

蛍光 X 線 (XRF) コアスキャナー分析による  
堆積物中元素濃度の簡易見積もり  
— 高知大学 ITRAX を用いた例 —

関 有沙<sup>1</sup>・多田隆治<sup>2</sup>・村山雅史<sup>3</sup>・松崎琢也<sup>3</sup>・矢生晋介<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 深田地質研究所

<sup>2</sup> 千葉工業大学

<sup>3</sup> 高知大学

Estimation of elemental composition using the XRF core scanner  
-A case study using ITRAX in Kochi University-

SEKI Arisa<sup>1</sup>, TADA Ryuji<sup>2</sup>, MURAYAMA Masafumi<sup>3</sup>, MATSUZAKI Takuya<sup>3</sup>, YAGYU Shinsuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fukada Geological Institute

<sup>2</sup>Chiba Institute of Technology

<sup>3</sup>Kochi University

要旨：蛍光 X 線 (XRF) コアスキャナーは非破壊・迅速分析が可能という特徴から、堆積物コアを用いた様々な研究に多く活用されている。しかし、これまでの研究は XRF コアスキャナーを用いた分析結果を堆積物中の「相対的な」元素量変動として扱うものが多く、定量的な元素「濃度」変動の議論にはほとんど使用されていない。その要因として、XRF コアスキャナー測定結果を元素濃度に換算するためには、同一の試料を用いて他の定量分析により元素濃度を測定する必要があり、手間がかかることが挙げられる。

Seki et al. (2025) では、標準試料の繰り返し測定から、XRF コアスキャナー測定結果の誤差や濃度との関係を明らかにした。さらに、高知大学の ITRAX を用いて測定された全ての結果に対し、測定日時や測定条件を基におおよその元素濃度を計算する手法を提唱した。本論文では、新しい測定データも加えて上記の手法を解説する。

キーワード：XRF コアスキャナー、堆積物、コア試料、元素濃度推定、日本海

Abstract: X-ray fluorescence (XRF) core scanners are actively used in various sediment core studies due to their ability to perform non-destructive and rapid analysis. However, previous studies have treated XRF core scanner analysis results as “relative” variations in elemental abundance within sediments, and not many studies used them to discuss quantitative variations in elemental “concentrations.” This is because converting XRF core scanner results to elemental concentrations requires the measurement of concentrations using other quantitative methods on the same sample, which is labor-intensive.

Seki et al. (2025) clarified the relationship between XRF core scanner measurement errors and concentrations through repeated measurements of standard samples. Furthermore, they proposed a method to calculate approximate element concentrations for almost all results measured using ITRAX in Kochi University, if the measurement date, time and measurement conditions are provided. This paper explains the above method with recently obtained new data.

Keywords: XRF core scanner, sediment, core sample, estimation of elemental composition, the Japan Sea

## 1. はじめに

非破壊・迅速分析が可能な蛍光 X 線 (XRF) コアスキャナーは、堆積物コアを用いた様々な研究に多く活用されている。高知大学の XRF コアスキャナー (ITRAX, COX Analytical Systems) は、2014 年に日本で初めての ITRAX として導入されて以来様々な試料が分析され、多くの研究成果が発表されてきた (例えば, Seki et al., 2019, 2025; Kuroda et al., 2021; Hsiung et al., 2021; Mondal et al., 2021)。

しかし、これまでの研究は XRF コアスキャナーを用いた分析結果を堆積物中の「相対的な」元素濃度変動として扱うものが多く、定量的な元素濃度変動の議論にはほとんど使用されていない (例えば, Kuroda et al., 2021; Hsiung et al., 2021)。その要因として、XRF コアスキャナー測定結果を元素濃度に換算するためには、同一の試料を用いて他の定量分析により元素濃度を測定する必要があり、手間がかかることが挙げられる (例えば, Weltje and Tjallingii, 2008; Weltje et al., 2015; Dunlea et al., 2020 など)。

Seki et al. (2025) では、高知大学の XRF コアスキャナー (ITRAX) を用いて標準試料の測定を繰り返し行い、測定結果の誤差やカウント値と濃度との関係を明らかにした。さらに、機器の出力の時間変動も記録することで、高知大学の ITRAX を用いて測定された全ての結果に対し、測定日時と測定条件を基におおよその元素濃度を計算する手法を提唱した。

本論文では、上記の手法をよりわかりやすく解説するとともに、Seki et al. (2025) 発表後の新たな標準試料測定結果も合わせて提示する。

## 2. 濃度推定に必要な知識

元素濃度推定手法の解説に入る前に、この章では、XRF コアスキャナーの基礎知識に加え、Seki et al. (2025) で提示されている標準試料測定結果の概要とその活用方法を解説する。

### 2.1 XRF コアスキャナーの基礎知識

蛍光 X 線 (XRF) 分析とは、X 線 (入射 X 線と呼ぶ) を試料に照射し、試料中の元素から出てきた特性 X 線を検出する分析である。入射 X 線により各原子の内核の電子が弾き飛ばされると、安定化のために外核の電子が内核の空いた位置に移動する。この時に出てくる特性 X 線のエネルギーが元素ごとに異なるため、特性 X 線を検出することでどのような元素が試料中に含まれているのかがわかるのである (中井, 2005)。

