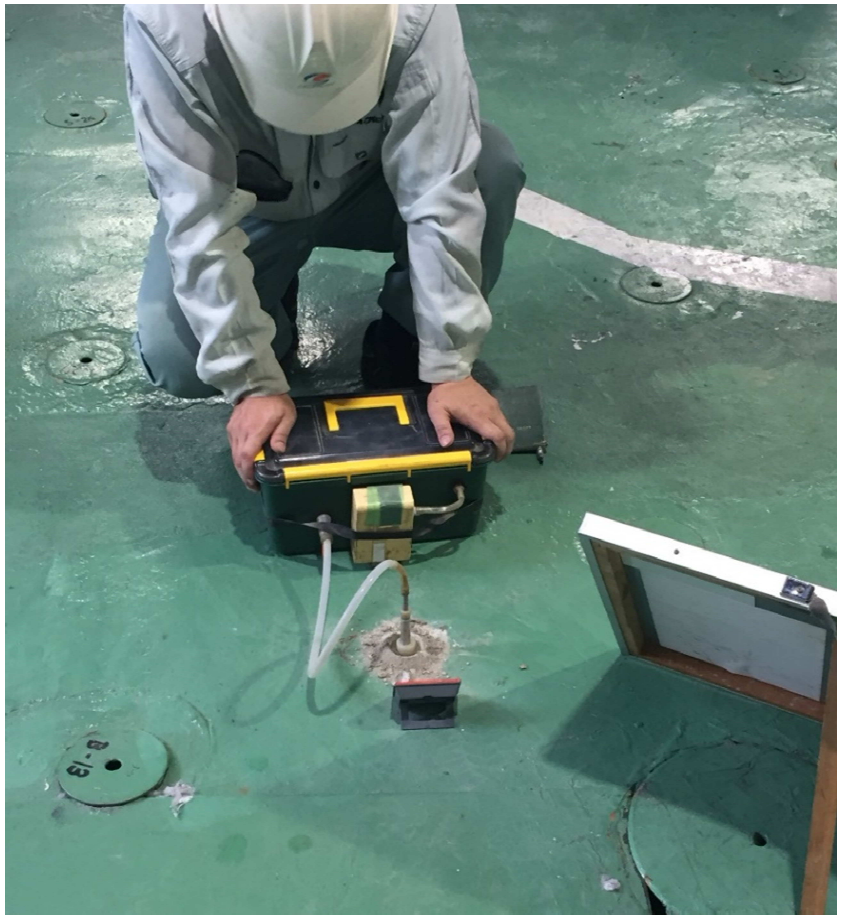
1）VCの土壌汚染実態の現場調査（H29-30）
　深さ方向の土壌ガス濃度分布、地下水中挙動の把握　　+α：*trans*-DCEの実態も調査
　調査サイト　2箇所を選定
　（バイオレメディエーション後、2年間モニタリング中である）
2）土壌ガス濃度の鉛直分布の把握（H29-31）　プローブ法、MIP法
3）モデル予測計算結果と原位置浄化対策の検証（H30-31）　+α：複合汚染サイトの浄化



