

土壌試料等のダイオキシン類迅速分析法（第2報）

三木 崇・川下 博之・川村 恭平・吉川 昌範

Rapid Analysis of Dioxins in Contaminated Soil, Sediment and Dyes.(2)

Takashi MIKI, Hiroyuki KAWASHITA, Kyohei KAWAMURA, Masanori YOSHIKAWA

土壌試料等のダイオキシン類のスクリーニング法として、高速溶媒抽出（ASE）による迅速抽出、RH-12ms カラムの1カラム簡易評価法、生物検定法による簡易評価について検討した。実用的な条件下においてASEは有効な手法と考えられ、1カラム簡易定量法では公定法と概ね同値となるTotal-TEQが得られた。生物検定法を土壌、底質および染料試料で検証した結果、試算結果と実測値の両方で、GC/MS法より2～10倍ほど高い値となる傾向が認められ、汚染判定のスクリーニング法として有効な手法といえる。また、生物検定法は媒体毎に反応直線性が維持されていることから、GC/MS法との並行測定による反応比補正を行うことで、生物検定法の結果をもとに実濃度の推定も可能と考えられる。

1. はじめに

ダイオキシン類の分析には多大な時間と労力を要するため、測定の効率化・簡素化を目的とした簡易法の検討が進められている。平成21年3月、土壌底質試料を対象とした環境省簡易測定マニュアル^{1,2)}が策定されたが、作業工程が公定法に近いことや、分析結果が調査指標値を超える場合には公定法での再測定が必要となるなど、緊急時における迅速化・省力化の面で課題もある。

また環境中のダイオキシン類汚染源として知られている燃焼生成由来や過去の農薬成分(CNP、PCP)以外に、工業原料の有機顔料には、一部の製品に非意図的副生物として高濃度のダイオキシン類・PCBが確認されており³⁻⁶⁾、多量の夾雑物のためダイオキシン類分析の難易度も高い。

そこで染料系汚染土壌も対象とした迅速・安価なスクリーニング手法として、高速溶媒抽出を用いた迅速抽出、RH-12msでの1カラム簡易評価法、排ガス・はいじん試料に適用されている生物検定法による簡易毒性評価法の適用について検討した。

2. 方法

2. 1 高速溶媒抽出法

土壌・底質の風乾試料に含水率が5～50%となるよう純水を添加し、高速溶媒抽出（以下、ASE）条件下での抽出阻害影響を検討した。装置の抽出条件を表1に示す。

抽出操作以降の精製から分画までは、ダイオキシン類に係る土壌調査測定マニュアル（平成21年3月）に基づいて処理を行い、mono-ortho PCBs画分とnon-ortho PCBs/PCDDs/PCDFs画分を20μLまで最終濃縮し、高分解能GC/MS（日本電子：JMS 700D）でSP-2331、RH-12msカラムを使用して各異性体を定量した。また、1カラム簡易定量^{1-2),7)}はRH-12msを使用し、毒性等価係数（TEF）を持つ29異性体を定量した。

表1 高速溶媒抽出装置条件（DIONEX ASE-200）

項目	条件
セル容量	33 mL
空隙充填	Na ₂ SO ₄
セル圧力	10.3 Mpa (1500psi)
静置時間	20 min
フラッシュ溶媒量	20 mL
パージ時間	150 sec
抽出溶媒	トルエン

2. 2 生物検定法による毒性評価

ASEで得られた抽出液を、環境省の「排出ガス、ばいじん及び燃え殻のダイオキシン類に係る簡易測定法マニュアル（生物検定法）」⁸⁾に準拠して精製操作と定量操作を行った（図1）。

なお、今回採用した手法は、告示第92号第2の1に記載された抗ダイオキシン類モノクローナル抗体を用いた抗原抗体反応⁹⁾で、環境ソルテック社が販売しているELISA分析キット（商品名：ダイオクイッカー）である（図2）。

マイクロプレート洗浄はBIO-RAD社製のImmuno Wash 1575にて行い、反応後の吸光度測定はTECAN社製のサンライズリモートRで、波長450nmにて測定した（図3）。なお、濃度換算式の係数はばいじん試料と排ガス試料で若干異なるため、土壌試料の評価には同じ固形物試料であるばいじん試料の換算式（図4）を使用した。