XRF コアスキャナーは、その名の通り、コア試料をスキャンしながら XRF 分析を行うことで、高解像度で分析を行うことができる機器である。ITRAX (Croudace et al., 2006) は XRF コアスキャナーの 1 つで、スキャン方向に 0.2mm の幅を持つ長方形の入射 X 線を用いることにより、最高で 0.2mm の解像度でコア試料の XRF 分析が可能な機器である。ITRAX の測定結果は、XRF スペクトル (図 1) の各元素に対応するピークエリアのカウント値として、ソフトウェアにより自動計算されて表示される。測定方法などの詳細は Löwemark et al. (2019) にまとめられている。堆積物コアの元素カウントや元素比は様々な研究に使用されている (Rothwell and Croudace et al., 2015)。

### 2.2 測定誤差

ITRAX を用いた分析により得られる元素カウ

ントを深度軸に沿ってグラフ化してみると、深度方向の元素変動を見ることが出来る。しかし、どこまでが誤差で、どこからが真の変動なのか、判断に迷うことも多い。

ここで役立つのが、Seki et al. (2025) で提示されている標準試料の繰り返し測定の結果である。Seki et al. (2025) では、日本海堆積物を粉末化し、プレスして作成された 4 種類のペレット状の標準試料 (light layer, dark layer, calcareous, siliceous; Dunlea et al., 2020) を用いて、5 回繰り返し測定を合計 165 回行った。測定結果から、図 1 に示した 27 元素のカウント値が得られた。その結果、5 回繰り返し測定のカウントの平均を  $N$  とすると、Si, Cl, K については 5 回繰り返し測定の標準偏差 (standard deviation) が平均で  $\sqrt{N}$ 、最大でも  $2\sqrt{N}$  以下になることが分かった (図 2)。一方で、Fe は標準偏差が平均で  $1.2\sqrt{N}$ 、Br は標準偏差が平均で  $2.1\sqrt{N}$  になるなど、元素によ

り 5 回繰り返し測定時のばらつきが異なることが分かった。これをまとめると、各元素ごとの標準偏差の計算式は以下ようになる。

$$\text{標準偏差} = \alpha_{\text{element}} \sqrt{N}$$

$\alpha_{\text{element}}$  は元素ごとに異なる値で表 1 にまとめられている。表 1 を活用すれば、ITRAX 測定結果を見た際に、どこまでが誤差でどこからが真の変動なのかをすぐに明らかにすることができる。

また、表 1 では、図 2 に示されている「5 回繰り返し測定の平均の標準偏差」を採用しているが、安全をとって「5 回繰り返し測定の最大の標準偏差」(例えば、Si や Cl, K では  $2\sqrt{N}$ ) を採用するという考え方もある。研究目的によって判断するのが良いと考えられる。Seki et al. (2025) には、5 回繰り返し測定の結果 (合計 165 回) が全て supplementary data として載っているため、必要があればぜひ活用していただきたい。

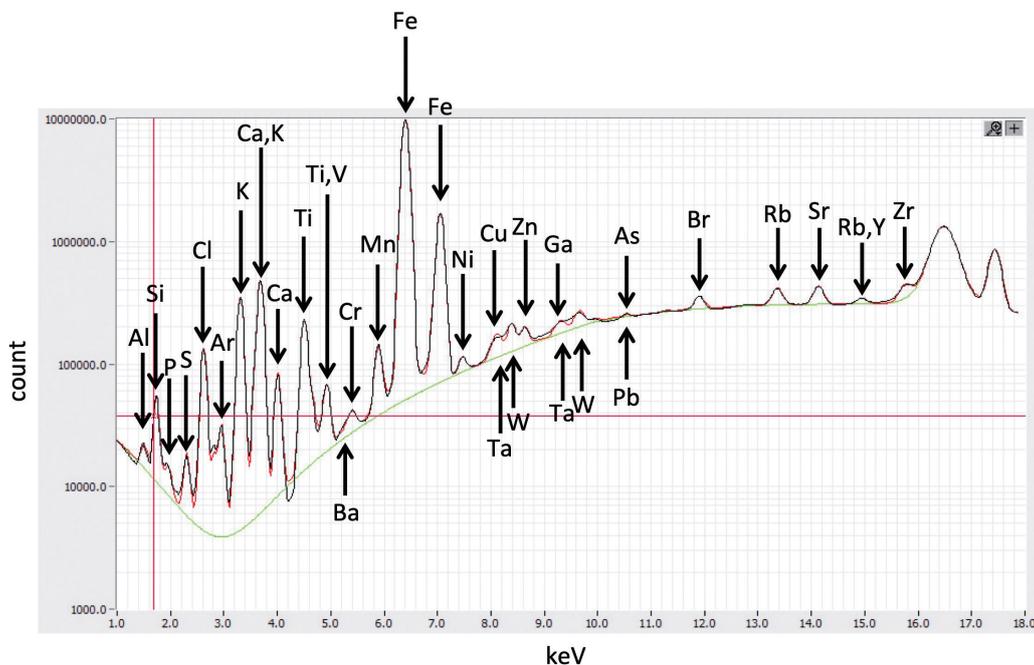


図 1 XRF スペクトルの例. 日本海堆積物 (U1425D-1H-2A) の測定結果. 黒:737 測定のスペクトルを合計したサムスペクトル. 赤:ピークフィッティングの結果. 緑:バックグラウンド. Seki et al. (2025) より抜粋.

