

# 卓上形蛍光 X 線元素分析装置 (MESA-500)

## Desktop X-ray Fluorescence Element Analyzer (MESA-500)

吉良 昭道  
Akimichi Kira

### 【要旨】

固体、粉体、液体などあらゆる形態の試料に含まれる元素の量を、非破壊でしかも標準試料を用いることなく、きわめて容易にかつ高精度で分析することができるエネルギー分散形蛍光 X 線分析装置 MESA-500 を開発した。本装置は、永年培ってきたハード・ソフト技術を駆使して、誰れでも簡単に、X 線スペクトル、自動定性、スタンダードレス定量などの高精度分析情報を入手することを可能にした、極めてコンパクトな卓上形蛍光 X 線元素分析装置である。本稿では、測定されたスペクトルデータから蛍光 X 線の強度を算出するスペクトル処理方法、基礎パラメータ法によるマトリックスの補正方法など、どのようにして高精度の定量分析を実現したかについて報告する。

### Abstract

HORIBA has developed the MESA-500 energy dispersive X-ray fluorescence analyzer. This analyzer is capable of extremely easily and accurately analyzing the amount of elements contained in all types of samples (solids, powders, liquids, etc.) in a non-destructive manner and without the need to use standard samples. The MESA-500 is in an extremely compact design, and enables even anybody to easily obtain highly accurate analysis information such as X-ray spectra, automatic qualitative analysis, standard-less quantitative analysis, etc. This paper describes how highly-accurate quantitative analysis has been achieved by methods such as spectrum processing whereby the intensity of fluorescent X-rays is calculated from measured spectrum data, and matrix compensation using fundamental parameter method.

### 1. はじめに

従来、蛍光 X 線分析装置を使って高い精度の定量分析を行うためには、共存元素の影響を少なくするためにガラスビード法\*1のような希釈処理をしなければならず、測定強度が低下するという欠点があった。とくに半導体検出器を使ったエネルギー分散形蛍光 X 線分析装置は、小型で高速の元素分析ができるなど多くの長所がある反面、散乱 X 線を含む広いエネルギー範囲の X 線を同時に検出するため、測定できる蛍光 X 線の強度に限界があり、波長分散形蛍光 X 線分析装置に比べ、定量精度がやや劣る欠点があった。ところが最近、基礎パラメータ法による共存元素影響の補正により、試料の前処理が不要で、小さな励起 X 線源でも十

\*1 ガラスビード法  
粉末試料をホウ酸リチウムなどで加熱融解して均一なガラスにする試料の前処理方法

分な測定強度を得られるエネルギー分散形の優れた特長が活かせるようになった。

当社ではX線管、検出器、高圧電源、高速パルス処理回路、信号回復の演算処理など各要素技術を徹底的に開発・改良し、小型で誰もが手軽に扱え、しかも定量精度の高いエネルギー分散形蛍光X線分析装置MESA-500(図1)を開発した。

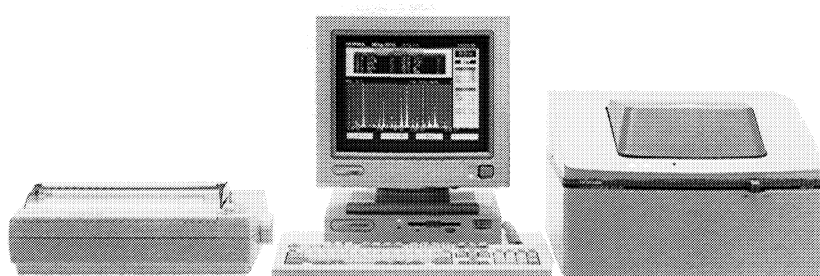


図1 エネルギー分散形蛍光X線分析装置 MESA-500  
Energy dispersive X-ray fluorescence analyzer MESA-500

## 2. エネルギー分散形蛍光X線分析装置

エネルギー分散形蛍光X線分析装置は、検出器自体でX線エネルギーを分離できるため、分光結晶とゴニオメータを用いる波長分散形の蛍光X線分析装置に比べ、試料と検出器の間を極めて短くし、検出立体角を大きくすることができる。このため小さな励起源で十分なX線強度が得られ、装置全体を小型化できる長所がある。また試料表面の凹凸や、励起源－試料－検出器の間隔が多少変わっても、測定スペクトル上のピーク位置や強度にほとんど影響しない。したがって、試料の研磨や粉碎などの複雑な前処理は不要となる。さらに図2に示すように、MESA-500の分析部はゴニオメータのような可動部分がないため、非常に単純・堅牢で故障しにくい構造となっている。これらのさまざまな特長により、エネルギー分散形蛍光X線分析装置は、近年、研究室ばかりでなく品質管理やプロセス制御など幅広い分野に急速に普及している。