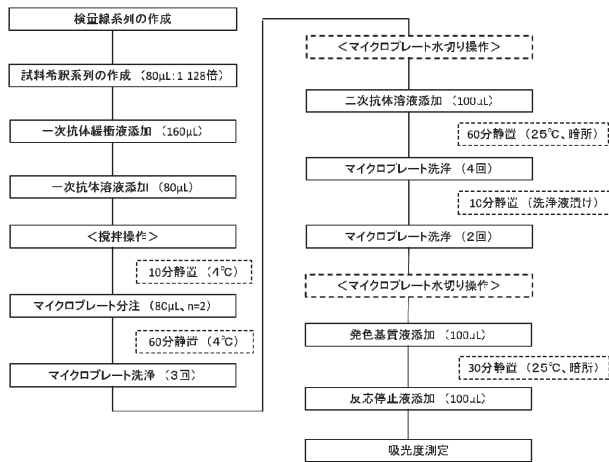


図1 抗原抗体反応法 定量フロー

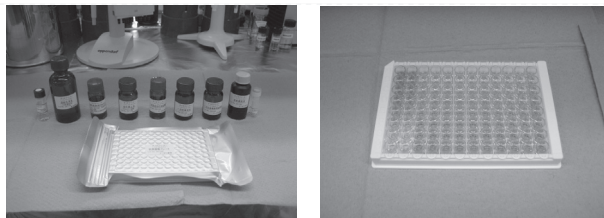


図2 ELISA分析キット（ダイオクイッカー）



図3 マイクロプレートリーダー（左）
マイクロプレートウォッシャー（右）

$$\text{測定量（毒性等量）（ng-TEQ/g）} = 0.0601 \times \left(\frac{Q}{1000} \right)^{0.9605} \times \frac{v}{V_E} \times \frac{V_E}{V}$$

Q：希釈倍数×実測濃度（ng/mL）
v：測定用試料の液量（mL）
V_E：抽出液量（mL）
V_E：抽出液分取量（mL）
V：試料採取量（g）

図4 ばいじん試料の濃度換算式

2.3 コスト面の比較

簡易法の導入にあたり、生物検定法（レポータージーンアッセイ法、抗原抗体反応法（ELISA法））と公定法（高分解能GC/MS法）のコスト比較を行った。分析機器導入に要するイニシャルコストに関しては、

吸光マイクロプレートリーダーとマイクロプレートウォッシャーのみで済むELISA法が概ね200万円程度で最も安く、レポータージーンアッセイ法は同様の定量機器のルミノメーターや冷凍細胞用のクリーンベンチ設備関係がやや高額となり700万円程度であった。公定法の高分解能GC/MS法は機器整備に5000万円以上要し、機器専用の空調設備にも相応の費用が必要である。

分析用消耗品類や、測定機器の維持管理費などのランニングコストを試算した結果、分析試薬類の前処理コストはいずれの手法も同程度だが、レポータージーンアッセイ法は分析規模に応じた毎年のライセンス料が必要となる分、ELISAより高額となった。公定法の高分解能GC/MS法に関しては、分析試薬類以外に¹³Cでラベル化された高額な内標準物質や検量線標準物質が必要であり、加えて機器の保守委託費と専用空調設備の維持管理費が必要となる。

今回導入したELISA法は、イニシャルコスト、ランニングコストの両面で最も安価なダイオキシン類簡易定量法といえる。

3. 結果と考察

3.1 高速溶媒抽出法

(1) 水分影響の検討

水分が多く含まれる試料はダイオキシン類の抽出効率が低下する¹⁰⁻¹³⁾ことが知られている。予備試験として、ヘドロ状で腐敗物などの夾雑成分が多く、ダイオキシン類の抽出が最も困難と考えられる底質試料について、風乾試料に水分を添加する形での抽出阻害試験を行った。

その結果、試料中の水分重量が30%を超えるあたりから抽出効率の低下が認められ、水分量30%試料の抽出ロスが29異性体平均が19.4%であった。また、水分量50%試料における抽出ロスは平均38.6%であった（図5）。

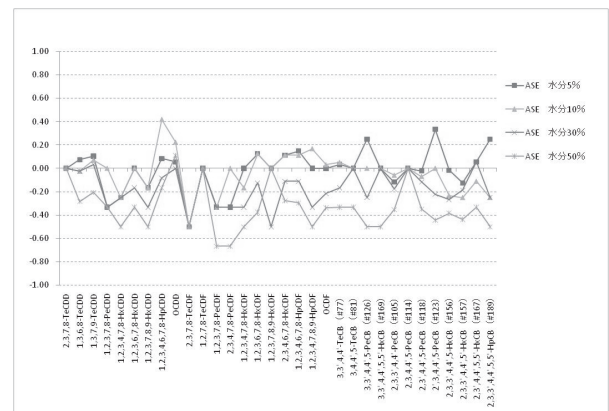


図5 底質試料 抽出量比較試験（水分0%基準）

試料中の水分量に関して、底質試料の平均値では、砂質試料が概ね25%前後（n=10）、ヘドロ状シルト質の試料は35～55%で、平均値が44.6%（n=5）であった。水分量30%の底質は試料から水が滲んでいる状態であり、自然ろ過などの簡易な水切り操作によって水分量20%以下とすることは十分容易である。