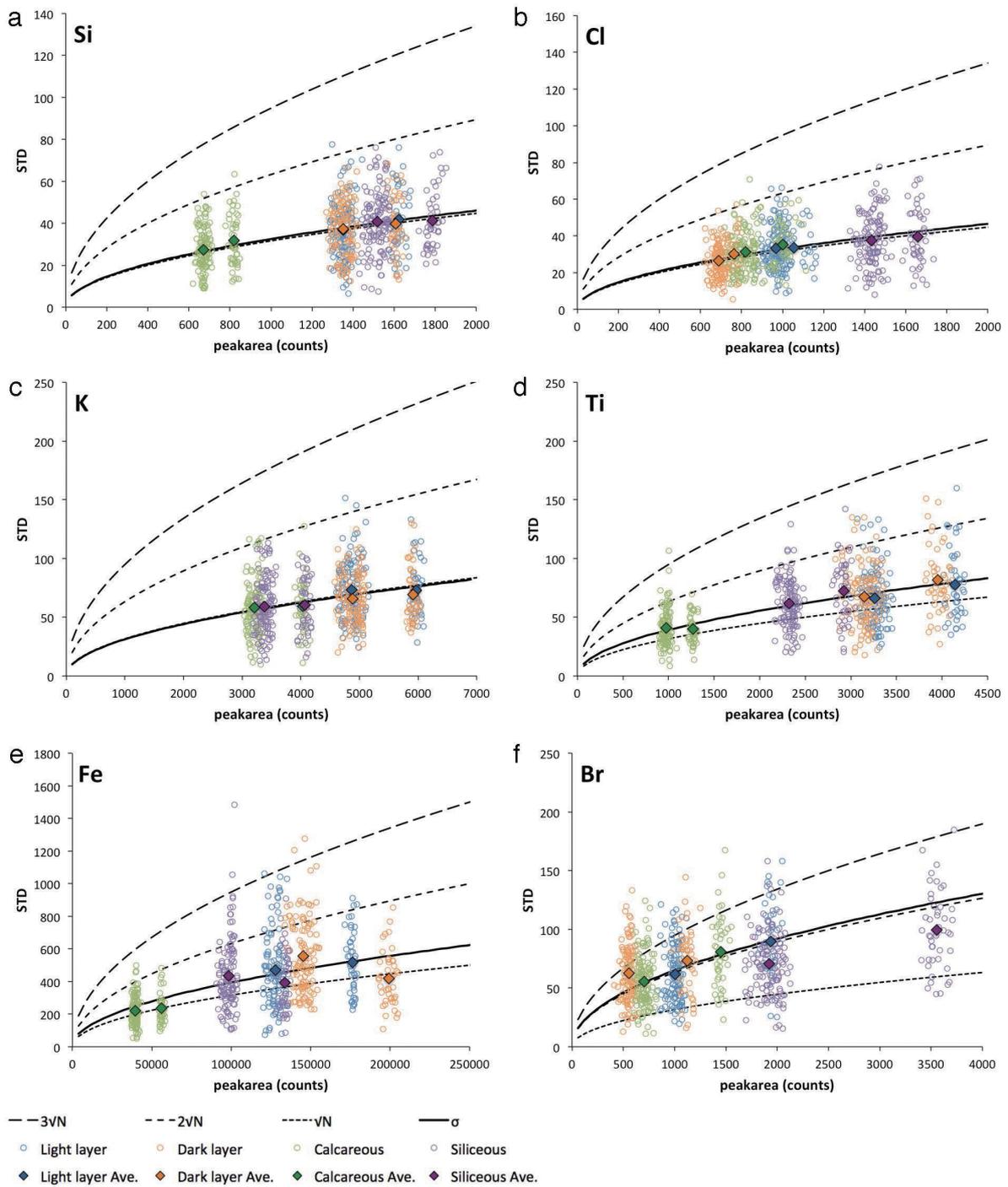


図 2 5 回繰り返し測定のはらつき。黒い実線が平均の標準偏差を示す。  
Seki et al. (2025) より抜粋。

### 2.3 機器の出力変化

2.1 で説明した入射 X 線の強度は, XRF コアスキャナーを使用していくにつれて徐々に減少していく. これを, (入射 X 線を出している) X 線管球の「aging 効果」という. 入射 X 線の強度が減少すれば, 試料から出てくる特性 X 線の強度も減少するので, 同じ試料を測定しても結果として得られる元素ごとのカウント値が全く異なる値になってしまう. したがって, 異なる時期 (筆者の感覚では 1 ~ 2 週間以上離れた時期) に測定した結果を比較する際には, 注意が必要である.