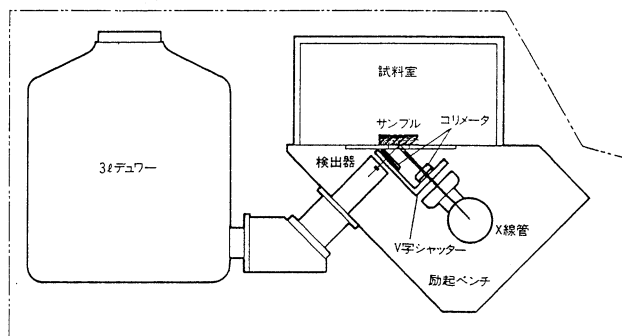


図2 MESA-500の分析部断面図  
Cross-section of MESA-500 analyzer

## 3. MESA-500の特長

「だれもが、いつでも、容易に取扱うことができる高精度な元素分析装置」を命題に開発したMESA-500にはさまざまな特長がある。

- ① NaからUまですべての元素をワンタッチで定量
- ② 固体、液体、粉体試料をそのままの形で前処理なしに測定
- ③ 各種の保護機構による人にも装置にもやさしい安全操作(X線発生時の自動停止、真空モニターと連動したシャッター、真空解除のスローリークなど)
- ④ 試料に応じて真空度、X線管の電圧・電流などを自動的に最適条件に設定
- ⑤ 標準試料が不要
- ⑥ 分析時のみ液体窒素を供給すればよい

図3にMESA-500のシステム構成を、表1に主な仕様を示す。

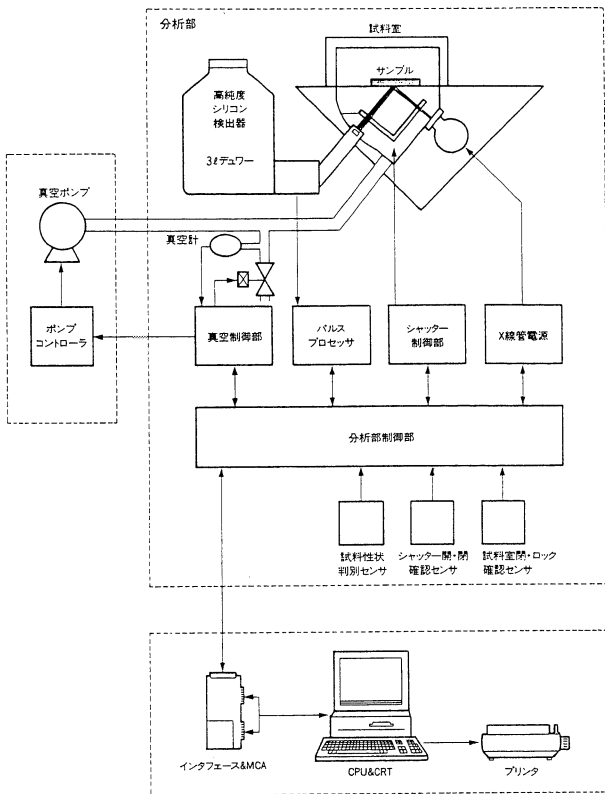


図3 MESA-500のシステム構成  
System configuration of MESA-500

試料形状	最大径 φ150mm~φ125mm (試料厚により変化) 最大厚 75mm
試料室雰囲気	大気、真空
照射面積	φ5mm
X線管ターゲット	Rh (ロジウム)
X線管電圧	①15kV ②50kV
X線管電流	1~500 μA (15kV) 1~240 μA (50kV)
検出器	高純度シリコン検出器XEROPHY
デューワ容量	3リットル
液体窒素消費量	1リットル/日 以下
定性分析	自動定性およびマニュアル
定量分析	(1) 基礎パラメータ法 ①スタンダードレス ②一点校正 (2) 検量線法
測定条件設定	(1) 電圧: 15kV, 50kV 全自動2段切り換え (マニュアル可能) (2) 電流: 自動調整 (マニュアル可能)
プログラム機能	操作手順の記憶により任意の自動操作可能
コンピュータ	IBM-PC/AT互換機 32ビット, 40メガバイトハードディスク, 3.5インチフロッピーディスクドライブ OS: DOS/V
プリンタ	インパクトドットマトリックス式プリンタ、黒色印字
外部出力	RS-232C
周囲温度	10~35℃
周囲湿度	20~80% (相対湿度)
電源	AC100, 120, 220, 240V±10%, 50/60Hz, 1kVA (ユーティリティとしてアース付コンセントが2個必要です)
外形寸法	分析部 450 (W) x 600 (D) x 295 (H) mm ポンプ 265 (W) x 350 (D) x 305 (H) mm
重量	分析部 約55kg ポンプ 約13kg

