技術論文

飛行時間型質量分析計への画像検出法導入による同位体比測定 におけるダイナミックレンジの向上

片山 淳^{®1}, 古川 勝敏¹, 渡部 和男¹

Introduction of imaging detection into a time-of-flight mass spectrometer
to improve the dynamic range in the isotope ratio measurement

Atsushi KATAYAMA¹, Katsutoshi FURUKAWA¹ and Kazuo WATANABE¹

¹ Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

(Received 30 January 2003, Accepted 22 April 2003)

An imaging ion-detection system was introduced to a time-of-flight mass spectrometer (TOFMS) in order to increase the dynamic range in isotope ratio measurements. The new detection system utilizes a position-sensitive micro channel plate (MCP) with a phosphor plate and a CCD camera which records light spots on the MCP. Mass discriminated ion beams produced by laser resonance ionization were swept on the surface of the MCP by a time-dependent electric field located in front of the MCP. The resulting light spots were recorded as images by the CCD camera. A mass spectrum was obtained from the images. The present method was applied to an isotope analysis of calcium. A dynamic range of more than 5 orders of magnitude was achieved.

Keywords : resonance ionization; time-of-flight mass spectrometer; isotope ratio measurement; imaging detection.

1 緒 言

原子炉の運転寿命は一般に 30～40 年程度と見込まれており、日本においても原子炉の老朽化による廃止措置が重要な問題となりつつある。廃止措置に伴う原子炉の解体の際には、生体遮へいコンクリートをはじめとする大量の放射性廃棄物が発生する。これら放射性廃棄物は、含まれる種々の放射性核種の濃度を測定した後、適切な処分を行わなければならない。放射化コンクリート中の放射性核種のうち、⁴¹Ca は半減期が 1.0×10^5 年と長く、低エネルギーの X 線 (3.6 keV)¹⁾ のみを放出する。X 線の自己吸収が大きいことに併せて ⁴¹Ca 濃度が既知の標準試料を入手が困難であることから、⁴¹Ca は X 線スペクトル測定法による定量が難しい核種である²⁾。そのため X 線測定法による ⁴¹Ca 測定値の正確さの検証のためにも、より正確な ⁴¹Ca

測定法の確立が望まれている。

同位体比を測定する質量分析法は、標準物質の入手が困難な場合にあってもより正確な ⁴¹Ca の測定が期待できる。しかし、質量分析法による同位体比測定においては ⁴¹Ca の同重体である ⁴¹K や ⁴⁰CaH による干渉を取り除かなければならないため、感度についてはもとより高度な分離操作法や元素選択性の高い測定法を開発しなければならない。

共鳴電離質量分析法 (RIMS) は、Hurst³⁾⁴⁾ や Letokhov⁵⁾ らの先駆的な基礎研究により、1980 年代にほぼ確立され、「1 原子検出」³⁾ を可能とする高感度分析法として認められるようになった。高い感度と元素選択性を有することから、宇宙化学や地球科学の分野⁶⁾、そして原子力分野⁷⁾⁸⁾ における放射性核種の計測において応用されている。Wendt らは、高分解能のダイオードレーザーを励起光源に用い、odd-even 効果により奇数質量の ⁴¹Ca と ⁴³Ca を同位体選択的にイオン化する励起スキームを選ぶことによって、主要な同位体 ⁴⁰Ca (96.941%) と極微量同位体の ⁴¹Ca にお

¹ 日本原子力研究所：319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根
2-4

Fig. 1 Schema for the experimental set up

るアバダンス感度 (1 amu の質量差で得られるダイナミックレンジ⁹⁾¹⁰⁾の限界を解決した¹¹⁾¹²⁾。結果として、加速器質量分析装置のレベルにまで達する 10^{12} の同位体選択性を実現しているが、分析法としては以下に示すとおり幾つかの難点を持っている。1) 励起用の高分解能ダイオードレーザー 3 台と自動イオン化レベルに励起するための炭酸ガス又はアルゴンガスレーザー 1 台、システムとして計 4 台のレーザーの波長と強度そして原子源を安定して運転しなければ正確な同位体比 ($^{41}\text{Ca}/^{43}\text{Ca}$) は得られない。2) 他の元素への拡張には、それぞれ十分な分光学的検討が必要であり、odd-even 効果の利用については同位体比を求めるのに都合のよい同位体 (^{41}Ca の場合は ^{43}Ca) が存在しなければならない、などの点である。