同じ試料をそれぞれの時期に測定して, 同一試料が同一のカウント値になるように補正するのが最も簡単な手法であるが, 必ずしも同一試料を常に測定できるとは限らない. そこで, Seki et al. (2025) では, 定期的に測定した日本海標準試料の結果を公開し, 高知大学の ITRAX の出力変化を時系列で明らかにしている. また, ITRAX のメンテナンスのために定期的に測定されている reference glass の測定結果も, 高知大学の ITRAX の出力変化を明確に記録している (Seki et al., 2025). 図 3 には, 2015 年以降の reference glass の変動を示した. この図を用いることで, 測定年月日ごとの高知大学の ITRAX の出力状態を知ることが可能である.

ここで着目すべきことは, 元素により「aging 効果」による出力変化の影響が異なるという点である. Seki et al. (2025) は, 各元素の特性 X 線のエネルギーが小さいほど, X 線管球の「aging 効果」によるカウントの減少率が大きいことを明らかにした. そのため, 別の時期に測定した結果を比較する場合, 元素によって減少割合が異なることに注意が必要である. Seki et al. (2025) は, 元素ごとに「aging 効果」の補正を行うことを推奨している. また, 「aging 効果」の影響が懸念さ

表 1 5 回繰り返し測定から計算された元素ごとの標準偏差. 標準偏差は  $\alpha_{\text{element}} \sqrt{N}$  ( $N$  は 5 回繰り返し測定の平均のカウント値) で表される. 最大・最小カウントは図 2 の横軸のデータ範囲. Seki et al. (2025) より抜粋.

※ 1 ~ 3 はカウント値が 0 の試料を除いて計算したものの.

|                  | $\alpha_{\text{element}}$ | average peak area<br>counts maximum | average peak area<br>counts minimum |
|------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Al               | 1.6                       | 226                                 | 79                                  |
| Si               | 1                         | 1852                                | 619                                 |
| P <sup>*1</sup>  | 2.5                       | 51                                  | 6                                   |
| S                | 1.3                       | 591                                 | 136                                 |
| Cl               | 1                         | 1735                                | 620                                 |
| Ar               | 1.3                       | 346                                 | 145                                 |
| K                | 1                         | 6099                                | 3042                                |
| Ca               | 1.1                       | 131579                              | 1243                                |
| Ti               | 1.2                       | 4254                                | 898                                 |
| V                | 2.7                       | 283                                 | 4                                   |
| Cr               | 1.9                       | 441                                 | 15                                  |
| Mn               | 1.4                       | 1774                                | 429                                 |
| Fe               | 1.2                       | 205273                              | 37191                               |
| Ni               | 2                         | 586                                 | 163                                 |
| Cu               | 2.9                       | 511                                 | 151                                 |
| Zn               | 1.8                       | 1618                                | 474                                 |
| Ga               | 3.7                       | 488                                 | 31                                  |
| As <sup>*2</sup> | 7.2                       | 378                                 | 6                                   |
| Br               | 2.1                       | 3725                                | 414                                 |
| Rb               | 3.2                       | 2847                                | 333                                 |
| Sr               | 1.7                       | 16708                               | 1129                                |
| Y                | 4.8                       | 492                                 | 48                                  |
| Zr               | 2.9                       | 1785                                | 451                                 |
| Ba               | 2.3                       | 392                                 | 30                                  |
| Ta <sup>*1</sup> | 2.4                       | 605                                 | 35                                  |
| W                | 1.5                       | 1783                                | 49                                  |
| Pb <sup>*3</sup> | 6.2                       | 286                                 | 13                                  |
| inc              | 2                         | 47001                               | 13351                               |
| coh              | 1.6                       | 13809                               | 5772                                |

れるデータの元素比 (または元素のログ比) を用いる場合には, 特性 X 線のエネルギーが近い元素同士 (Ca/Ti, Rb/Zr など) を用いることが重要である (Ohlendorf et al., 2015; Seki et al., 2025). 入射 X 線のレイリー散乱 (coh) のカウント値で元素カウントを割るという手法 (例えば, K/coh, Ti/coh など) も, X 線管球の「aging 効果」の影響を受けて値が変化してしまうため注意が必要である (Seki et al., 2025).