表1 MESA-500の仕様  
MESA-500 specifications

以下に、MESA-500の特長を生み出している要素技術について詳しく述べる。

#### 4. 超高純度シリコン検出器

MESA-500には超高純度シリコン検出器を用いている。従来、シリコン半導体検出器には、高純度のシリコン単結晶にリチウムをドーピングして不純物を補償したものを用いていた。近年、当社では、補償の必要がない超高純度のシリコン単結晶を使用した半導体検出器XEROPHYを開発・製品化した<sup>1)</sup>。本検出器の特長は、使う時だけ液体窒素で冷却すればよく、保管時には冷却しておく必要がない点で、エネルギー分散形X線検出器がフィールドでより広く使われるようになった原動力の一つである。

## 5. 自動定性分析

従来の蛍光X線分析装置では、測定スペクトルのピーク位置と、あらかじめ分析装置に記憶させておいた元素ごとの蛍光X線エネルギー位置とを照合し、試料中の元素を判断してきた。ところが、結晶試料の場合に生じる回折ピーク、X線管ターゲット材料の特性X線の散乱ピーク、他の元素の蛍光X線などが目的元素の蛍光X線のピークと重なり、元素の決定が困難な場合も少なくない。このような場合には、ピークの半値幅や強度比率などX線エネルギー位置以外についても考慮する必要があり、装置および試料に対する分析者の知識に依存する割合が高いものであった。

MESA-500では、誰もが簡単に定性分析できるようにするため、次のように自動的に元素を判断し表示するようにした。

- ① NaからUのすべての元素に対して、その蛍光X線エネルギー位置と測定スペクトルのピーク位置との一致度を、単なるON/OFFではなく、0から100までの数値(M)として算出する。
- ② Mは、測定ピークの大きさ、測定ピーク位置と蛍光X線エネルギー位置との差、および蛍光X線の強度比率による重みを考慮して演算する。
- ③  $M \geq a$  で確実に存在すると判断できる元素を(○)、 $a > M \geq b$  で存在が微妙な元素を(?)と表示。なお、aとbの値は各元素ごとに経験的に設定。

このような独特の判断操作の自動化によって、だれでも一定の正確度で定性分析ができるようになった。

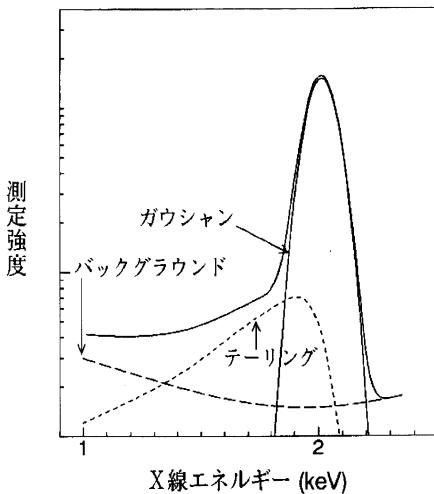


図4 シリコン検出器のエネルギー応答関数  
Energy response function of a silicon detector

ガウシアン :  $\exp\{-[E-E_p]^2/(2\sigma^2)\}$   
 バックグラウンド :  $a_0+a_1 \cdot E+a_2E^2$   
 テーリング :  $\exp\{(E-E_p)/(B\sigma)\}[1-\text{erf}\{(E-E_p)/(\sigma\sqrt{2})+1/(B\sqrt{2})\}]$

\*2 遷移確率1%以上の蛍光X線  
 (K $\alpha_1$ , K $\alpha_2$ , K $\beta_1$ , K $\beta_3$ , K $\beta_5$ ,  
 K $\beta_2$ , L $\alpha_1$ , L $\alpha_2$ , L $\gamma_1$ , L $\gamma_2$ , L $\gamma_3$ ,  
 L $\beta_6$ , L $\beta_{15}$ , L $\beta_7$ , L $\beta_5$ , L $\beta_1$ , L $\gamma_1$ ,  
 L $\gamma_5$ , L $\gamma_8$ , L $\beta_3$ , L $\beta_4$ , L $\gamma_2$ , L $\gamma_3$ ,  
 M $\alpha_1$ , M $\alpha_2$ , M $\xi_1$ , M $\xi_2$ , M $\beta$ , M $M_4$ -  
 $\alpha_2$ , M $M_3$ -N $1$ , M $M_3$ -N $4$ , M $\gamma$ , M $M_3$ -O $1$ ,  
 M $M_4$ -O $2$ , M $M_3$ -O $4,5$ , M $M_2$ -N $4$ , M $M_1$ -N $2$ ,  
 M $M_1$ -N $3$ )

## 6. スペクトル処理

エネルギー分散形の蛍光X線分析装置のエネルギー分解能は、重なりあった測定ピークを分離するには必ずしも十分なものではないときがある。このような場合は蛍光X線のピークの重なりやバックグラウンドを分離するスペクトル処理が非常に重要となる。