現在、著者らは、放射性廃棄物の計測に必要なレベル、すなわち先の同位体選択性で表せば 10^7 レベルでの ^{41}Ca 計測感度と他の放射性核種分析にも適用可能な簡便な測定システムの構築を目指している。そこでイオン化光源には波長可変パルスレーザー 1 台を用い、生成イオンの質量分析にはパルスレーザーとの組み合わせでは最も感度の高い飛行時間型質量分析装置 (TOFMS) を採り入れた。この測定システムについて検討した結果、計測に使うデジタルオシロスコープ (DSO) の基本となる (1 回の測定事象における) ダイナミックレンジが 8 ビットしかないため、やはり ^{40}Ca の強い信号の影響をどのように解決するのが課題となった。理想的な解決法としては、12 ビット以上のダイナミックレンジを持つ A/D コンバーターの利用であるが、TOF スペクトルの忠実な記録には GHz 以上の時間分解能が必要であり¹⁰⁾、現在これを満たす製品は存在しない。その他に考えられる解決法はイオン化事象ごとのイオン量を減らし、積算又は平均化処理を増やすことである。しかし、レーザーの発振周期に限界があるため、この

解決法は非常に長い測定時間を必要とする¹⁰⁾¹³⁾。

そこで、本研究では A/D コンバーターによらないイオン計測法を採り入れることで、この基本的なダイナミックレンジの問題の解決を試みた。画像検出法は、時間情報や空間情報を検出器上の位置情報に置き換え、そのとき得られる画像情報から計測・観測対象の解析を行う方法であり、化学反応動力学¹⁴⁾¹⁵⁾や表面分析¹⁶⁾の分野で種々の応用が行われている。計測装置としては、ストリークカメラがその代表である¹⁷⁾。そこで本稿では、TOFMS 中を飛行するイオンの質量情報、すなわち飛行時間情報を検出器上で画像化することで、同位体比測定におけるダイナミックレンジ改善の可能性について検討を行った結果について報告する。

2 実 験

2.1 装 置

分析装置は、当研究室で設計・製作した TOFMS、共鳴イオン化用の YAG-色素レーザー及び画像検出用の検出器・CCD カメラから構成される。その装置の概要を Fig. 1 に示す。

2.1.1 試料の原子化及びイオン化 イオン化の分析検討用試料として天然同位体組成 (^{40}Ca : 96.941%, ^{42}Ca : 0.647%, ^{43}Ca : 0.135%, ^{44}Ca : 2.086%, ^{46}Ca : 0.004%, ^{48}Ca : 0.187%) の Ca (和光純薬製、粒状 Ca 金属純度 98% 又は酸化 Ca 純度 98%) をそのまま用いた。小型のタンタル製するつぼ (内径 $\phi 3$ mm) 又は V 字形の溝を中心につつまレニウムフィラメントに Ca 試薬を 0.5 又は 0.1 mg を装填し、通電加熱により 800 K 以上に加熱して Ca 原子を発生させた。Ca 原子は YAG レーザー励起の色素レーザー (ホヤコンティニウム製、SureliteII 及び ND-60、発振周期 10 Hz) を用いて共鳴イオン化した ($2\omega + \omega$,

600.123 nm)¹⁸⁾. るつばやフィラメントから発生する熱イオンは, これらのキャップにサブレッサー電位 (+20 V) をかけることで除去した.

2・1・2 質量分析装置 質量分析装置は, 当研究室で設計・製作した Wiley-McLaren 型¹⁹⁾の直線型飛行時間型質量分析装置を使用した (ドリフト空間 2.5 m, $M/\Delta M = 500$). ドリフト空間にはアインツェルレンズが2組, 加速電極直後と (Lens 1) とその 1 m 先 (Lens 2) に設置されている. 検出器の手前 50 cm に, 縦方向にイオンを掃引するための掃引電極 (Sweep Def) を設けた. 掃引電極入り口にはアパーチャーを設け, 収束しきれないイオンと掃引電位の漏れをカットした. 掃引電場は, イオン化レーザーに同期して掃引電極に三角波が印加されるようにした. この三角波は, 任意波形装置 (NF 回路設計ブロック製, WF1946) で作製し高速アンプ (東陽テクニカ製, HV-400, max 3000 V/ μ s) で増幅, 遅延信号発生装置 (Stanford Research 製, DG535) でこの三角波と飛行するイオンのタイミングを合わせた.