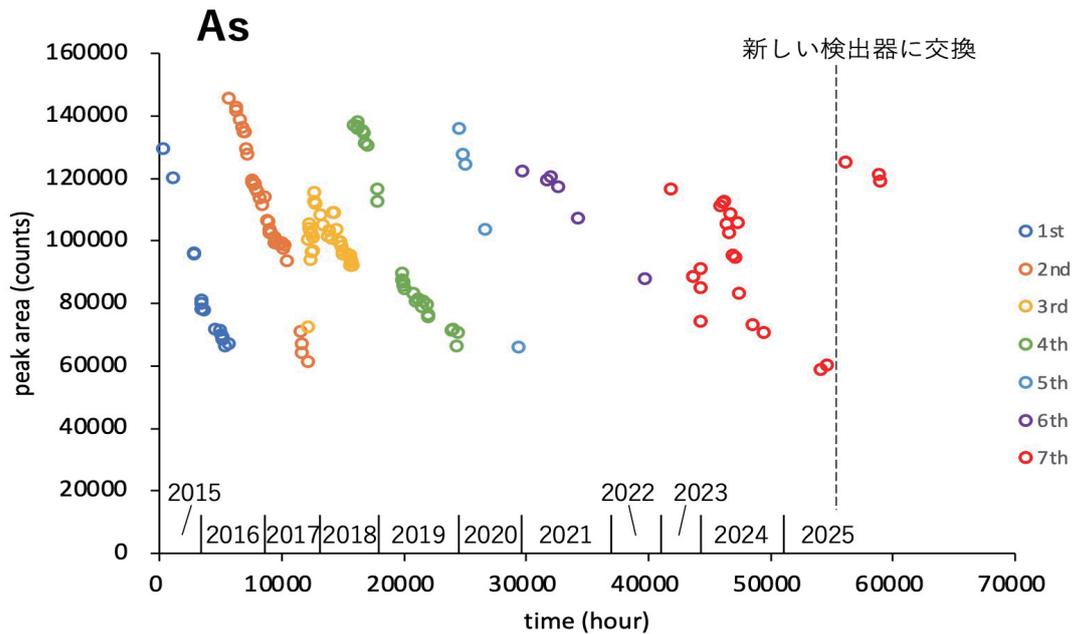


図 3 reference glassの時系列変動. Seki et al. (2025) のデータに、新たに測定されたデータを加えたもの。横軸は高知大学の ITRAX の稼働積算時間(歴年を参考に付記)。凡例は X 線管球 (Mo) の違い(導入順)。

## 2.4 カウント値と濃度の関係

2.1 で説明した ITRAX で得られた元素ごとのカウント値からは、そのままでは試料中の元素濃度はわからない。カウント値を元素濃度に換算するには、ITRAX で測定した試料を別の定量的手法（ビード試料またはプレス試料を用いた XRF 分析や ICP 分析など）で分析し、カウント値と元素濃度の関係式を作成する必要がある（例えば、Weltje et al., 2015; Dunlea et al., 2020 など）。

しかし、上記の分析には試料の調整に時間がかかる。堆積物コアを半割した後、すぐに測定可能という XRF コアスキャナー分析の迅速性を生かすためにも XRF コアスキャナー分析結果をすぐに「元素濃度」に換算することができれば、研究の進捗にも大いに貢献することが期待される。

そこで、Seki et al. (2025) では、濃度既知の市販の堆積物標準試料粉末を ITRAX で測定し、カウント値と濃度の関係を明らかにすることを試みた。その結果、15 元素に対してカウント値と濃度の関係式を得ることができた（図 4）。ただし、これらの市販試料は乾燥試料であるのに対し、実際の堆積物コア試料は湿潤試料であることが多く、特に低エネルギーの特性 X 線が水により吸収されてしまう（Kido et al., 2006; Katsuta et al., 2019; Seki et al., 2025 など）という問題がある。水による影響は Ti や Fe などの元素でも見られるため、湿潤試料を扱う場合は上記の関係式はあくまでも「目安」としてしか使用できないことには注意が必要である。