蛍光X線だけを分離抽出し測定精度を向上させるためには、物理定数(蛍光X線のピーク位置、蛍光X線の発生確率、吸収端位置など)、装置定数(検出器のエネルギー分解能、X線管電圧、X線管ターゲット材料など)、および波形情報(バックグラウンドとピークの関数形などをあらかじめ設定して使用することが必要となる。

### 6.1 波形情報

シリコン検出器のエネルギー応答関数として、図4に示すように、ピークはガウシアンおよびテーリング<sup>2)</sup>の式で、バックグラウンドは2次式で近似させた。ピークには、ASTM Data Series DS 46<sup>3)</sup>に記載の蛍光X線の内、遷移確率1%以上のもの\*2をすべて考慮した。

### 6.2 スペクトル処理の手順

最初に、検出器に入射したX線の一部が、そのエネルギーより1.74keV(シリコンの蛍光X線エネルギー)低いエネルギーのX線として計測されるエスケープピークに対し、スペクトル上での減算と加算により補正を行う。エスケープ処理を行ったスペクトルに対して、蛍光X線のピークの重なりやバックグラウンドを分離して、蛍光X線の正味の強度を抽出する。このピーク分離は以下に述べる2段階で行う。

### 6.2.1 ピーク分離の初期値算出

最初に、ピーク分離の初期値を算出する。一つの元素に対して、 $K\alpha_1$ 、 $K\alpha_2$ 、 $K\beta_1$ などのピーク強度比率を固定した波形を作成しておく。測定スペクトルを、いくつかの元素の波形とバックグラウンドの合成として、最もよく一致するように線形の最小2乗法により各元素の比率を求め、初期値とする。

### 6.2.2 非負拘束非線形最小2乗法によるピーク分離

次に、この初期値を使い、定量計算に必要なピークに絞って、ピーク分離を行う。図5のPtとAuを含む試料の測定スペクトル例では、 $PtL\alpha_1$ 、 $L\alpha_2$ 、 $L\eta$ と $AuL\alpha_1$ 、 $L\alpha_2$ に絞り込む。フィッティング範囲も狭くする。初期値算出の場合には、一つの元素のピーク間の強度比率は遷移確率で固定していたが、ここでは非負の制約付きの可変にする。最小2乗法は非線形となり、Marquardt法<sup>1)</sup>による繰り返しの収束計算で解を求めている。それぞれの蛍光X線強度が求められた後、 $L\alpha_1$ と $L\alpha_2$ は合わせて $L\alpha$ 強度とし、また $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ は合わせて $K\alpha$ 強度として、定量計算に使う。

## 7. 基礎パラメータ法

基礎パラメータ法(Fundamental Parameter Method:FPM)によるマトリックス補正は、スペクトル処理により算出した測定強度とシミュレーション強度とが一致するように試料組成を求める計算である。シミュレーション強度は、X線管と試料との距離や試料に照射されるX線の角度などの装置定数、蛍光X線の発生する確率などの物理定数、測定試料の組成などから、共存元素による吸収効果と2次励起効果を計算して求める。

この計算は、最終的に求めるべき試料の組成が必要であることから、初期値の仮定から始めて、順次収束させていく繰り返し演算となる。計算に必要な物理定数は、1次X線<sup>5) 6)</sup>、質量吸収係数<sup>7)</sup>、蛍光X線エネルギー<sup>3)</sup>、遷移確率<sup>6) 8)</sup>、蛍光収率<sup>8)</sup>、ジャンプファクター<sup>8)</sup>などである。収束演算の方法は、N.Brollが1986年に提案した基礎係数法<sup>8)</sup>を採用した。図6にFPMの計算フローを、計算式を(1)式に示す。

$$C_i = R_i \times (1 + \alpha_{ij} \times C_j + \alpha_{ik} \times C_k + \dots) \quad \dots\dots(1)$$

$$R_i = \frac{P_i + \sum_j S_{ij}}{P_{i,1}}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{qE_i C_i \int_{\lambda_{abs,i}}^{\lambda_0} \left\{ \frac{\mu_{i,\lambda} I_{\lambda}}{\mu_{s,\lambda} + A\mu_{s,\lambda}} \left( \frac{\mu_{j,\lambda} + A\mu_{j,\lambda}}{\mu_{i,\lambda} + A\mu_{i,\lambda}} - 1 \right) \right\} d\lambda}{P_i}$$

$$- \frac{S_{ij}/C_j}{P_i} \times \frac{qE_i C_i \int_{\lambda_{abs,i}}^{\lambda_0} \frac{\mu_{i,\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\mu_{i,\lambda} + A\mu_{i,\lambda}}}{P_i + \sum_j S_{ij}}$$