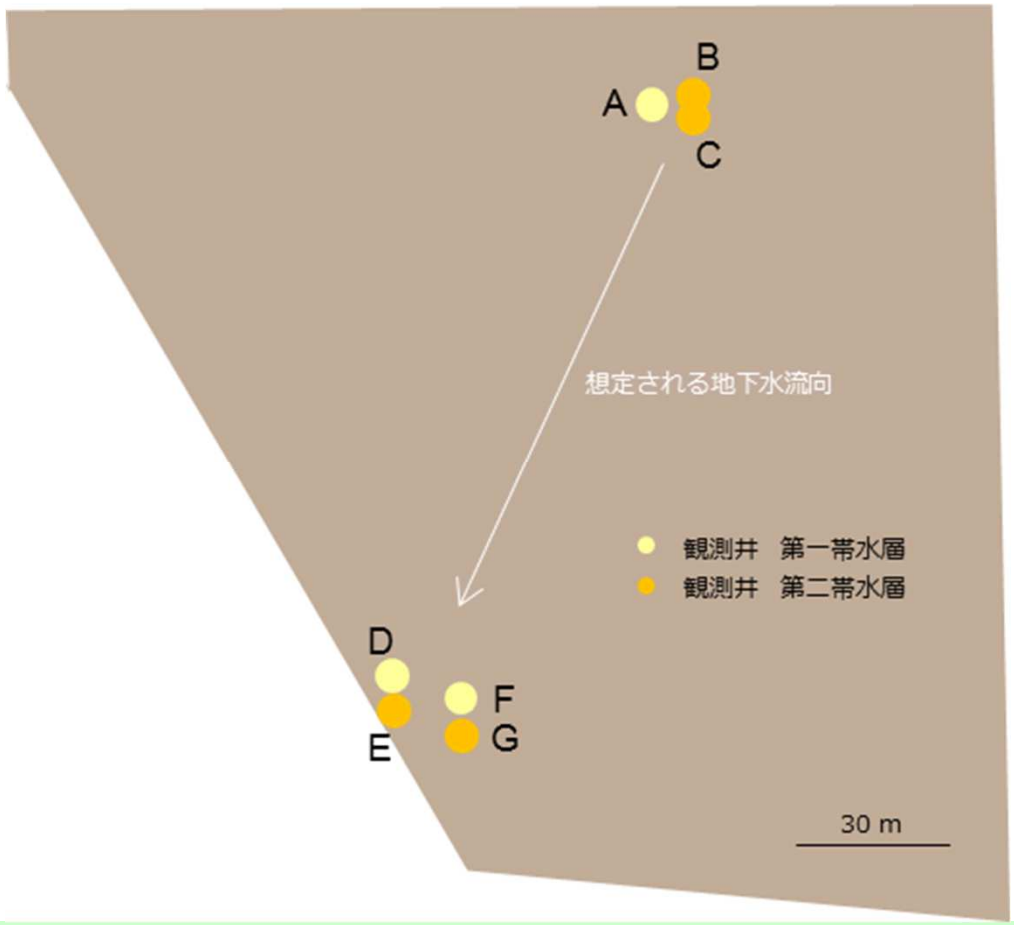
汚染調査サイト

VOC汚染は浄化されておらず、
小規模のバイオレメディエーション試験が実施された経歴があるサイト

地下水高濃度汚染サイト
（関東地域, 工場敷地内, 40 m^2）



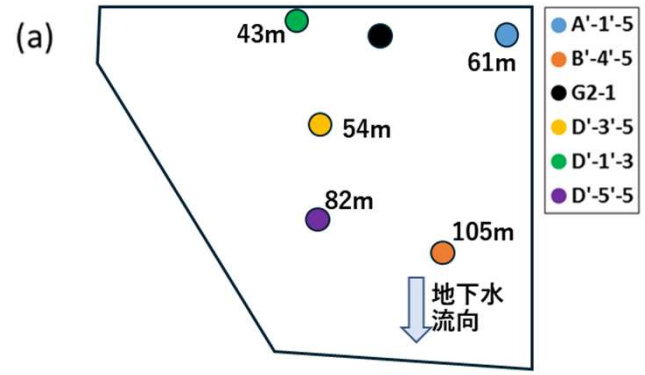
地下水低濃度汚染サイト
（中部地域, 工場跡地A, 150 m×150 m）

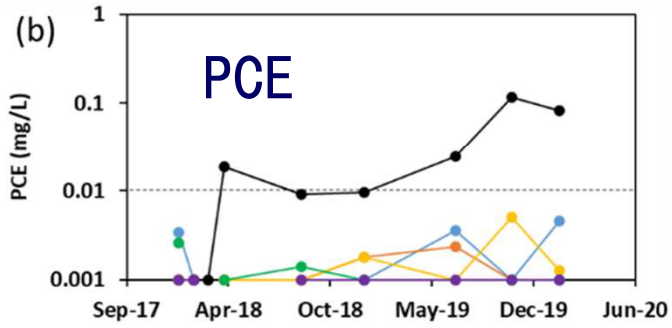


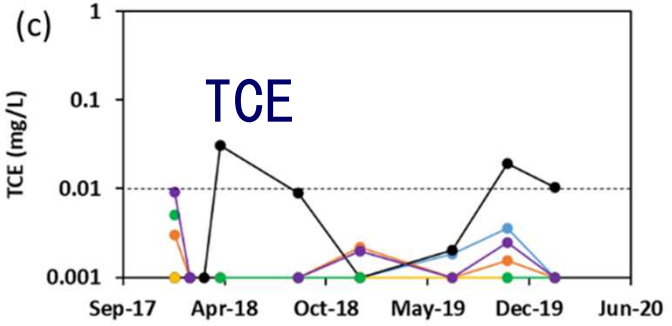
◆ 調査サイト検討、土対法手続きや契約に時間を要したが、適切な調査サイトを選定できた。
（VC生成の可能性（cis-DCE検出）、水平方向に多数測定可能、土地所有者の理解など）