蛍光 X 線 (XRF) コアスキャナー分析による堆積物中元素濃度の簡易見積もり  
 — 高知大学 ITRAX を用いた例 —

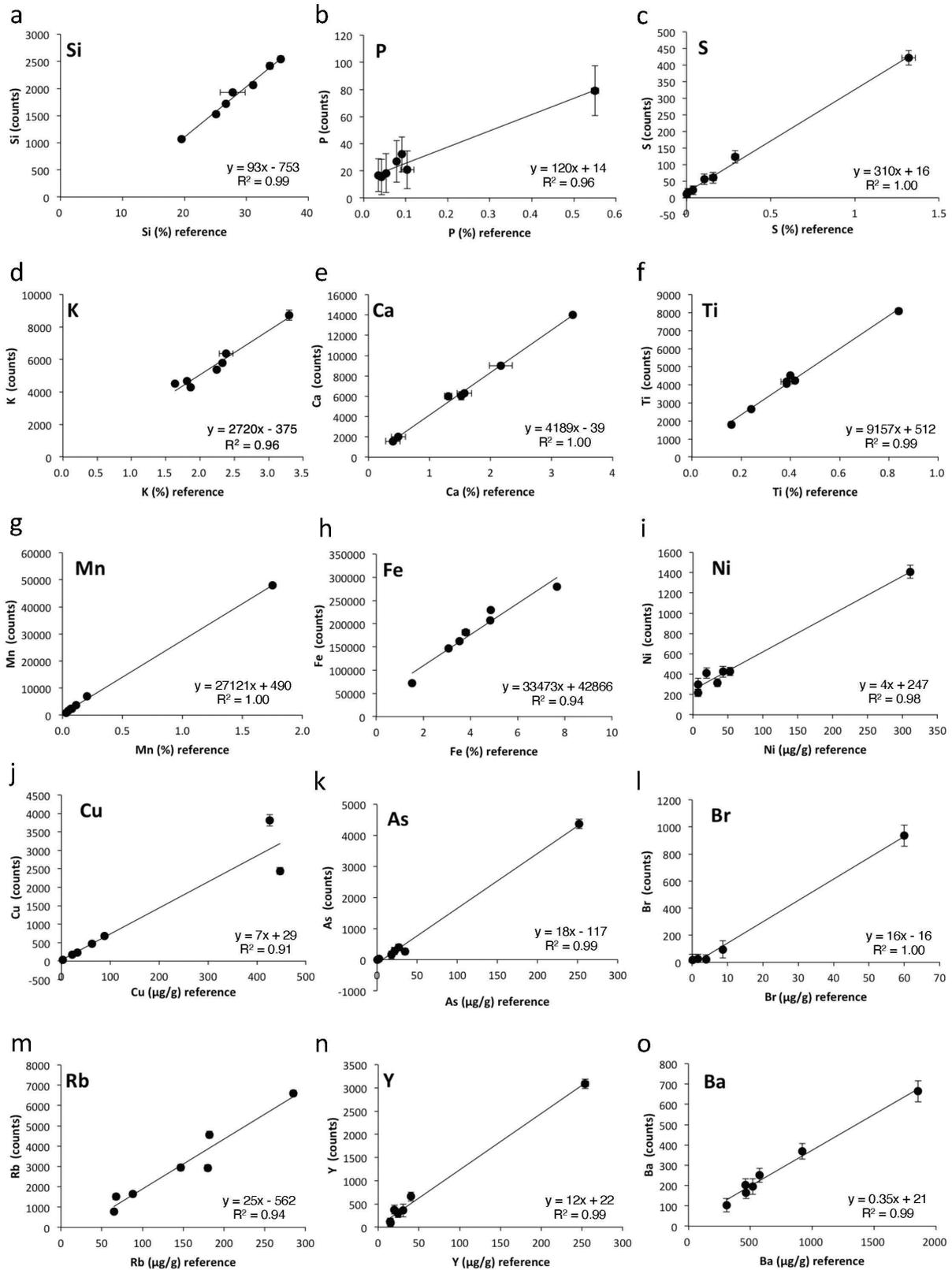


図4 ITRAX のカウント値と濃度の関係。 Seki et al. (2025) より抜粋。

### 3. ITRAX での測定後すぐに元素濃度を推定する方法

上記の内容をふまえて, Seki et al. (2025) で提案された, 高知大学での ITRAX 測定後すぐに元素濃度を推定する手法を解説する (図 5).

まず, 測定日時と X 線管球の種類・電流・電圧を確認する. これは, ITRAX 測定結果の中の「document.txt」ファイルの中に記載されている. X 線管球の種類「Tube」が「Mo」で, 「XRF voltage and current」が「30kV」と「55mA」であれば Seki et al. (2025) と測定条件が同じなので以下の濃度推定手法が使える. 異なる測定条件であった場合は残念ながら以下の手法は使用できない.

測定条件が「Mo」「30kV」「55mA」であれば, 「result.txt」の中の元素ごとのカウント値をしてみる. (もし「カウント値」以外の単位で表示されている場合は, ITRAX に付属している「Q-spec」

というソフトウェアを使用するとカウント値に変換できる.) 最初に, 表 1 を用いて測定誤差を計算する. これで, 誤差範囲内の変動なのか, コア試料の真の変動なのか判断ができるようになる.

測定時の元素選択が Seki et al. (2025) の 27 元素と異なっている場合, 表 1 に記載されている元素が自身のデータに存在しないことがある. その場合, 一致している元素のみを参照しても大きな問題はないと考えられる. 表 1 に存在しない元素に関しては, 別の試料を用いて改めて誤差の評価を行うことが必要であろう (「Q-spec」を使用すると異なる元素選択で結果を再計算することも可能である).