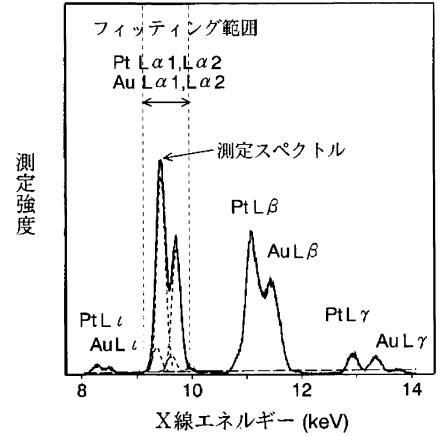


図5 非負拘束非線形最小2乗法によるピーク分離の例  
Example of deconvolution by negative restriction/non linear least square fitting

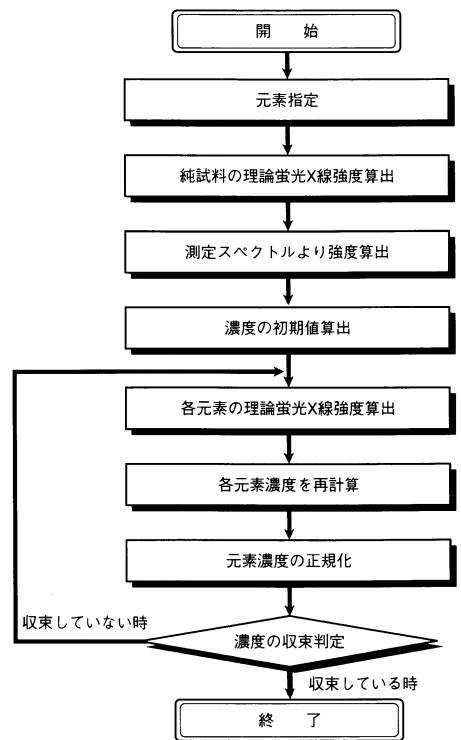


図6 FPMの計算フロー  
Flow of calculation of FPM

$$P_i = q E_i C_i \int_{\lambda_{abs, i}}^{\lambda_0} \frac{\mu_{i, \lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\mu_{s, \lambda} + A \mu_{s, \lambda i}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} q E_i C_i \int_{\lambda_{abs, j}}^{\lambda_0} E_j C_j \mu_{i, \lambda_j} L \frac{\mu_{j, \lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\mu_{s, \lambda} + A \mu_{s, \lambda i}}$$

$$L = \frac{\ln\left(1 + \frac{\mu_{s, \lambda} / \sin \psi_1}{\mu_{s, \lambda_j}}\right)}{\mu_{s, \lambda} / \sin \psi_1} + \frac{\ln\left(1 + \frac{\mu_{s, \lambda i} / \sin \psi_2}{\mu_{s, \lambda_j}}\right)}{\mu_{s, \lambda i} / \sin \psi_2}$$

$$A = \frac{\sin \psi_1}{\sin \psi_2}$$

$$q = A \times \frac{d\Omega}{4\pi}$$

$$\mu_{s, \lambda} = \sum_i C_i \mu_{i, \lambda} \quad \mu_{s, \lambda i} = \sum_i C_i \mu_{i, \lambda i}$$

- $R_i$  …純試料を基準とした元素  $i$  の蛍光 X 線  $\lambda_i$  の強度比
- $\alpha_{ij}$  …共存元素影響係数
- $C_i$  …  $i$  元素の質量分率
- $P_{i, 1}$  …純試料の場合の元素  $i$  の蛍光 X 線  $\lambda_i$  の強度
- $P_i$  …元素  $i$  の蛍光 X 線  $\lambda_i$  の 1 次励起蛍光 X 線強度
- $S_{ij}$  …元素  $j$  の蛍光 X 線  $\lambda_j$  による  $\lambda_i$  の 2 次励起蛍光 X 線強度
- $\psi_1, \psi_2$  … 1 次 X 線入射角度, 蛍光 X 線検出角度
- $E_i$  …励起ファクター(各蛍光 X 線  $\lambda_i$  に固有の値)
- $\mu_{s, \lambda}$  … 1 次 X 線  $\lambda$  に対する試料  $S$  の質量吸収係数
- $\mu_{s, \lambda i}$  … 蛍光 X 線  $\lambda_i$  に対する試料  $S$  の質量吸収係数
- $\mu_{i, \lambda}$  … 1 次 X 線  $\lambda$  に対する元素  $i$  の質量吸収係数
- $I_{\lambda}$  … 1 次 X 線強度
- $\lambda_0$  … 1 次 X 線の最も高いエネルギー
- $\lambda_{abs, i}$  … 元素  $i$  の蛍光 X 線  $\lambda_i$  に対応する吸収端エネルギー