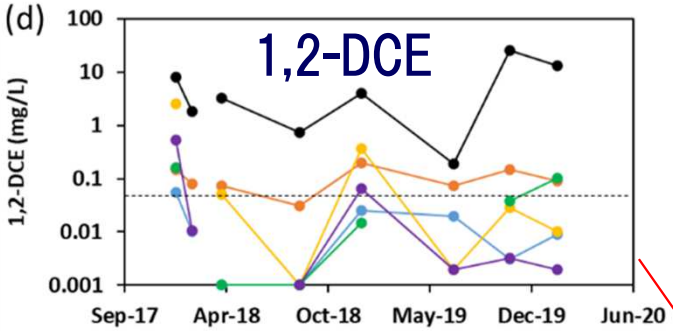
+α H30年度に更にもう1サイト追加予定（大阪）

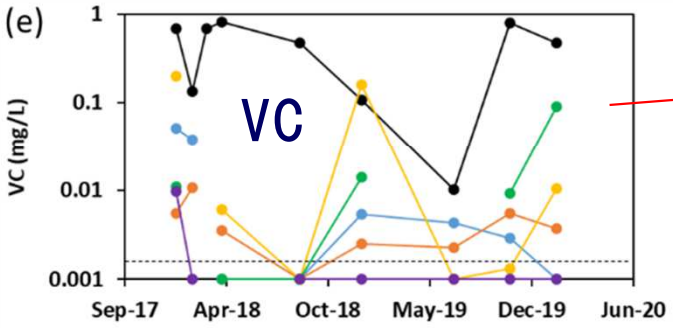
地下水(第一帯水層)の汚染物質濃度の経時変化

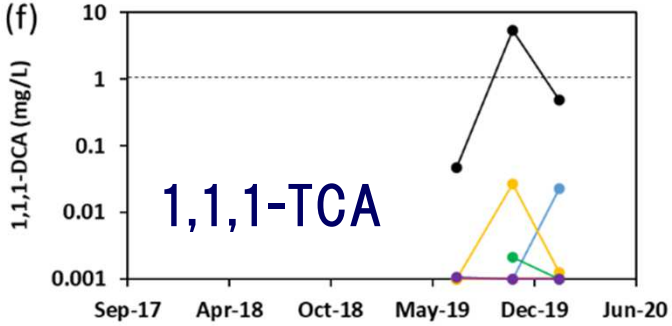






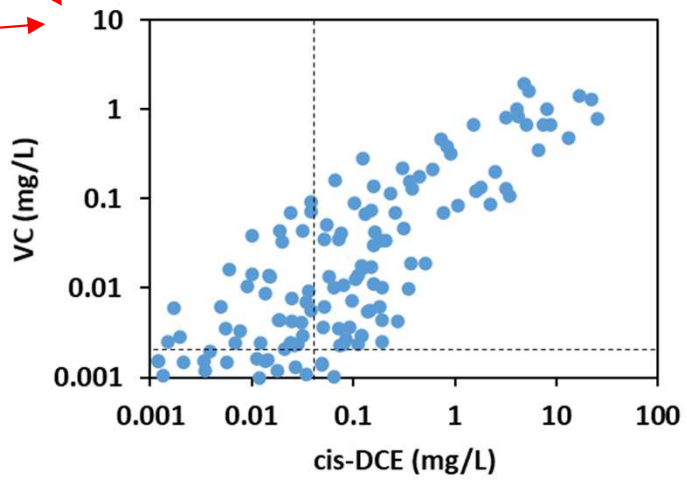






+α 1,2-DCE中
trans体は1%以下

47井戸のcis-DCEと
VC濃度の関係

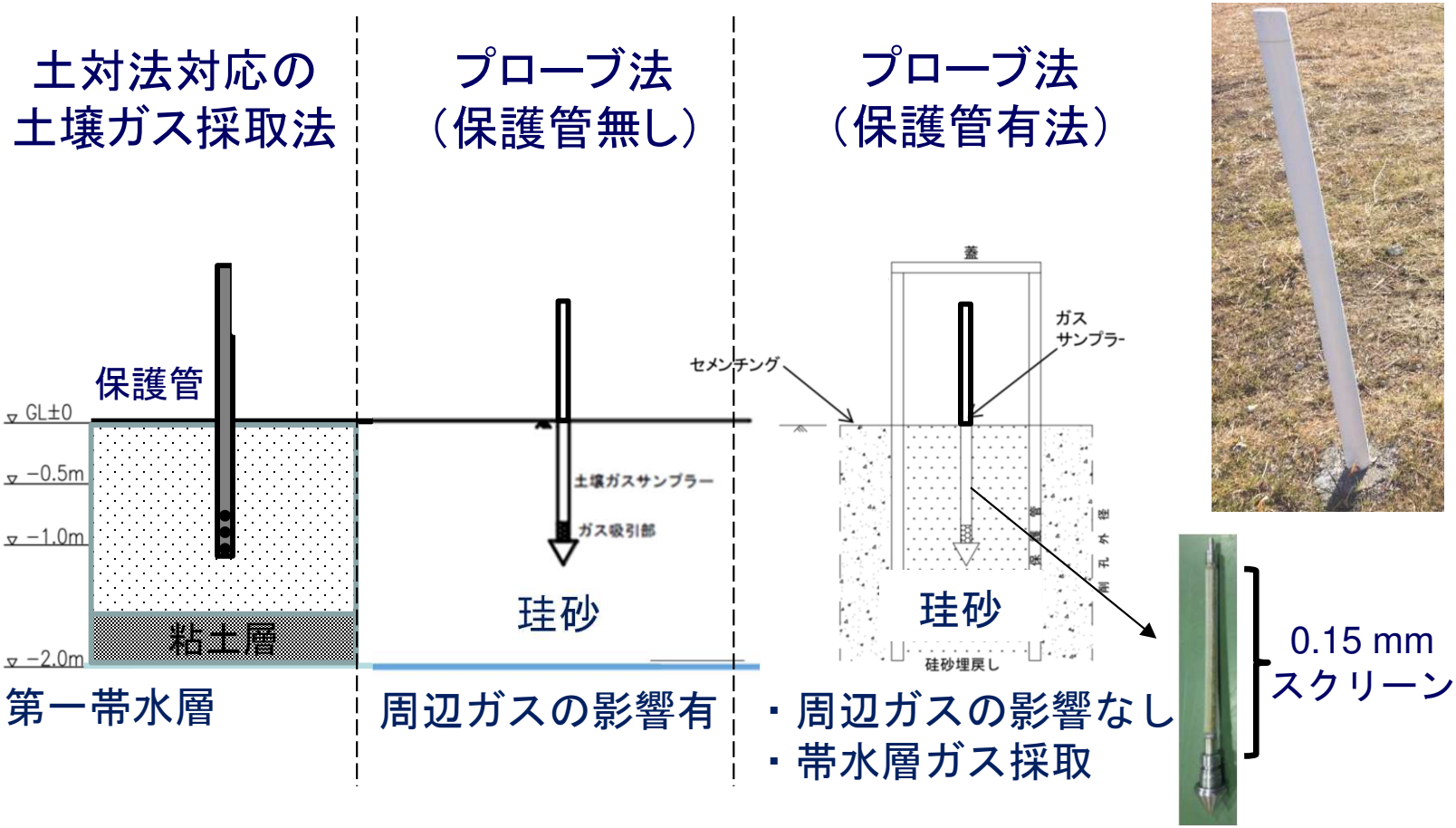


G2-Iでは、2019年7月から浄化試験を実施

◆ VCは、自然減衰・増加。第一帯水層47本の井戸中15本(32%)で基準超過(2020年1月)
◆ cis-DCEが蓄積している井戸でVCも蓄積。cis-DCEが基準値未満の井戸でもVCは超過

→ 2年間でVCおよびDCEは2本の井戸で自然減衰により環境基準値を下回ったが、
多くの井戸で基準超過 (VOC分解菌の不在井戸あり(サブテーマ2))