2・1・3 イオンの検出と質量スペクトルの導出 画像検出には, 蛍光面 (P-20) を持つ有効径 $\phi 17$ 又は $\phi 40$ mm の MCP (浜松ホトニクス製) を用いた. 発光する蛍光面を質量分析装置の外部からビデオレートの冷却型 CCD カメラ (浜松ホトニクス製, C5985) で観測した. 取り込んだ画像をカメラからパーソナルコンピュータに転送し, 画像解析ソフト (Scanalytics 製, IPLab) で解析, 検出器上の位置と光量又は光点数の計測を行った.

読み出し系アノードからの信号処理には, 50 Ω インピーダンスマッチングをとった有効径 $\phi 24$ mm の MCP を用い, 1 GHz 帯域のプリアンプ (EG&G ORTEC 製, 9306) と 1 GHz サンプリングレートの DSO (LeCroy 製, 9370) を使って 5000 回の積算平均化したデータを, GPIB 経由でパーソナルコンピュータに転送してデータ処理して計測を行った.

2・2 画像検出法の原理

レーザーイオン化で生成したイオンは, 加速されて検出器に向かって飛行する (Fig. 1 中左から右方向). 検出器前の掃引電極にこのイオンが入るときには, 離散的に質量の順になっている. イオン化のレーザーをトリガーにして, 三角波の掃引電場を加えると, イオンは時間依存の電場に質量順に入射することになる. 質量弁別されたイオンはそれぞれの飛行時間に応じた電場を受けて位置検出型のマイクロチャンネルプレート (MCP) に向かって飛んでいく. このときの三角波のパターンによって検出器での到達位置が決まる. すなわち, 飛行時間 (質量情報) から位置情報への変換はこの三角波のパターンで定義される. 本実験では, 検出器背後側から見て縦方向にイオンを掃引

Fig. 2 Time-of-flight mass spectra for calcium by using digital oscilloscope

This y-scale is expanded for minor isotopes other than ^{40}Ca . Calcium atom source was Ca metal (800 K).

し, 質量情報を画像化した.

3 結果及び考察

3・1 デジタルオシロスコープで測定した質量スペクトル

Fig. 2 は DSO で信号を処理したときに得られる Ca 同位体の質量スペクトルである. 同位体存在比が ^{44}Ca より小さい存在比の同位体を測定するためのレンジ設定であるため, ^{40}Ca のピークはスケールオーバーになっている. この ^{40}Ca の大きな信号は, ピーク幅が高質量側に広がっている. 測定レンジを ^{40}Ca に合わせると, ^{40}Ca と ^{44}Ca の同位体比は正確に測定できることから, この測定条件では MCP とプリアンプの信号飽和は発生していない. ゆえにこれは, DSO の入力アンプの飽和により発生する現象である. このように, 測定レンジの拡大によって信号のすそ引きが見られる現象は, DSO に認められる現象である. また, 質量スペクトルとは関係のない小さなピークも認められるが, これは信号の反射 (リングング) などが原因と考えられる. 以上のことから, このような大きなピーク信号の後にくる存在比の低い同位体の同位対比測定を考える場合, DSO による検出段階におけるアバNdans感度低下は測定精度上大きな障壁となる. 著者らは, 放射化によりごく微量に生成する ^{41}Ca を測定することを目標としているので, このような現象は計測上致命的である.

また, DSO の基本的なダイナミックレンジの限界により, 存在比の低い ^{46}Ca についてはこのレンジにおいては

Fig. 3 Images of incident calcium ions on the fluorescent screen of micro channel plate

Exposure time was 1 second (10 laser shots). These images were subjected to image enhancement processing. (a) Convergence free (Lens 1 = Lens 2 = 0 V); (b) Ions converge to a center of MCP (Lens 1 = 1.92 kV, Lens 2 = 800 V)

検出できていない。一般に、DSOは積算平均化機能を持っていて、垂直軸の分解能を拡大した結果がカタログ上に記載されている。しかし、平均化による分解能向上は測定事象ごとの8ビットのダイナミックレンジを計算の源としているので、変動の大きな信号や微小な信号はその恩恵を受けることができない。ゆえに、DSOを用いて ^{46}Ca のような微量同位体と他の主要な同位体を正確かつ同時に計測することは非常に煩雑かつ困難な作業となる。そこで、高速の信号処理に依存しないイオン計測法を導入するため、次に示す画像検出法について検討した。