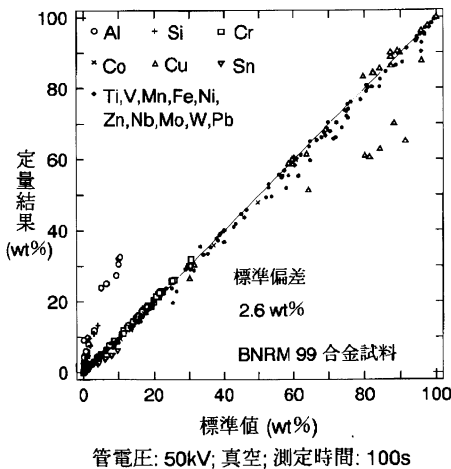


図7 BNRM合金99のスタンダードレス定量:  
1次X線線質補正前  
Standard-less quantity analysis of  
BNRM99 alloy: before correcting primary  
X-ray

## 8. 1次X線の線質の補正

X線管から出射される1次X線は、連続X線と特性X線からなり、それらのエネルギー分布によって各元素の励起効率が大きく異なる。このため、シミュレーション計算に使用する1次X線の線質と、実際の装置から発生するそれとの一致が重要となる。

最初に、Pellaらが提案したもの<sup>5)</sup>に、NBSのFrame C<sup>6)</sup>に基づいて特性X線の種類を増やした1次X線を使った。BNRM合金99試料のスペクトルに対して、この1次X線を使った基礎パラメータ法による、感度合わせなどの校正を一切せずに行ったスタンダードレス定量結果を図7に示す。この図には900点近いデータが記載されているが、Al, Cu, Snなどに誤差が目立つ。とくに、AlやSnなどの原子番号の離れた元素が比較的多く共存している銅合金の誤差が大きい。

この原因として1次X線の線質以外に装置定数と物理定数の誤差も考えられるが、これらをすべて1次X線の線質補正のみで補償できるかどうかを試みた。つまり、蛍光X線のシミュレーション強度が実際の測定強度と一致するように、1次X線を補正した。

この補正後の1次X線を使ったスタンダードレス定量結果を図8に示す。Al, Cu, Snなどの誤差が少なくなり、標準偏差は0.39wt%と定量精度が大幅に向上した。

### 9. 複数条件FPM

MESA-500では、さらに精度を向上させるため、一つの試料をX線管の管電圧を変えて測定し、得られた複数データから、より正確な定量結果を出すように工夫している。この方法は、元素の検出感度とその原子番号と励起X線エネルギーにより大きく異なることから、軽元素と重元素が共存するような試料では、1つの管電圧だけではどちらかが不十分な測定になることを回避した巧妙な手法である。

例えばAlのような軽元素と、Cuのような比較的原子番号の大きな元素が共存している試料の場合、Alの精度を上げるために管電圧を低くすればCuの精度が下がり、反対にCuの精度を上げるために管電圧を高くするとAlの精度が下がる。そのため、すべての元素の定量結果を情報とする基礎パラメータ法による定量計算では、どうしても全体の精度低下を招いていた。

そこで、複数の管電圧による測定データから互いの共存元素影響を計算する複数条件FPM(図9)を開発し、定量精度を向上させた<sup>9)</sup>。

以下に、この手法によって定量精度が向上することを計算とデータで示す。

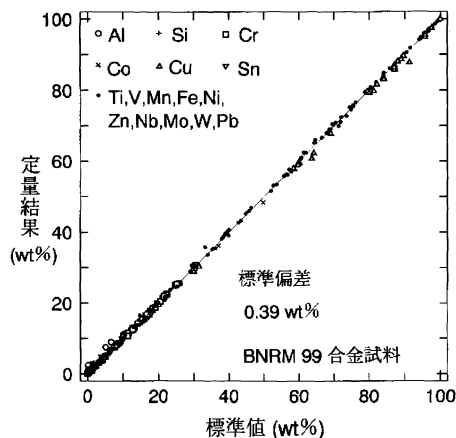


図8 BNR99合金99のスタンダードレス定量：1次X線線質補正後 Standard-less correcting of BNR99 alloy: after correcting primary X-ray