土対法およびプローブ法によるガス調査の検討（低濃度汚染サイト）



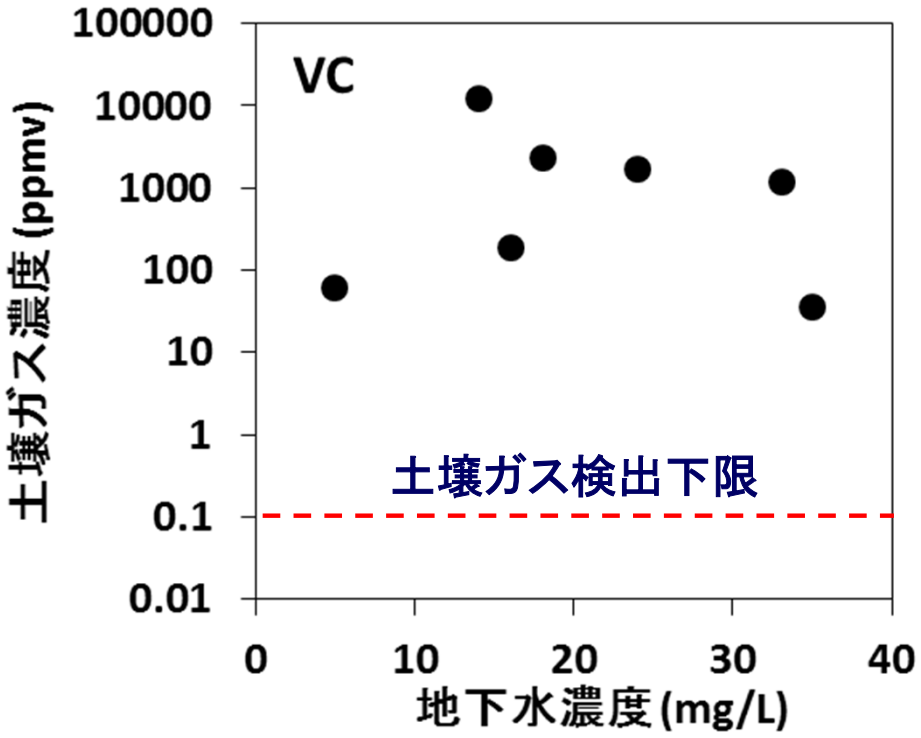
◆ 土対法のガス採取法：地下水面直上の土質がガス拡散に影響

◆ プローブ法：地下水面上の土壌を砂で入れ替えているためガス拡散容易

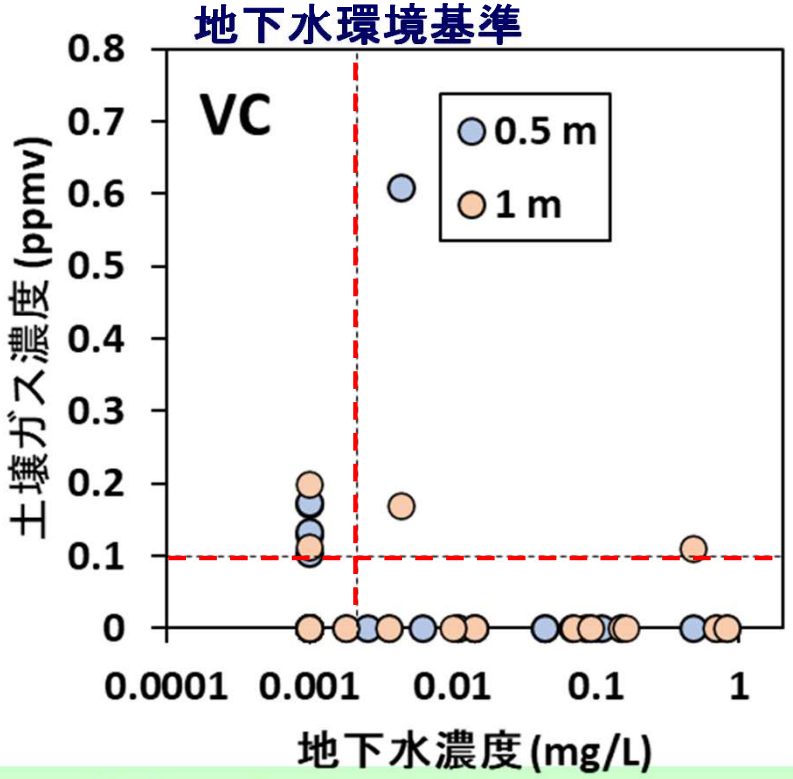
→プローブ法により汚染状況を反映した土壌ガス濃度が検出できるか検証

土対法表層土壌ガス調査による地下水（第一帯水層）汚染の判定

地下水高濃度汚染サイト
（関東地域, 工場敷地内, 40 m²）



地下水低濃度汚染サイト
（中部地域,工場跡地A,土壌ガス0.5および1.0 m）



◆ 高濃度汚染サイト（コンクリ敷設）

地下水濃度と土壌ガス濃度に相関関係は認められなかったものの、地下水環境基準超過したすべて地点で土壌ガスが検出

コンクリで大気への拡散・大気の混入が抑制され、高濃度検出された可能性

◆ 低濃度汚染サイト（裸地）

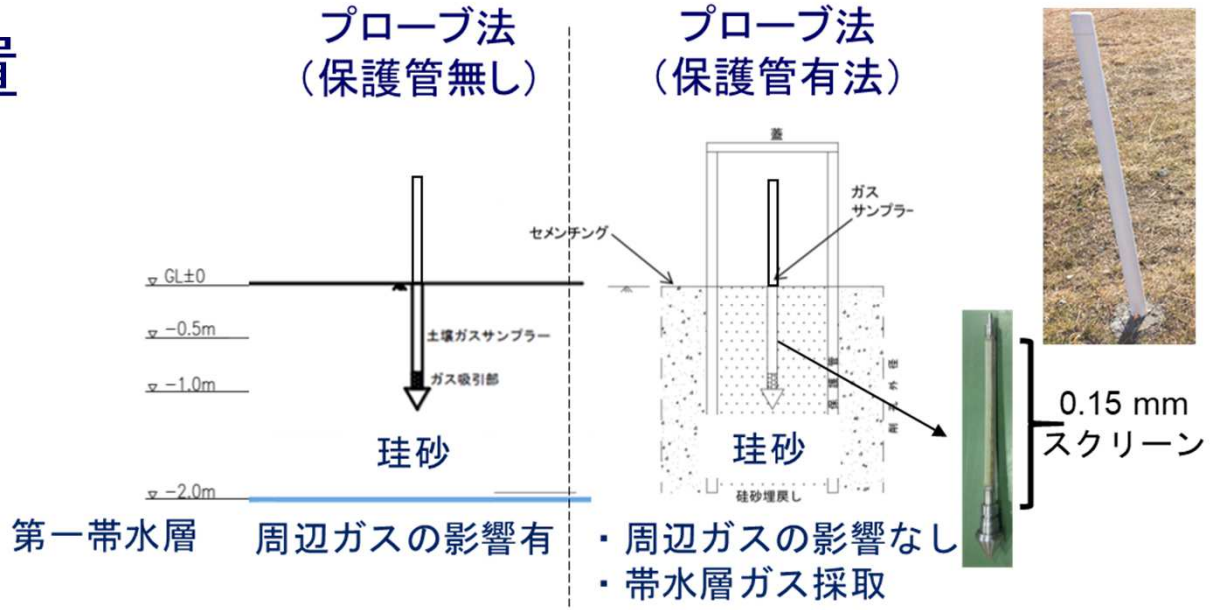
基準超過井戸の大部分で土壌ガス未検出

土壌ガス採取深度	0.5 m	1 m
調査井戸数	36	28
環境基準超過件数	17	15
基準超過かつ土壌ガス検出	1	2
汚染検出率（%）	6	13

→ 低濃度汚染サイトでは土壌ガス濃度からの地下水のVC汚染の判定は困難