なお、過去の土壌試料の水分量は、いずれも1～3%と低水準であった。グラウンドや公園の赤土であり、試料採

取を好天時に行っていたことも一因と思われる。

風乾処理を行わずに湿泥試料の直接抽出を行う場合、アセトン抽出・トルエン抽出を併用することで風乾試料と同等の回収率を得ることができるが^{11)~13)}、アセトン溶媒ではダイオキシン類以外にも多量の水分・夾雑物が抽出されるため、粗抽出液についてカラム精製操作の前にヘキサン洗浄水での液-液抽出処理とその後の脱水操作が不可欠である。環境省の簡易分析マニュアルでも湿試料の直接抽出は認められているが、分析操作の過程で水分分離・ダイオキシン類抽出のための液-液抽出処理が必要である。

緊急時などで多試料のスクリーニング性を優先し、アセトン抽出／液-液分離処理を省略したい場合には、可能な範囲で試料の水切りを行い、清浄な珪藻土と混合して水分影響を抑制することで、少なくとも70%以上の抽出効率を維持出来るものと考えられる。内標準物質を湿試料抽出後に添加して分析する場合は、定量結果に対して1.4倍程度の補正係数を掛けることで、水分影響による過小評価リスクはほぼ避けられると考えられる。

なお、生物検定法においても、抽出液に水分や多量の夾雑物が残留する場合は試料溶液が白濁し、吸光度測定の影響となるため、通常の前処理法に準ずる脱水工程やカラム処理などの簡易処理は必要である。

(2) ASE-1 カラム簡易評価法

公定法の定量結果を基準に、ASE-1 カラム (RH-12ms) 簡易定量法の値を評価した。詳細は既報¹⁴⁾のとおりである。

底質試料について、公定法のソックスレー抽出と ASE の抽出量が概ね一致し、29 異性体の単純平均で ASE が 3.9% 高い結果となった。

また1カラム簡易定量法の検証で、個別の異性体では1,2,3,6,7,8-HxCDF (TEF=0.1) と 1,2,3,4,6,7-HxCDF (TEF=0) が分離できず当該異性体濃度が約2倍となるケースも認められたが、全体量に占める割合は小さく、Total-TEQ は公定法とほぼ同値となる結果が得られた。

3. 2 生物検定法による毒性評価

(1) ELISA キットの交差反応性

当該 ELISA キットについて、藤平らが求めた抗ダイオキシン類抗体の交差反応性を表 2、3 に示す¹⁵⁾。当該キットはばいじん・排ガス試料を対象としていることから、1,2,3,7,8-PeCDF をはじめとする燃焼由来に特徴的な異性体に高い反応性を有している。

一方で、ダイオキシン類の中でも OCDD などの高塩素体や Co-PCB 類、試料中の夾雑物である多環芳香族類との反応性が極めて低く設定されており、夾雑物等による誤定量のリスクが低いという利点はあるが、Co-PCB など一部の異性体が測定対象外となる点について注意が必要である。

なお、当該キットの検出感度は、1,2,3,7,8-PeCDF で 150pg/ml (4.5pg-TEQ/ml) とかなり高感度である。ばいじん試料 1g が前述の濃度を含む場合、Total-TEQ 濃度は約 40pg-TEQ/g に相当するが、この値は他の異性体の発光寄与を考慮しないものであるため、試料全体の下限値はもう少し低い水準である。試料量を増やせば発光強度が上がるため、より低濃度まで定量可能である。

表 2 抗ダイオキシン類抗体の交差反応性①

異性体	TEF	交差反応性 (%)	TEQとの相関係数※
2,3,7,8-TeCDD	1	1.1	0.20
1,2,3,7,8-PeCDD	1	29.9	0.32
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	24.8	0.43
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	18.0	0.46
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	39.8	0.45
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	17.0	0.51
OCDD	0.0003	<0.1	0.48
2,3,7,8-TeCDF	0.1	1.5	0.40
1,2,3,7,8-PeCDF	0.03	100.0	0.98
2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	15.1	0.99
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	45.9	0.95
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	26.6	0.97
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	42.7	0.69
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	43.8	0.80
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	17.9	0.82
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	28.7	0.65
OCDF	0.0003	8.0	0.62

※ 排ガス試料 (274 検体) からの計算値。
(※藤平らの測定結果)

表 3 抗ダイオキシン類抗体の交差反応性②

	物質名	交差反応性 (%)
コブラナーPCB類	3,3',4,4'-TeCB	< 0.1
	3,3',4,4',5'-PeCB	< 0.1
	3,3',4,4',5,5'-HxCB	< 0.1
多環芳香族炭化水素類	Antracene	< 0.1
	Naphthalene	< 0.1
	Fluoranthene	< 0.1
	Pyrene	< 0.1
	Benz[a]anthracene	< 0.1
	Benzo[b]fluoranthene	< 0.1
	Benzo[k]fluoranthene	< 0.1
	Benzo[ghi]perylene	< 0.1
	Chrysene	< 0.1
	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	< 0.1
	Phenanthrene	< 0.1
クロロベンゼン クロロフェノール類	m-Dichlorobenzene	< 0.1
	1,2,3-Trichlorobenzene	< 0.1
	2,4-Dichlorophenol	< 0.1
	3,4-Dichlorophenol	< 0.1
	2,4,5-Trichlorophenol	< 0.1
その他	p-chlorobiphenyl	< 0.1

