

大阪科学・大学記者クラブ 御中  
(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2023年1月23日  
大阪公立大学

## X線ビームの大きさを数学的に評価することに成功

### <ポイント>

- ◇人の目では見えないX線マイクロビーム<sup>\*1</sup>の、大きさ（ビーム径）を正確に評価することに成功。
- ◇X線ビーム径の新たな評価法を数学的な解析から導出。
- ◇本評価法がX線ビーム径の統一された評価法として広く使用されることが期待。

### <概要>

大阪公立大学大学院 工学研究科の辻 幸一教授、松山 嗣史特任助教、中江 理紀大学院生（大阪市立大学 前期博士課程2年）、理学研究科の伊師 英之教授らの研究グループは、実測したX線マイクロビームの大きさ（ビーム径）の新たな評価法を数学的な解析により導き出し、この評価法が従来と比べてより正確にビーム径を算出できることを明らかにしました。

蛍光X線分析法<sup>\*2</sup>を用いると、試料を壊すことなくさまざまな環境下で元素分析ができ、中でも微小領域における元素分析にはX線マイクロビームが使用されます。X線マイクロビームはビーム径が小さいほどより精度の高い元素分布像を得ることができますが、X線ビームは目で見ることはできません。そのため、実測したビーム径の評価法が必要とされていますが、従来の評価法では誤差が大きいためより正確な評価法が求められています。

本研究で見出した新たな評価法では、従来の評価法に比べてより正確にビーム径を算出することが可能です（図1）。また、現在X線ビーム径の統一された評価法は確立されていませんが、本評価法は数学的な解析に基づいて導出されたものであるため、国際基準規格（ISO）として広く使用されることが期待されます。

本研究成果は、Wiley社が刊行する国際学術誌「X-Ray Spectrometry」のオンライン速報版に、2023年1月9日に掲載されました。

今回の研究成果によって、目に見えないX線ビームの直径を正しく評価できるようになりました。今後、この評価方法が国際基準規格として広く使われ、蛍光X線元素イメージングにおける空間分解能の評価方法が確立されることで、材料開発やバイオイメージングなど幅広い分野の発展に役立つことを期待しています。

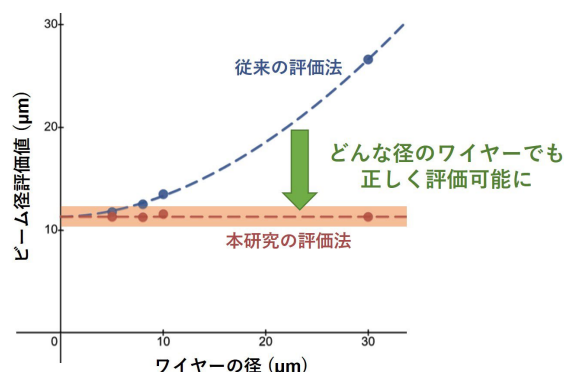
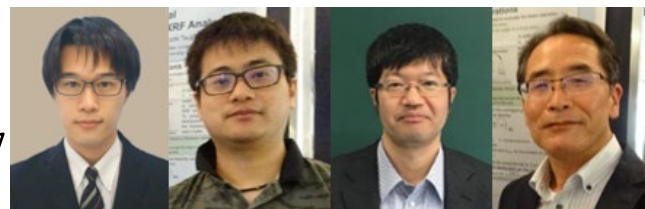


図1 X線ビーム径の評価値がワイヤーの径に依存する様子



左から中江大学院生、松山特任助教、伊師教授、辻教授

## <研究の背景>

X線マイクロビームは、微小部での蛍光X線元素分析や元素イメージングの分野で利用されています。X線ビーム径は、蛍光X線元素イメージングにおける空間分解能<sup>\*3</sup>に直結する非常に重要な実験パラメータですが、X線ビーム径の統一された評価方法は確立されていません。X線ビームは目に見えないため、ビームを横切るように金属細線（ワイヤー）を走査し、ワイヤーから発せられる蛍光X線強度を測定するなどの方法で評価されますが、用いたワイヤーの直径の大きさ（ワイヤー径）によってビーム径の評価値が大きく変わってしまいます。そこで、X線ビームとワイヤーが重なった部分の体積について数学的に考察し、ワイヤー径による影響を正しく補正する新たな評価法を考えました。直交する同一直径の円柱の重なり体積は容易に求めることができますが、異なる直径の2本の円柱の重なり体積を任意の位置関係において求めることが困難でした。そこで、本学理学部数学科と数学研究所が運営する「数学相談室」に相談し、本研究を進めることができました。

## <研究の内容>

X線ビームの強度は、ビーム中心から離れるにつれ正規分布に従って弱くなると仮定されます。図2のように、円柱形のワイヤーをビームに対して走査させるモデルを立て、ワイヤー内でのX線の吸収も考慮しながら任意の径のビームおよびワイヤーの重なり体積を数式で表すことに成功しました。これにより、実測のビーム径を、ワイヤー径を用いて正しく補正する評価法を確立しました（図3）。また、X線ビーム径の評価にはワイヤーの他に、金属エッジ（カミソリの刃など）や太い金属線を用いる方法もあるため、これらの物体を走査した際の重なり体積の計算も行い、ビーム径を補正する評価法をそれぞれ導き出しました。