プローブ法土壌ガス調査によるVC汚染地下水検出（低濃度サイト）

○プローブ設置



○調査結果

		n	地下水VC濃度範囲（mg/L）（nのうち地下水環境基準超過数）	土壌ガスVC検出数
保護管有	0.5 m	7	0-0.069 (6)	0
	1 m	9	0-0.085 (6)	0
保護管なし	0.5 m	20	0-0.085 (10)	0
	1 m	22	0-0.085 (6)	0

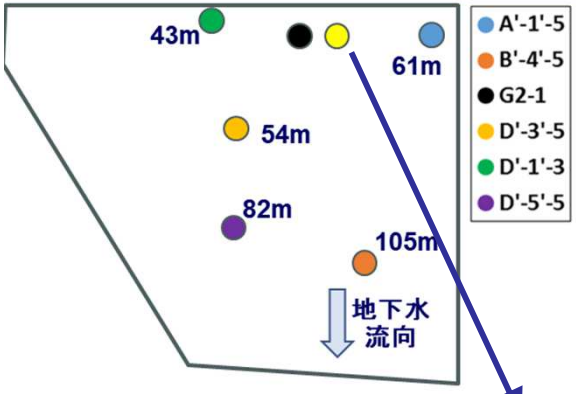
調査井戸：A'-1'-5、B'-4'-5、D'-5'-5、E'-4'-5、D'-1'-3、D'-3'-5、E'-1'-8

調査期間：2018年2月～2019年3月

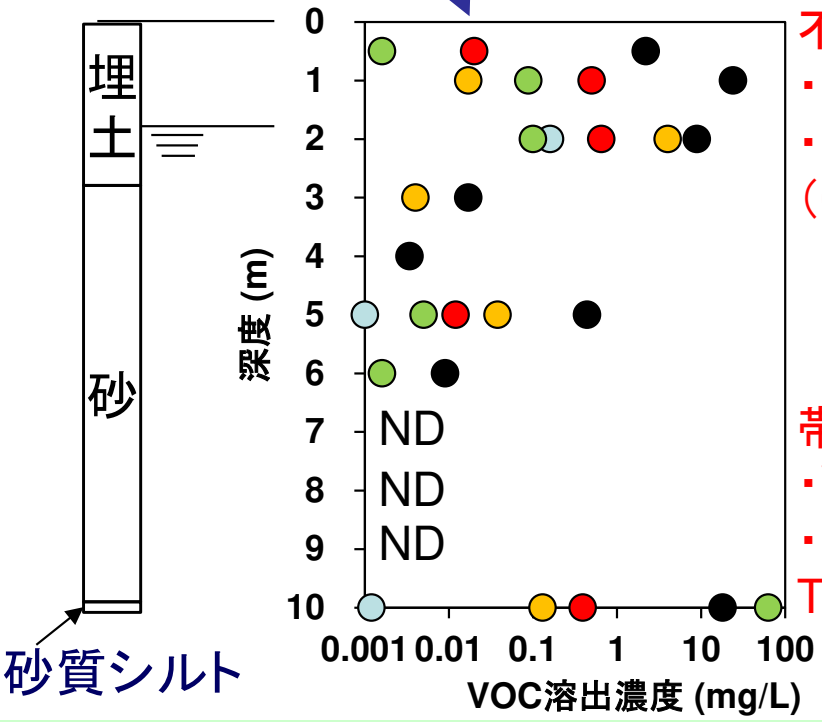
- **プローブ法：地下水環境基準を超過した点においても土壌ガスは未検出。**
- **地下水濃度とプローブ周囲の砂層中のVOC濃度が平衡に達していない可能性**
- **直接地下水を採取した方が汚染の発見には効果的**

→プローブ法の有用性は確認できなかった

バイオレメディエーションによる浄化 -位置・対象深度の選定



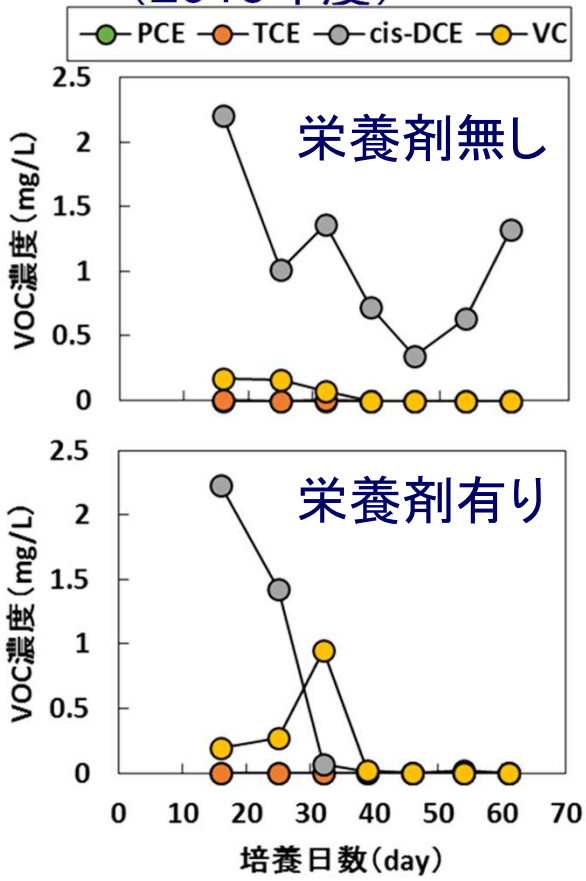
VOC汚染源と考えられている場所
（G2-I地点）



不飽和層
・溶出量基準超過のVC
・土壌ガス調査でもVC検出
(0.8 ppm@1 m)