(※藤平らの測定結果)

(2) 反応性の試算

当該 ELISA キットに係る検討として、前述の交差反応性を用いて試料毎の反応性を試算した。

生物検定キットの反応性の目安として、過去に分析を行った GC/MS の異性体定量結果を基に、各異性体の実測濃度と交差反応性¹⁵⁾を掛け合わせて「Σ交差反応性」を求めた。

ばいじん試料に関しては、GC/MS 定量値と Σ交差反応性の間で、線形近似で非常に良好な相関 ($R^2=0.9978$) が得られた。他の試料媒体として、土壌、底質、染料試料についても同様の試算を行った結果、いずれも良好な相関が得られた。一方で、土壌、底質、染料試料は、ばいじん試料 (環境省認定簡易法) より反応性が大きくなり、ばいじん試料の反応性を 1 とした場合、土壌試料 (n=8) が 6.2、底質試料 (n=12) が 8.7、染料試料 (n=18) が 6.7 であった。結果を図 6~9 に示す。

なお、底質試料の一部では回帰直線から若干外れる試料も認められたが、この試料は染色排水流入河川の底質で、Total-TEQ の約半分を TEF=0.1~0.3 の染料由来ピーク (2,3,4,7,8-PeCDF、2,3,4,6,7,8-HxCDF、PCB#126) が占めており、当該分析キットはこれらの異性体の交差反応性が総じて低いためと考えられる。

生物検定法を利用した他の研究報告^{12,13,15~25)}の中に

は、試料中の多環芳香族炭化水素類など夾雑物の影響によって公定法より高めの値となる傾向が報告^{13,22)}されているものもある。しかしながら、我々が用いた ELISA キットはダイオキシン類似化合物との反応性が極めて低く設定されており、今回の試験で高めの定量結果となった原因は、試料の異性体組成の差に起因するものと推定される。