次に, 「document.txt」の中の「XRF exp. time」を確認する. Seki et al. (2025) で示されている標準試料の測定結果は「XRF exp. time」を 10 秒に設定したものである. もし 10 秒以外の設定であれば以下の式によりカウント値を 10 秒の時の値に換算する必要がある. カウント値が「XRF

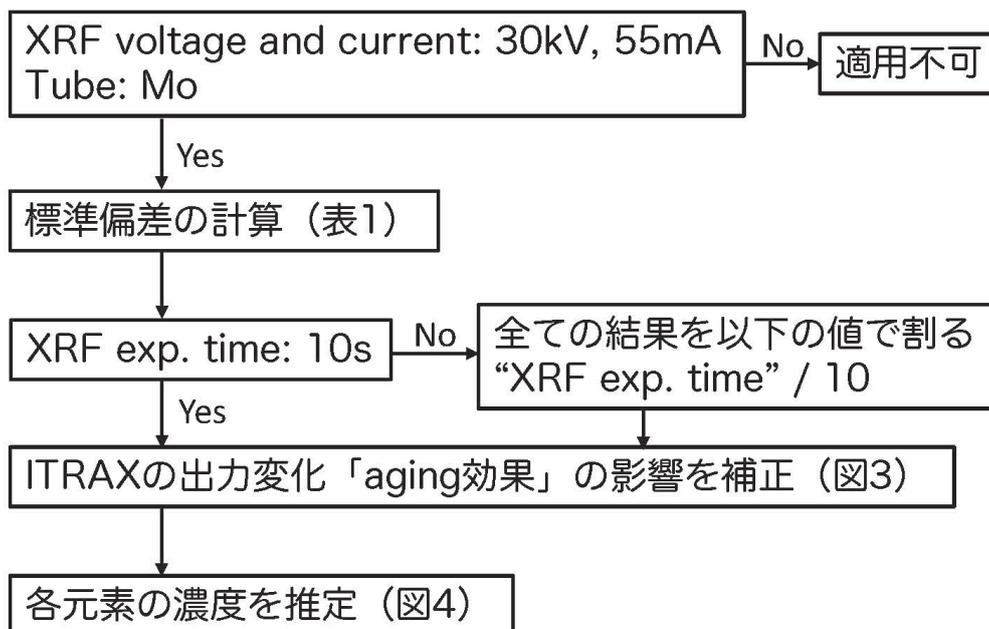


図 5 ITRAX 結果から元素濃度を推定する手法. Seki et al. (2025) を改変.

exp. time」つまり測定時間によって線形に変化することは Seki et al. (2025) によって測定データから示されている。

(換算後のカウント) =

(元のカウント) × 10 / 「XRF exp. time」

この「換算後のカウント」を図 4 に当てはめると、おおよその元素濃度を推定することができる。

前述の通り、この推定はコア試料に含まれる水の影響を無視しているため、軽元素（特に Al や Si）では元素濃度を低く見積もってしまうことに注意が必要である。また、厳密にはコア試料の含水率以外にも粒度や表面状態、組成なども ITRAX を用いた測定結果に影響を与える。したがって、この推定はあくまでも「おおよその」元素濃度の推定であることに注意して使用する必要がある。

上記のような注意点を考慮しても、ITRAX での測定後すぐに元素濃度を大まかに推定できることは、その後の研究の進展に大いに役立つことが期待される。例えば、Br カウント (Seki et al., 2019) を用いて有機化学分析のために必要な試料量を見積もることや、珪質堆積物が優勢である日本海堆積物のような環境から有孔虫などの古環境解析に有用な石灰質微化石が卓越する層準を選び出すことなどが挙げられる。

#### 4. まとめ

本論では、高知大学の ITRAX での堆積物コア試料の測定後すぐにおおよその元素濃度を推定する手法を解説した。この手法は、これまでに高知大学の ITRAX を用いて同じ条件（「Mo」「30kV」「55mA」）で測定された全ての結果に適用できるのみでなく、今後測定される結果についても、定期的に測定されて

いる標準試料の結果を適宜参照することで適用することが可能である。本論では学生など、XRF コアスキャナー測定を初めて行うユーザーを念頭にわかりやすく説明を行うことを重視したため、詳細は Seki et al. (2025) を参照していただければ幸いである。XRF コアスキャナー分析は堆積物コアの半割後すぐに行うことが可能であるため、おおよその元素濃度の推定は、その後の詳細分析の試料採取箇所や試料量を決める際などに活用され、研究の進展に大いに貢献することが期待される。

一方で、今回使用したのは主に日本海堆積物（海底堆積物）のみである。市販の標準試料の分析結果から、他の堆積物（他の海域の海底堆積物や湖底堆積物、河川堆積物など）にも本論で紹介したおおよその元素濃度推定は適用可能であると期待されるものの、今後、実際に様々な試料を分析し、検証を行う必要がある。高知大学の ITRAX ユーザーの皆様には、ぜひ本手法をご活用いただき、適用範囲や改善点などのフィードバックをいただければ幸いである（詳細データが必要な方は筆者までご連絡ください）。

#### 謝辞

本研究は高知大学海洋コア国際研究所共同利用・共同研究（25A065・25B064）のもとで実施されました。また、旅費の一部に公益社団法人東京地学協会の調査・研究助成制度を利用しました。ここに記して謝意を表します。

#### 文献

Croudace, I. W., Rindby, A. and Rothwell, R. G.