帯水層
・VC汚染はない。
・高濃度PCEおよび111-TCA複合汚染

バイオレメディエーション室内試験
（2018年度）



バイオレメディエーションにより
完全浄化可能

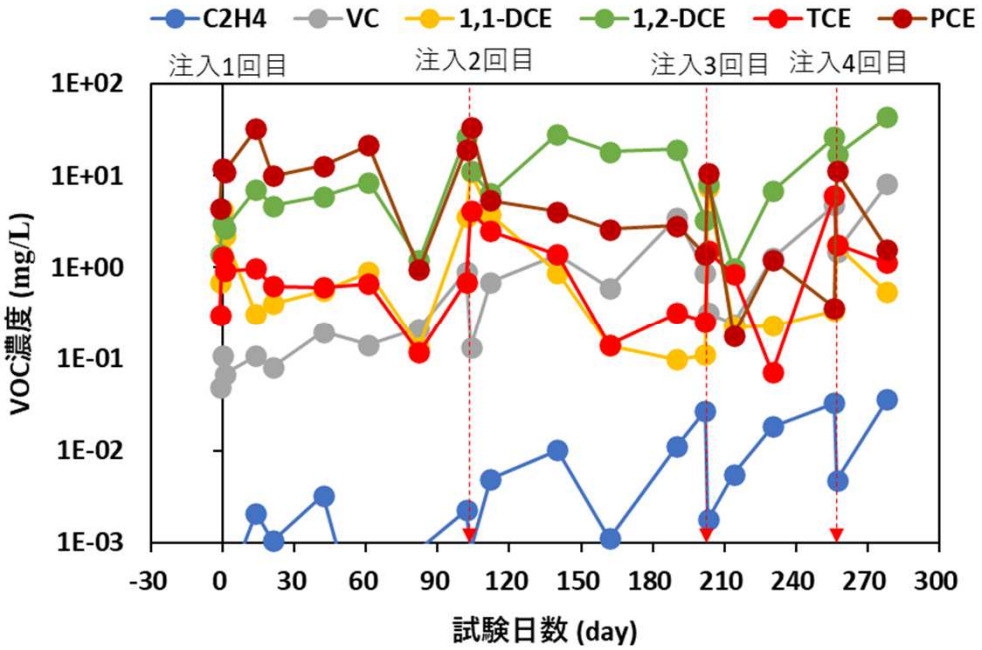
◆ 表層不飽和層(0-2 m)および帯水層(10 m)に高濃度PCEおよび1,1,1-TCA複合汚染
（後に、表層は原液による汚染の可能性が判明）

◆ 本研究では、帯水層をバイオレメディエーションにより浄化(不飽和層の汚染を巻き込まないように8-10 mに栄養剤を注入することとした)