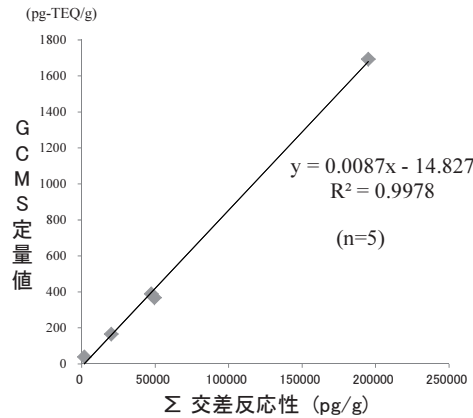


図6 ばいじん試料 Σ交差反応性試算結果

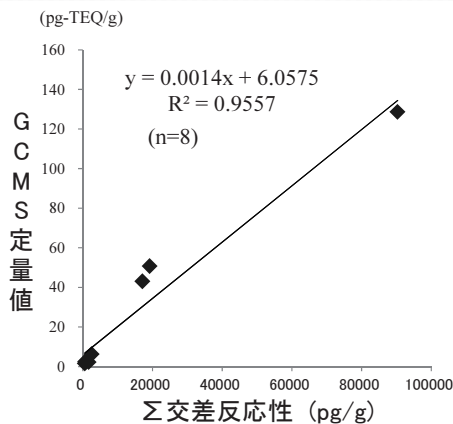


図7 土壌試料 Σ交差反応性試算結果

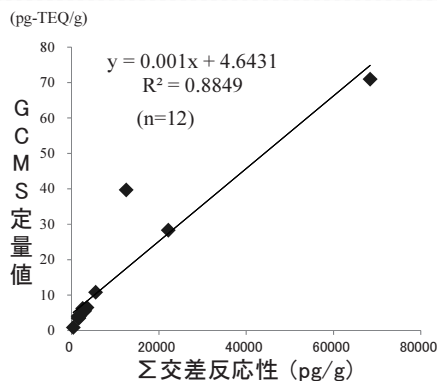


図8 底質試料 Σ交差反応性試算結果

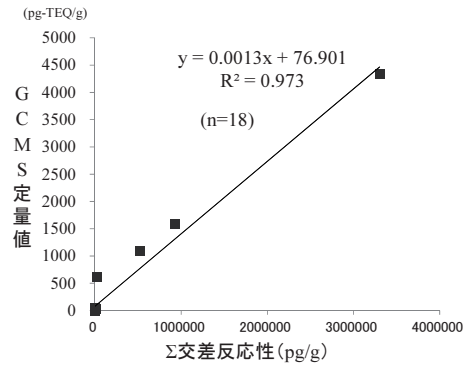


図9 染料試料 Σ交差反応性試算結果

(3) 実測値の比較

試料抽出液を2分割して各々を高分解能 GC/MS 法と ELISA 法で定量し、分析結果を比較した。

① ばいじん試料測定

当該キットは環境省からばいじん・排ガス試料を対象とした簡易法として認定されている。ばいじん試料を対象に、GC/MS 法/ELISA 法の定量値を比較した結果、良好な相関 ($R^2=0.9694$) が得られた (図10)。データ数が少なく若干の分析誤差があるものの、回帰直線の傾きは1.06となり、ほぼ1:1の反応比が確認された。

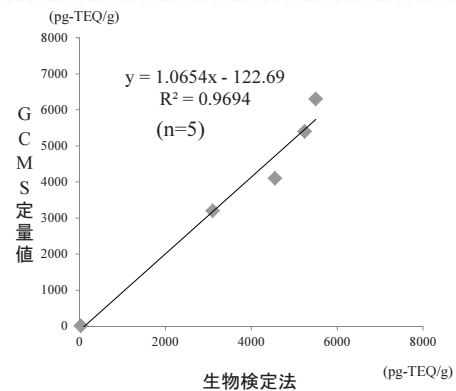


図10 ばいじん試料 GCMS 定量値/ELISA 定量値 (線形近似)

② 土壌・底質測定

土壌・底質試料のデータ評価に関しては試料の大部分が低濃度であり、高濃度試料が少なく安定したデータ評価が難しいこと、発色強度がやや不足気味で低濃度領域のデータ信頼性が若干劣ることから両者を一括して評価することとした。

試算結果では、ばいじん評価式の6~9倍程度の反応性が予測されたが、両手法の実測値(n=12)の線形近似では、GC/MS 法に比べ ELISA 法が2倍程度の反応性となり、 $R^2=0.9147$ と良い相関が得られ (図11)、累乗近似でも $R^2=0.6605$ と一定の相関が得られた (図12)。

実測値の反応性が試算傾向を下回った要因としては、土壌・底質試料の多くの試料が一般環境試料で低濃度の

ものが多く、ダイオキシン類の汚染パターン（≒試料の異性体構成比）も似通っている。一方で、比較的高濃度の 2 試料（主に燃焼由来）の反応性は試算傾向より低い結果となった。低濃度側と高濃度側の 2 極化によって、回帰直線の傾きが環境試料主体の試算結果より低くなったものと推察される。異性体比が燃焼パターン 100%のばいじん試料は、GC/MS 定量値との反応比が 1 であることから、試料の汚染要因に燃焼由来の寄与が大きくなれば、反応性の傾きは 1 に近づくものと推察される。

③ 染料測定

アゾ系・アントラキノン系染料(n=13)の測定結果は、ばいじん試料に対して 10 倍程度の反応性で、良い相関が得られた。

染料に関しては、製品や製造ロットによってダイオキシン類の異性体濃度が極端に異なることが多く、相関が全く得られないかと思われたが、実際の分析値では $R^2=0.9382$ と良い比例関係が得られた（図 13）。この要因は、高濃度 TEQ の染料は TEF の大きな PCDD/PCDF の異性体濃度が高いケースが多く、当該キットが反応しやすい異性体の対象範囲と相性が良かったためと思われる。

一方、Co-PCB 類などをはじめ当該キットの反応性がほとんどない異性体も多く存在するが、これらの異性体は TEF が非常に低いものが多く、Total-TEQ にあまり寄与しない。線形近似の Total-TEQ 比較では、低濃度領域の分散があまり顕在化しないため、結果的にある程度直線性の良い結果となったものと思われる。

累乗近似では、ばいじん試料については非常に良い相関（ $R^2=0.999$ ）が得られたが、染料試料については低濃度～中間濃度領域の分散が大きく、GC/MS 法との相関がほとんど得られない結果となった（図 14）。

なお、染料では GC/MS 定量値から大きく乖離する試料が 13 試料中 4 試料で認められており、GC/MS 定量値は ND～2.8 pg-TEQ/g だが、ELISA 定量値は 500～6,000 pg-TEQ/g と 2～3 桁以上離れた結果であった。これらの試料について他染料との差異を調べた結果、当該 4 試料はハロゲン基に Br 基を有しており、他 9 試料は Br 基を持たない染料であった（表 4）。

生物検定法に関する報告²⁶⁾では、当該キット以外の計 10 種類の ELISA 法および Ah-R レセプター法のうち 4 種類に臭素系ダイオキシン類との交差反応性が確認されている。このため当該キットの乖離値の原因に関しては、臭素系ダイオキシン類による影響²⁷⁾、もしくは未確認の PAHs 成分による影響の 2 つの可能性が考えられる。