- (2006): ITRAX: Description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. *New Techniques in Sediment Core Analysis* (Rothwell, R. G., ed.), 51–63, Geological Society, London. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.04>
- Dunlea, A. G., Murray, R. W., Tada, R., Alvarez-Zarikian, C. A., Anderson, C. H., Gilli, A., Giosan, L., Gorgas, T., Hennekam, R., Irino, T., Murayama, M., Peterson, L. C., Reichart, G. J., Seki, A., Zheng, H. and Ziegler, M. (2020): Intercomparison of XRF core scanning results from seven labs and approaches to practical calibration. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **21**, e2020GC009248. <https://doi.org/10.1029/2020GC009248>
- Hsiung, K. H., Kanamatsu, T., Ikehara, K., Usami, K., Horng, C. S., Ohkouchi, N., Ogawa, N. O., Saito, S. and Murayama, M. (2021): X-ray fluorescence core scanning, magnetic signatures, and organic geochemistry analyses of Ryukyu Trench sediments: turbidites and hemipelagites. *Progress in Earth and Planetary Science*. **8**, 2. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00396-2>
- Katsuta, N., Takano, M., Sano, N., Tani, Y., Ochiai, S., Naito, S., Murakami, T., Niwa, M. and Kawakami, S. (2019): Quantitative micro-X-ray fluorescence scanning spectroscopy of wet sediment based on the X-ray absorption and emission theories: Its application to freshwater lake sedimentary sequences. *Sedimentology* **66**, 2490–2510. <https://doi.org/10.1111/sed.12603>
- Kido, Y., Koshikawa, T. and Tada, R. (2006): Rapid and quantitative major element analysis method for wet fine-grained sediments using an XRF microscanner. *Marrine Geolgy*. **229**, 209–225. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.03.002>
- Kuroda, J., Hagino, K., Usui, Y., Bown, P. R., Hsiung, K. H., Sakai, S., Hackney, R., Saito, S., Murayama, M., Ando, T. and Ohkouchi, N. (2021): Stratigraphy around the Cretaceous-Paleogene boundary in sediment cores from the Lord Howe Rise, southwest Pacific. *GSA Bullentin*. **134**, 1603–1613. <https://doi.org/10.1130/B36112.1>
- Löwemark, L. and Itrax operators (Bloemsma, M., Croudace, I., Daly, J. S., Edwards, R. J., Francus, P., Galloway, J. M., Gregory, B. R. B., Huang, J. J. S., Jones, A. F., Kylander, M., Löwemark, L., Luo, Y., Maclachlan, S., Ohlendorf, C., Patterson, R. T., Pearce, C., Profe, J., Reinhardt, E. G., Stranne, C., Tjallingii, R. and Turner, J. N.) (2019): Practical guidelines and recent advances in the Itrax XRF core-scanning procedure. *Quaternary International*. **514**, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.044>
- Mondal, M. N., Horikawa, K., Seki, O., Nejigaki, K., Minami, H., Murayama, M. and Okazaki, Y. (2021): Investigation of adequate calibration methods for X-ray fluorescence core scanning element count data: A case study of a marine sediment piston core from the Gulf of Alaska. *Journal of Marine Science and Engineering*. **9**, 540. <https://doi.org/10.3390/jmse9050540>
- 中井泉 (2005) : 蛍光 X 線分析の実際. 朝倉書店, 242p.
- Ohlendorf, C., Wennrich, V. and Enters, D. (2015): Experiences with XRF-scanning of

- long sediment records. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores—Applications of a Non-destructive Tool for the Environmental Sciences* (Croudace, I. W. and Rothwell, R. G., eds.), 351–372, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_13)
- Rothwell, R. G. and Croudace, I. W. (2015): Twenty years of XRF core scanning marine sediments: What do geochemical proxies tell us? *Micro-XRF Studies of Sediment Cores—Applications of a Nondestructive Tool for the Environmental Sciences* (Croudace, I. W. and Rothwell, R. G., eds.), 25–102, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_2)
- Seki, A., Tada, R., Kurokawa, S. and Murayama, M. (2019): High resolution Quaternary record of marine organic carbon content in the hemipelagic sediments of the Japan Sea from bromine counts measured by XRF core scanner. *Progress in Earth and Planetary Science*. **6**, 1. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0244-z>
- Seki, A., Tada, R., Kurokawa, S. and Murayama, M. (2025): Correction of X-ray tube aging effects and quantitative estimation of elemental composition using the ITRAX XRF core scanner: A case study of Japan Sea sediments. *Geochemical Journal.*, **59**, 129–143.
- Weltje, G. J. and Tjallingii, R. (2008): Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*. **274**, 423–438. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.054>
- Weltje, G. J., Bloemsa, M. R., Tjallingii, R., Heslop, D., Röhl, U. and Croudace, I.W. (2015): Prediction of geochemical composition from XRF-core-scanner data: A new multivariate approach including automatic selection of calibration samples and quantification of uncertainties. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores—Applications of a Non-destructive Tool for the Environmental Sciences* (Croudace, I. W. and Rothwell, R. G., eds.), 507–534, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_21)