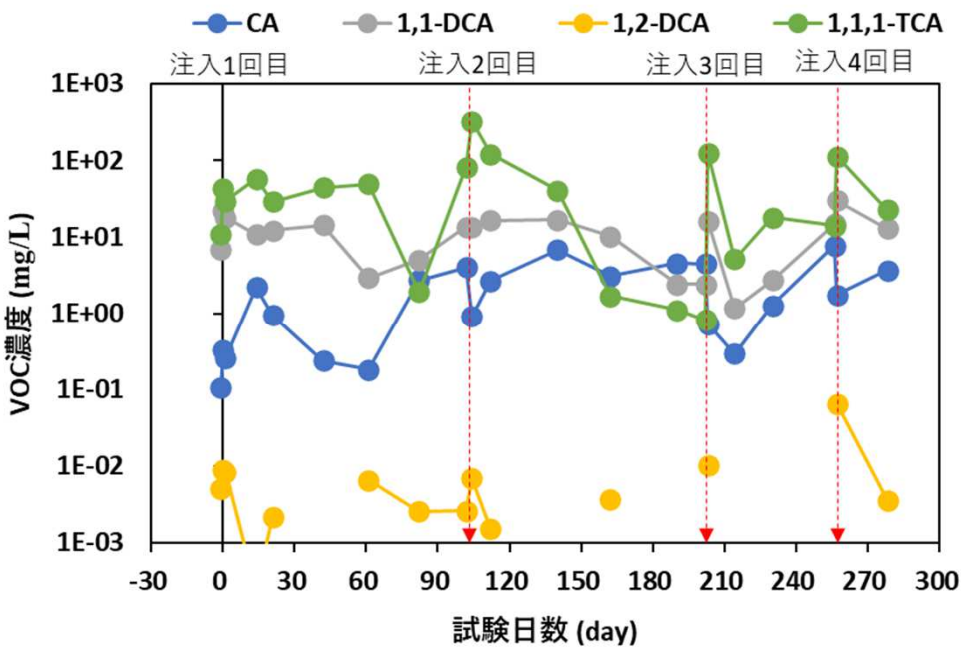
+α 塩素化エチレン・エタン類複合汚染サイトの浄化

バイオレメディエーション原位置浄化試験の結果

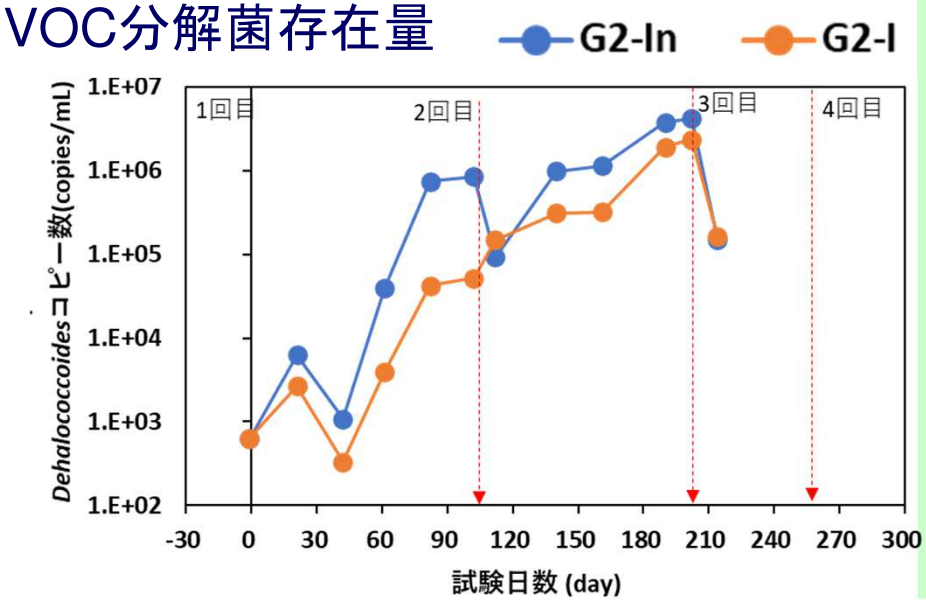
G2-In 塩素化エチレン類



G2-In 塩素化エタン類



VOC分解菌存在量



- 注入直後VOC濃度増加。注入により観測井上流のVOCが移動した可能性。
- 研究期間内に完全浄化できなかった（最終日に基準値を下回ったのは1,2-DCAのみ）
- 時間と共にVOC分解菌増加、VC分解も確認

本汚染サイトにおいてはより長期の栄養剤注入により浄化できる可能性がある

まとめ　サブテーマ4：実現場における汚染状況調査と挙動予測の検証および原位置浄化手法の評価に関する研究

主な研究成果と結論

・実サイトでの汚染実態や帯水層中、帯水層-不飽和層間での物質移動の現地調査

過去の浄化実施サイトでVCとDCE等が地下水環境基準超過、汚染の蓄積実態の把握。
２年のモニタリング期間中の自然減衰はなかった。（trans-1,2-DCEは1%以下）

・クロロエチレンの土壌ガス濃度の鉛直分布の把握

サイトの状況によって、土壌ガスによるVCの検出は難しいことが明らかとなった。
（表層が被覆された場合は、環境変動が少なく、土壌ガスによる把握が可能）

・原位置浄化手法によるクロロエチレンの浄化効果の評価

バイオスティミュレーションにより、Dehalococcoides属細菌の増加が確認でき、クロロエチレン濃度の低下も見られ、浄化可能性が確認された。

※サブテーマ２と連携して、現地の微生物および生育環境調査

環境行政への提言

１．塩化ビニルモノマー汚染された「浄化済みサイト」への対処

VC（基準の数倍～100倍）は長期残存する恐れ。自然減衰は困難なことも多く、分解菌の有無により浄化可能性が大きく変わる。VCが検出された「浄化済みサイト」では、VCのモニタリング（半年に１回程度）を義務つける等が必要と考えられる。

２．土壌・地下水汚染判定の方法

表層土壌ガス調査で、VCの土壌・地下水汚染が「無いこと」の判断は困難。
汚染サイトの状況（地表の被覆や帯水層上の粘土層の有無、VCの濃度）によっては、判定手法を変える必要があると考えられる。既に井戸が設置されている浄化済みサイトでは地下水濃度での判定が確実と考えられる。

まとめと環境政策への貢献

H29年土対法改正：クロロエチレン（VC）が追加、その後、trans-DCEも追加、+α
汚染物質の到達距離、表層土壌ガスによる汚染の評価方法の確立が急務

サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3	サブテーマ4
吸着挙動評価	分解挙動評価	シミュレーションによる評価	実汚染サイト調査

主に得られた科学的知見　（各サブテーマに他サブテーマが協力・連携して確認）

SB134：VCはクロロエチレン類の中で吸着性小、拡散性大で拡がりやすい

SB24　：親物質からVCの自然生成を確認
SB1234：親物質で基準達成しても、生成したVCが基準超過する可能性（特に12DCEは注意）

SB134：地下水中で生成した VCの把握は、表層土壌ガス調査では 困難な場合もある

SB123：連鎖分解反応過程を含んだ三次元理論解に基づく簡易ｽﾌﾟﾚｯﾄﾞｼｰﾄﾓﾃﾞﾙを開発
（環境省計算ツール（分解生成考慮無し）の1.4-2倍の到達距離）

SB1234：trans-DCE（基準追加）の生成を確認、平均的には1,2DCE中の1%未満の濃度。
吸着・拡散・生分解のパラメータは、trans体と同等　+α

改正 土壌汚染対策法に基づく調査、到達距離の評価方法等が記載されている
ガイドラインの改定作業における基盤情報としての活用

◆ 参画メンバーは中環審や関連委員会で情報提供、様々な講演会・研修等で
自治体職員、土壌汚染関連業者担当、市民らに情報提供

政策提言

新たな知見・技術・提言１

クロロエチレンは塩素化エチレン類の中で土壌吸着性が低く、到達距離が長くなる

〇クロロエチレンは他の塩素化エチレン類と比べて、土壌吸着性が低く、分解速度も遅いことが多く、到達距離がより長くなることが懸念されるため、クロロエチレンの到達距離が長くなる条件を整理して、ガイドライン等に記載することが望まれる。

新たな知見・技術・提言２

浄化済あるいは汚染浄化中サイトにおけるクロロエチレン生成の可能性

〇浄化済または汚染浄化中のサイトで、残存する親物質からVCが自然に生成しうること、親物質が基準値を満たしていても、クロロエチレンは分解生成により、基準値を超過する懸念があることが本研究により示された。注意事項としてガイドライン等に記載することが望まれる。