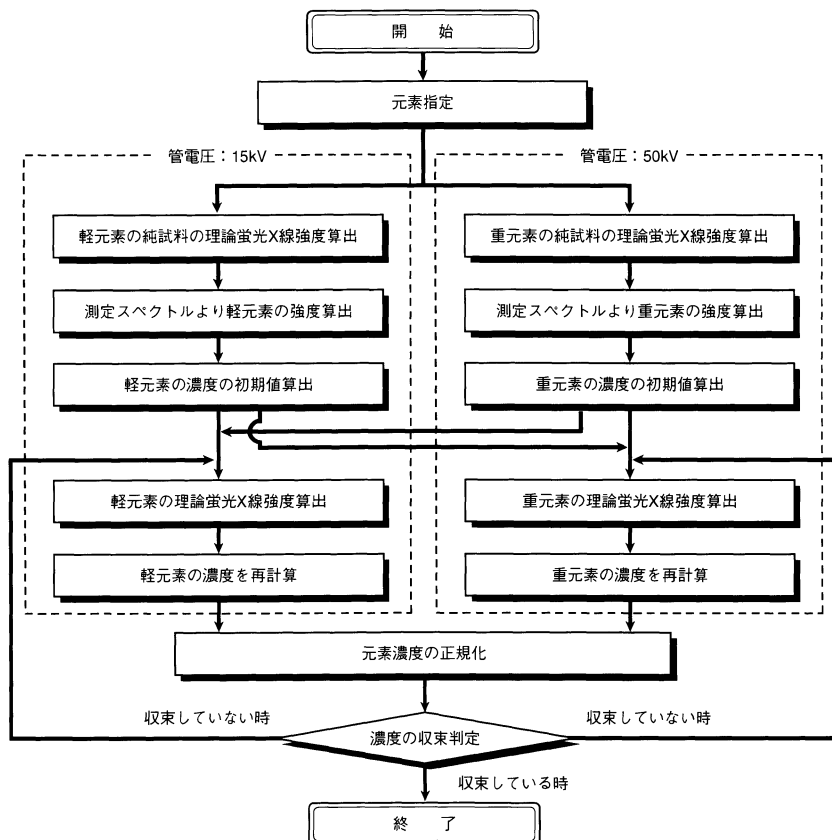


図9 管電圧自動切換によるFPMの計算フロー Flow of calculation of FPM by automatic switching of tube voltage

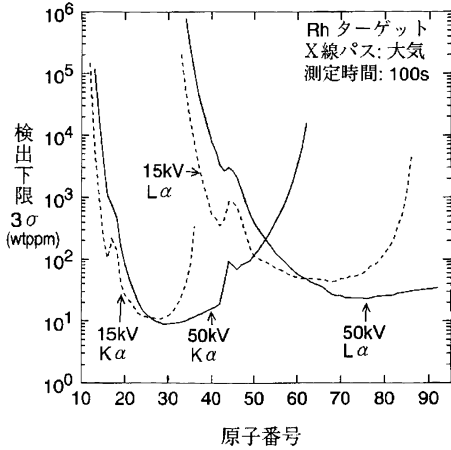
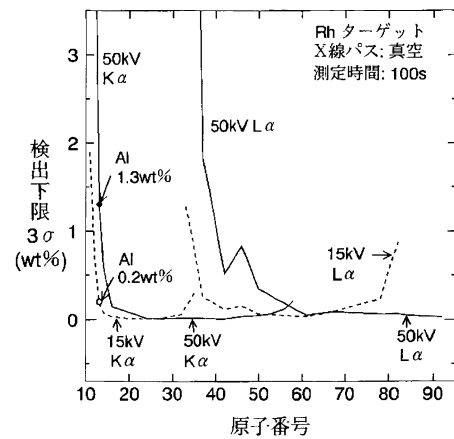


図10 水溶液試料の検出下限(計算値)  
Lower detection limit of water-soluble sample (calculated value)  
15/50kV:管電流で同じDT%に調整



他の蛍光X線, 同析等のピークと重ならない場合の計算

図11 合金試料の検出下限(計算値)  
Lower detection limit of alloy sample (calculated value)  
15/50kV:管電流で同じDT%に調整

### 9.1 管電圧と検出下限の関係

図10は水溶液試料を, 管電圧15kVと50kVで測定したときの検出下限の計算値を示している. それぞれの管電圧で適切な計数率となるように, 管電流を調整しており, 管電圧15kVの管電流は50kVの約20倍である. 原子番号が20番までの元素の場合は, 管電圧15kVの方が50kVよりも1桁程度検出下限が良い, 逆に30番以降の元素は50kVの方が1桁から2桁検出下限が良い.

図11は, 銅合金試料の場合の検出下限の計算値である. 同様にそれぞれの管電圧で適切な計数率となるように, 管電流を調整している. 管電圧15kVと50kVとでは管電流は10倍程度異なる. 50kVの場合のAlの検出下限は1.3wt%, 15kVの場合の検出下限は0.2wt%と約6倍の差がある.

### 9.2 管電圧とスタンダードレス定量精度

MBH社のチタン合金14試料を, スタンダードレスで定量した結果を図12に示す. AlとSnが共に比較的高濃度で含まれているため, 複数条件FPMの効果がよく現れる試料である. 管電圧15kV, 50kV, 自動の3通りで各100秒測定した. ただし, 管電圧自動の場合は, 50kVで50秒後15kVで50秒測定の複数条件FPMである.

標準偏差は, 15kVが1.0wt%, 50kVが0.43wt%, 管電圧自動が0.26wt%と定量精度が良くなることが示されている.