当初は交差反応性のリストに掲載されていない無毒性ダイオキシン類による影響も考えられたが、ELISA 定量値（pg-TEQ/g）と全実測濃度（pg/g）に相関はなく、当該 ELISA 対象外の無毒性ダイオキシン類による影響でないことは明らかである。

近年は、分析精度の向上を目的として Total-TEQ の指標異性体となる数種類のみに反応性を絞った生物検定法も開発されている。一方で、選択性に特化したキットの場合、染料試料のように特定の異性体のみ高濃度となる特殊な異性体パターンをもった試料の場合に、当たり外れが大きくなりやすいことが懸念される。精度管理の側面から 2 種類以上の生物検定法を併用する²³⁾ことで、選択性の問題は概ねフォローできると考えられる。

未知汚染源を対象とする場合、当該キットのように反応性にある程度の幅があることで大幅な定量値のズレが

生ずるリスクが低くなると考えられ、スクリーニング法という観点からは有効な手法といえる。

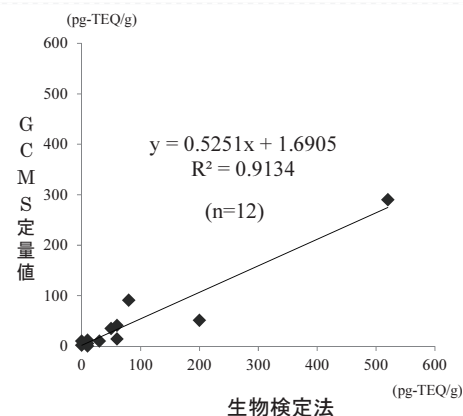


図 11 土壌底質試料 GCMS 定量値／ELISA 定量値（線形近似）

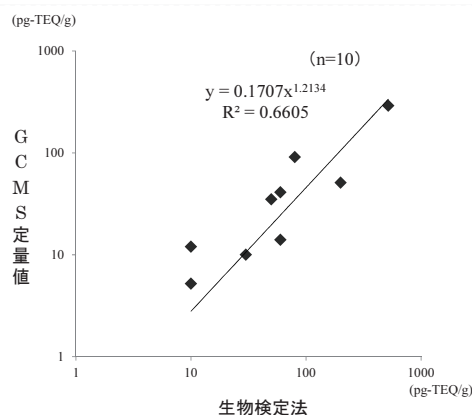


図 12 土壌底質試料 GCMS 定量値／ELISA 定量値（累乗近似）

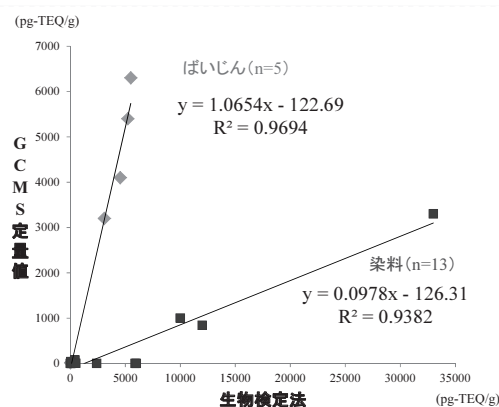


図 13 染料試料 GCMS 定量値／ELISA 定量値（線形近似）

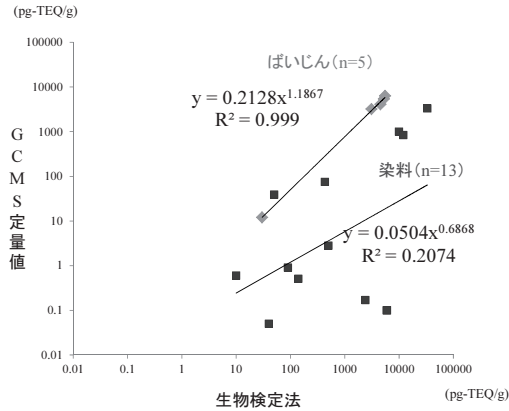


図 14 染料試料 GCMS 定量値/ELISA 定量値 (累乗近似)

表 4 染料分析結果 (GCMS/ELISA)

	色	GC/MS TEQ 定量値	ELISA TEQ 定量値	化学構造	ハロゲン基	(参考) GC/MS 実測濃度
1	イエロー	1000	10000	アゾ	2Cl	90000
2	イエロー	840	12000	アゾ	2Cl	280000
3	ブラウン	3300	33000	アゾ	3Cl	250000
4	ブルー	0.17	2400	アゾ	Br	190
5	ブルー	(ND)	5900	アゾ	Br	1600
6	ブルー	0.51	140	アントラキノン	—	450
7	イエロー	75	430	アントラキノン	—	88000
8	レッド	0.05	40	アントラキノン	—	230
9	バイオレット	0.6	(ND)	アントラキノン	Cl	9800
10	バイオレット	39	50	アントラキノン	2Cl	4100
11	バイオレット	0.90	90	アントラキノン	2Cl	9800
12	ブルー	2.8	500	アントラキノン	Br	1800
13	ブルー	(ND)	6000	アントラキノン	Br	510
		(pg-TEQ/g)	(pg-TEQ/g)			(pg/g)