新たな知見・技術・提言

地下水中で生成したクロロエチレンの把握は表層土壌ガス調査では困難な場合もある

〇クロロエチレンは、調査サイトでは表層土壌ガスからの検出が確認されたが、G.L.−1.5～−3mの地下水が基準値を大きく超過した時でも土壌ガスでは未検出の場合も多く、また測定値のばらつきも大きかった。環境変動の影響も受けやすく、汚染濃度が低い場合や地表が開放系および帯水層と地表の間に不透水層が存在した場合は検出されない可能性がある。ガイドライン等に記載することが望まれる。

国民との科学・技術対話

1）小林剛：平成31年度 岐阜県環境推進協会通常総会・環境月間記念講演会（2019）
　土壌・地下水汚染対策の現状と課題について
2）小林剛：環境省環境調査研修所「平成30年度土壌・地下水環境研修」（2019）
　地下水及び市街地土壌汚染問題について
3）張　銘、吉川美穂：産総研テクノブリッジフェア inつくば（2019）
　複合汚染を微生物の力できれいに-環境微生物を利活用した有機系汚染物質の無毒化分解-
4）張　銘、吉川美穂：産総研テクノブリッジフェア in東北（2020）
　複合汚染を微生物の力できれいに-環境微生物を利活用した有機系汚染物質の無毒化分解-
5～11）保高徹生：令和元年度 経済産業省「土壌汚染対策セミナー」(2019～2020)
　リスク評価と改正土壌汚染対策法における考え方（札幌、大阪、岡山、名古屋、東京、福岡で開催）
12～17）保高徹生：平成30 年度改正土壌汚染対策法説明会(2020)
　計算ツールの操作マニュアル（主催：環境省）（大阪、広島、福岡、東京、名古屋、仙台で開催）

※本研究の内容だけではないが、本研究の成果を踏まえた土壌汚染対策法における汚染物質到達距離評価モデルおよびそれに関連するパラメータの影響について、自治体向けに講演を実施し、質疑を個別に受けた。

18）小林剛：環境省環境調査研修所「平成30年度土壌・地下水環境研修」（2018）
　地下水及び市街地土壌汚染問題について　（主催：環境省環境調査研修所（自治体職員を対象））
19）細見 正明：環境省環境調査研修所での講義
　地下水汚染対策　（主催：環境省環境調査研修所（自治体職員を対象））
20）小林　剛：土壌汚染対策法セミナー「新規制・未規制物質への対応」（2018）
　新規性物質の環境中挙動と未規制物質への対応（主催：一般社団法人土壌環境センター）
21）張　銘：土壌汚染対策法セミナー「新規制・未規制物質への対応」（2018）
　クロロエチレン類の分解経路及び分解微生物（主催：一般社団法人土壌環境センター）

◆ **積極的に研究成果を社会に発信（一般市民、企業職員、環境行政職員ら）**

成果の公表状況

＜査読あり＞　5編　（更に、投稿準備中）

1）保高徹生, 江種伸之：テトラクロロエチレン及びその分解生成物の分解定数が到達距離に与える影響の基礎的検討、環境地盤工学シンポジウム論文集4-5.（2019）

2）Ming Zhang, Miho Yoshikawa: Bioremediation: Recent Advancements and Limitations, Proceedings of Second International Conference on Environmental Geotechnology, Recycled Waste Materials, and Sustainable Engineering, No.056, 8 Pages (2019, In press).

3）Miho Yoshikawa, Ming Zhang: Constraints in anaerobic microbial dechlorination, fermentation, and sulfate-reduction induced by high concentrations of tetrachloroethylene (Submitted to Water, Air, & Soil Pollution, Under review).

4）Miho Yoshikawa, Ming Zhang, Yoshishige Kawabe, Taiki Katayama: Enhancement of anaerobic biodegradation of chlorinated ethenes with additional ferrous iron and with and without methanogens (Submitted to FEMS Microbiology Ecology, Under review).

5）小林剛, 末継淳:揮発性有機塩素化合物の不飽帯土壌への吸着・吸収特性と土壌中挙動の検討、**環境情報科学学術研究論文集**, 査読中.

＜査読なし＞

1）吉川美穂、張　銘、川辺能成：二価鉄およびメタン生成菌の共存がクロロエチレン類の嫌気的脱塩素分解速度へ与える影響、第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 131-133（2019）

2）林知美、黒井えみ、末継淳、田小維、小林剛：不飽和土壌中での揮発性有機塩素化合物の油共存による気化・拡散への影響、第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、317-319（2019）

3）張　銘、吉川美穂：塩素化エタン類の分解経路と分解速度について、第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 433-436（2019）

4）小林剛、末継淳、田小維：揮発性有機塩素化合物の不飽帯での吸着・吸収特性と土壌特性との関係、第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、437-439（2019）

5）末継淳, 久保大地, 田小維, 小林剛：第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集,143-145（2018）クロロエチレン等の多様な土壌に対する吸着特性について

6）吉川美穂、張　銘、川辺能成：微生物叢解析に基づくクロロエチレン類汚染サイトにおける汚染物質残存状況の評価、第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 481-485（2018）

7）張　銘、吉川美穂：クロロエチレン類の微生物分解速度と影響因子に関する検討、第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 138-142（2018）

8）張　銘、吉川美穂：クロロエチレン類の分解経路及び分解微生物、第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、89-93 (2017)

9）吉川美穂、張　銘：クロロエチレン類脱塩素分解速度の濃度依存性、第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、216-219 (2017)

10）小林剛、河原知希、田小維：クロロエチレン類の土壌中での吸着・気化拡散挙動に関する情報の調査解析、第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、213-215 (2017)

その他、学会・シンポジウム等における発表（国内　35件、国外　7件）

土壌汚染対策法の課題の解決と
よりよい土壌環境の管理手法の構築に向けて

新規規制物質クロロエチレン等の調査・対策手法の技術ガイドライン策定等への活用に向けた貢献を今後も取り組みます

代表者　小林　剛（横浜国立大学）
分担者　張　　銘（産業技術総合研究所）
保高 徹生（産業技術総合研究所）
細見 正明（東京農工大学）