そして、微小部蛍光X線分析装置を用いて様々な径の金属線でX線マイクロビームの径を実測し、数学的に導出した評価法の妥当性を検証したところ、従来の評価法に比べてより正確にビーム径を算出できることが明らかになりました。

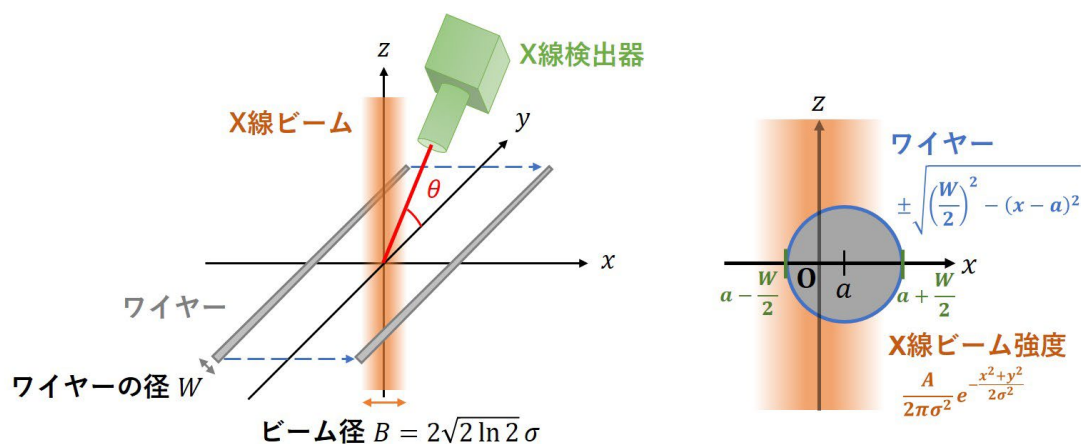


図2 X線ビームとワイヤーの座標

$$\int_{a-\frac{W}{2}}^{a+\frac{W}{2}} dx \int_{-\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - (x-a)^2}}^{\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - (x-a)^2}} dz \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-\left(\mu_{\text{in}} + \frac{\mu_{\text{out}}}{\sin \theta}\right) \left(\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - (x-a)^2} - z\right)} dy$$

$$= \frac{A}{k\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} e^{-\frac{(u+a)^2}{2\sigma^2}} \left(1 - e^{-2k\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - u^2}}\right) du \quad \left(u = x - a, \quad k = \mu_{\text{in}} + \frac{\mu_{\text{out}}}{\sin \theta}\right)$$

図3 吸収を考慮したビームとワイヤーの重なり体積

### <期待される効果・今後の展開>

本研究によって、数学的な解析に基づいた X 線ビーム径評価方法が得られたことで、各種の微小部蛍光 X 線分析装置の基礎的な性能評価が可能となります。今後、この分野の国際標準規格 (ISO) にも関わってくる可能性があるほか、蛍光 X 線分析法の応用として、材料開発、環境分析、法科学、生体試料分析、考古物文化財分析などの発展が期待されます。

### <資金情報>

本研究は、科研費 (基盤研究 B22H02108、若手研究 21K14655)、大阪市イノベーション創出事業経費 2022、および大阪公立大学数学研究所：文科省共同利用・共同研究拠点「数学・理論物理の 協働・共創による新たな国際的研究・教育拠点」JPMXP0619217849 により行われました。また、数学相談室を窓口とし、工学研究科物質化学学生命系専攻と理学研究科数学専攻および数学研究所との共同研究として行われました。

### <用語解説>

- ※1 X 線マイクロビーム…マイクロオーダーの直径を有する X 線ビーム。実験室では各種の X 線集光素子を用いて数十  $\mu\text{m}$  から数  $\mu\text{m}$  の直径を有する X 線ビームが得られている。
- ※2 蛍光 X 線分析法…試料に一次 X 線を照射し、試料中の各原子から発生する二次 X 線 (蛍光 X 線) を測定し、そのエネルギーから元素の種類、強度から元素の存在量を解析する手法。
- ※3 空間分解能…2 つの点を 2 つとして認識できる最小の距離。

### <掲載誌情報>

【発表雑誌】 X-Ray Spectrometry

【論文名】 Mathematical considerations for evaluating X-ray beam size in micro-XRF analysis

【著者】 Masanori Nakae, Tsugufumi Matsuyama, Hideyuki Ishi, Kouichi Tsuji

【掲載 URL】 <http://doi.org/10.1002/xrs.3325>

#### 【取材に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院 工学研究科  
物質化学生命系専攻 化学バイオ工学分野  
物理分析化学研究室  
教授 辻 幸一 (つじ こういち)  
TEL : 06-6605-3080  
E-mail : [k-tsuji@omu.ac.jp](mailto:k-tsuji@omu.ac.jp)

#### 【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課  
担当 : 竹内  
TEL : 06-6605-3411  
E-mail : [koho-list@ml.omu.ac.jp](mailto:koho-list@ml.omu.ac.jp)