図13にBNRM合金99試料を管電圧自動でスタンダードレス定量した結果を示す. 軽元素のAlを含む試料が少ない試料系であるにもかかわらず, 標準偏差は0.35wt%と精度が向上している.

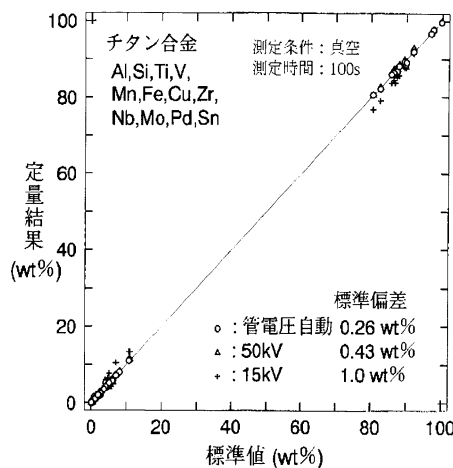


図12 MBH社のチタン合金(101P)のスタンダードレス定量結果(1次X線質補正後)  
Standard-less determination of MBH Analytical Ltd. titanium alloy (101P): after correcting primary X-ray

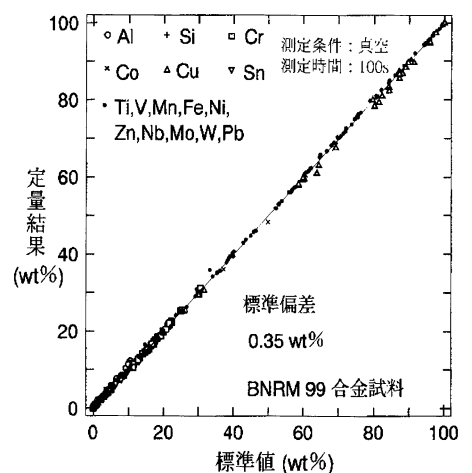


図13 BNR合金99のスタンダードレス定量結果(管電圧自動切換)  
Standard-less determination of BNR alloy (99): automatically switched of X-ray tube



## 10. まとめ

MESA-500で実行している定量演算の内容を具体的に説明し、複数条件のFPMにより定量精度が向上することを示した。これは演算だけの問題ではなく、管電圧の安定性、試料と管電圧により500倍まで変化する管電流の比率の正確さ、パルス処理のデッドタイム補正の正確さなどのハード技術の進歩があつて初めて実現したものである。蛍光X線の測定強度は共存元素の濃度を含む多くのパラメータによって影響を受けるが、パソコンのメモリー容量と処理スピードの向上によって、それらすべてを演算処理できるようになり、操作の簡単化と高精度化が実現した。励起源、光学系、検出器などのハード技術は、着実に進歩している。演算処理の高度化とあいまって、簡単、小型、高精度をキーワードに、蛍光X線分析装置は今後ますます身近なものになっていくものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 新井重俊 “超高純度シリコンX線検出器(ゼロフィー)” Readout-HORIBA Technical Reports-, No.2, p.49-56(1991).
- 2) M. Krumrey, E. Tegeler and G. Ulm “Complete characterization of a Si(Li) detector in the photon energy range 0.9-5keV” Rev. Sci. Instrum. 60 (7), July p.2287 (1989).
- 3) G.G. Johnson, Jr., and E.W. White “X-RAY EMISSION WAVELENGTHS AND KEV TABLES FOR NONDIFFRACTIVE ANALYSIS” ASTM Data Series DS 46 (1970)
- 4) 栗屋隆 “データ解析：アナログとデジタル” 学会出版センター (1985) p.130-135.
- 5) P.A. Pella, Liangyuan Feng and J.A. Small “An Analytical Algorithm for Calculation of Spectral Distributions of X-Ray Tubes for Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis” X-RAY SPECTROMETRY, VOL. 14, NO.3, p.125 (1985).
- 6) R.L. Myklebust, C.E. Fiori and K.F.J. Heinrich “Frame C: A Compact Procedure for Quantitative Energy-Dispersive Electron Probe X-ray Analysis” National Bureau of Standards Technical Note 1106, 111 pages (Sept. 1979).
- 7) Tran Phuc Thinh, Jean Leroux “New Basic Empirical Expression for Computing Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients” X-RAY SPECTROMETRY, VOL.8, NO.2, p.85 (1979).
- 8) N. Broll “Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis. Theory and Practice of the Fundamental Coefficient Method” X-RAY SPECTROMETRY, VOL.15, P.271-285 (1986).
- 9) A. Kira, Y. Okada, M. Pohl, “A New Development in Energy Dispersive X-ray Fluorescence” PITTCON '93 (USA).



吉良 昭道

Akimichi Kira

製品開発部 係長  
1974年入社  
X線分析装置の開発企画に従事