4. まとめ

ダイオキシン類のスクリーニング法として、高速溶媒抽出装置を用いた迅速抽出、RH-12ms での 1 カラム簡易評価法、排ガス・ばいじん試料に適用されている生物検定法による簡易毒性定量法の適用について検討した。

(1) ASE-1 カラム簡易定量法

- ・風乾試料に純水を添加して抽出量を評価した結果、水分量とともに抽出量が低下し、特に水分量が 30% を超えるあたりから顕著な抽出効率の低下が認められた。スクリーニング性を優先する場合には、可能な範囲で試料の水切りを行い、清浄な珪藻土と混合して水分影響を抑制することで、70% 以上の抽出効率を維持出来るものと考えられる。
- ・1 カラム簡易定量法の検証で、個別の異性体では 1,2,3,6,7,8-HxCDF と 1,2,3,4,6,7-HxCDF が分離できず当該異性体濃度が約 2 倍となるケースも認められたが、全体量に占める割合は小さく、Total-TEQ は公定法とほぼ同値となる結果が得られた。

(2) 生物検定法 (ELISA)

- ・ELISA キットの検討として、各異性体の交差反応性から試料媒体毎の反応性を試算した。当センターの GC/MS 定量結果を基に、異性体毎の実測濃度に交差反応性を掛け合わせて Σ 交差反応性を求めた結果、ばい

じん試料、土壌試料、底質試料および染料試料について線形近似で良好な相関が得られた。なお、ばいじん試料以外の反応性は、ばいじん試料に比べ 6~9 倍程度高い値となった。

- ・試算結果では、底質試料で回帰直線から若干外れる試料も認められた。この要因として当該試料は染色排水流入河川の底質で、Total-TEQ の約半分を TEF=0.1 ~ 0.3 の染料由来ピーク (2,3,4,7,8-PeCDF、2,3,4,6,7,8-HxCDF、PCB#126) が占め、分析キットはこれらの異性体の交差反応性が総じて低いと考えられる。
- ・試料抽出液を分割して、土壌試料、底質試料、染料試料にばいじん試料の評価式を適用して GC/MS 法と定量値の比較を行った。その結果、土壌・底質試料は実測値 (線形近似) で 2 倍程度、染料試料は 10 倍程度、ELISA 側の過大評価となった。試算傾向との差異については、土壌試料では比較的高濃度の 2 試料 (主に燃焼由来) の反応性が試算傾向より低かったこと、染料試料は、高濃度試料の異性体構成比の反応性が高かったこと、ELISA 定量値側が 2~3 桁以上高濃度となる乖離値が含まれていたことによる結果と推察される。
- ・染料では GC/MS 値と 2~3 桁以上乖離する試料が 13 試料中 4 試料で認められ、当該 4 試料のみ Br 基を有する製品であった。臭素系ダイオキシン類による影響、もしくは未確認の多環芳香族 (PAHs) 成分による影響と考えられる。

(3) 総括

- ・当該 ELISA キットの特長として、夾雑成分である多種の PAHs との反応性が極めて低く調製されているため、これらの物質による測定影響が十分低く抑えられていることが挙げられる。一方、PCDD/PCDF の一部や Co-PCB 類 (特に TEF=0.1 の #126) が定量対象外となるとところが課題といえる。
- ・土壌、底質および染料試料は、試算結果と実測値の両方で、ELISA 法の方が高めの値となる傾向が認められた。この点を安全裕度と捉えれば、スクリーニング法として高濃度汚染の有無の判断 (特にシロ判定) に用いることは十分有効であると考えられる。また、ダイオキシン類分解処理の経過観察など、迅速・安価に濃度把握したい場面では非常に有効な手法である。
- ・土壌汚染が特定の汚染要因による場合 (≒ 異性体構成比が固定されている場合) には、GC/MS 法と生物検定法の反応比は維持されると考えられる。同一の汚染サイトに関しては、GC/MS の並行測定で生物検定法の反応比を確定させることで、反応比補正によって実濃度に近い値の推定が可能と考えられる。
- ・土壌汚染が複数の汚染要素からなる場合は、汚染要因の比率に応じて反応性の傾きが変化する可能性が高く、注意を払う必要がある。

謝辞

本研究は文部科学省「特別電源所在県科学技術振興事業費補助金」により、「化学物質対策調査研究事業 (平成 23~25 年度)」として実施したものであり、ご協力を賜りました関係者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：土壌のダイオキシン類簡易測定法マニュアル，平成 21 年 3 月
- 2) 環境省：底質のダイオキシン類簡易測定法マニュアル，平成 21 年 3 月
- 3) 熊谷宏之他：分散染料中のダイオキシン類分析について―抽出法の検討と測定データの特徴―，福井県衛生環境研究センター年報，5，77-84 (2006)
- 4) 熊谷宏之他：未規制発生源である染色排水からのダイオキシン類排出機構について，第 16 回環境化学討論会講演要旨集，388-389 (2007)
- 5) 熊谷宏之他：未規制発生源である染色排水からのダイオキシン類排出機構について (その 2) ―太陽光照射による PCDFs の生成反応―，第 17 回環境化学討論会講演要旨集，410-411 (2008)
- 6) 経済産業省 HP：有機顔料中に副生する PCB の工業技術的・経済的に低減可能なレベルに関する検討会第 1 回配布資料 (2012.7.10)
- 7) 三木崇他：RH-12ms を用いたダイオキシン類分析の迅速化と精度確保について，第 23 回全国環境研協議会東海・近畿・北陸支部 支部研究会 講演要旨集 (2009.2)
- 8) 環境省：排出ガス、ばいじん及び燃え殻のダイオキシン類に係る簡易測定法マニュアル (生物検定法)，平成 22 年 3 月
- 9) 滝上英孝他：ダイオキシン類、PCB を検出するバイオアッセイ，ぶんせき，503-510 (2003)
- 10) 市橋雅美他：土壌中ダイオキシン類の抽出における水分の影響，第 19 回環境化学討論会講演要旨集，322-323 (2010)
- 11) 東野和雄他：ダイオキシン類分析における迅速化の検討について，東京都環境化学研究所年報，p187-193 (2000)
- 12) 佐竹輝洋他：ダイオキシン類分析における湿泥試料中の多環芳香族炭化水素類の除去方法の検討，札幌市衛研年報 34，p76-82 (2007)
- 13) 高柳周二他：ダイオキシン類の簡易分析技術，東芝レビュー，vol.59, No.1, p42-45 (2004)
- 14) 三木崇他：土壌試料等のダイオキシン類迅速分析法，福井県衛生環境研究センター年報，11，75-78 (2012)
- 15) 藤平弘樹他：ダイオキシン類の高感度迅速測定法，環境浄化技術 vol.2 No.5, p63-66 (2003.5)
- 16) Malin Nording et al. : Rapid screening of dioxin-contaminated soil by accelerated solvent extraction/purification followed by immunochemical detection, Anal Bioanal Chem 385, 357-366 (2006)
- 17) 松枝隆彦他：ダイオキシン類の簡易分析，第 15 回環境化学討論会講演要旨集，332-333 (2006)
- 18) 半野勝正他：生物検定法を用いた底質中ダイオキシン類の迅速測定法の検討，第 13 回環境化学討論会講演要旨集，650-651 (2004)
- 19) 姉崎克典他：高感度 AhR レポーター細胞を用いた大気中ダイオキシン類の測定 (第 2 報)，第 17 回環境化学討論会講演要旨集，374-375 (2008)
- 20) 片岡千和他：特異性の異なる複数の抗体を用いた土壌汚染迅速判定法 (ダイオキシン類、PCB) の開発，第 17 回環境化学討論会講演要旨集，378-379 (2008)
- 21) 伊藤智博他：ELISA 法を用いた土壌・底質中のダイオキシン類の測定 (第二報)，第 14 回環境化学討論会講演要旨集，358-359 (2005)
- 22) 加藤陽一他：ダイオキシン類の迅速な抽出・分離法の開発，神奈川県環境科学センター研究報告第 26 号，p52-59 (2003)
- 23) 高木陽子他：リサイクル型土壌浄化事業を推進するダイオキシンバイオセンサ，第 23 回環境化学討論会講演要旨集，335-336 (2014)
- 24) 中村昌文他：エージェントオレンジ由来ダイオキシン類汚染食品の簡易迅速測定法～ケイラックスアッセイによる評価～，第 23 回環境化学討論会講演要旨集，339-340 (2014)
- 25) 立石典生他：エージェントオレンジ由来ダイオキシン汚染食品の簡易迅速測定法～フロー式イムノセンサによる評価，第 23 回環境化学討論会講演要旨集，341-342 (2014)
- 26) 塩崎卓哉他：ダイオキシン類簡易分析法の現状について，第 40 回日本環境科学会講演会予稿集 (ダイオキシン類簡易分析法)，16-42 (2004)
- 27) 中村昌文他：生物検定法による臭素系ダイオキシン類の検出特性評価，第 23 回環境化学討論会講演要旨集，359-360 (2014)