3・2 TOFMSのイオンビームプロフィール

著者らは画像検出法、すなわち検出されるイオンを光信号に変換し、画像として質量スペクトルを扱う計測システムの開発を行った。それにはまず、TOFMS内を飛行する

Fig. 4 Lens effect for signal intensity

イオンビームとしての特徴を知る必要があることことから、飛行経路でのビームプロフィールを観測した。Fig. 3(a)はレンズ系による調整を行わない場合のCaイオンビームのプロフィールである(加速電位3 kV)。イオンの到達点が光点として記録されており、MCP上に均一に広がったビームプロフィールであることが分かる。はん用型のTOFMSにおいて、検出される信号強度とイオンビームプロフィールとの関係を調べた例は多くはないが、Ichimuraらが報告したりフレクトロン型TOFMSのそれとよく類似している²⁰⁾。このようなビームプロフィールは、電気信号としてイオンを計測する際には問題はないが、有限な大きさの検出器を使って画像検出で位置情報を取り出すためには、イオンビームをできるだけ収束しなければならない。そこで、Lens 1, 2の2つのレンズを用いてビームプロフィールがどのように変化し、それにより検出されるイオン量がどのように影響されるのかについて検討を行った。

Fig. 4は加速電極に近いLens 1に印加した電圧と、そのときに得られる ^{40}Ca の電気信号量の関係を示したグラフである。1.5 kVまでの電圧ではビームプロフィールとともに得られる信号量は変化がないが、1.7 kVを超えるとイオン量が増加しプロフィールの光点も増加する。しかし、検出器上に収束されることはなく、均一なビームプロフィールであった。イオン量が極大値となったLens 1の条件で(1.92 kV)、Lens 2の条件を変えると、イオン量にはほとんど変化がなかったが、ビームが検出器の中心に収束し、800 Vで直径1 mm以下に収束することができた [Fig. 3 (b)]。これらレンズに印加される値は、加速電位の3 kVと比べるとイオンビームの常識としてはかなり大きい値であるが、ピークの半値幅への影響、すなわち飛行時間への影響は見られなかった。レンズ系はレーザーイオン化で発生したイオンの収束に十分効力を発揮していることになる。原子化するための温度条件が大きく異なるCa試料を使ってもこの収束条件等は変わらないことから、ビームの

Fig. 5 Image detected calcium isotopes
Exposure time was 10 seconds (100 laser shots).

広がりに対する Ca 原子の初期運動エネルギーの影響は小さいものであると考えられる。

以上の検討から, 2 組のレンズを使うことにより, TOFMS 中のイオンビームを検出器上で十分に収束できることが分かった。

3.3 画像検出による質量スペクトルの作成

実際に収束したイオンビームを, 掃引電極により形成される時間依存電場で偏向した結果を Fig. 5 に示す。掃引電極への三角波の印加により, MCP 面上を上から下へ, 軽い ^{40}Ca の Ca のイオンから最も重い ^{48}Ca までが順番に到達している。この例は, 各同位体が明りょうに見えるように測定時間 (カメラの露出時間) を長く設定しているので, ^{40}Ca の同位体位置がハレーション (光のにじみ) を起こして広がって見えている。しかし, 適切な露光時間でこの画像を連続撮影し, それぞれの同位体の位置での発光量を積算していくと, Fig. 6 のような質量スペクトルが得られる。Fig. 2 と比較すると, スペクトルとして幾つかの大きな違いが見られる。まず, ベースラインが安定していて, 存在比が最大である ^{40}Ca と ^{42}Ca の間にピークのすそ引きやリングングが発生していない。これは, イオンの検出段階でアバダンス感度の低下が起こりにくいことを示している。画像検出におけるベースラインの平坦性は, イオン到達信号と CCD 内部で発生するノイズのレベル等が明りょうに違うこと, 及び電気信号の増幅がないことが主な要因であると考えられる。また, 1 回の測定で得られるダイナミックレンジが大きく, 天然の Ca 同位体すべてを計測することが可能であった。存在比の最も低い ^{46}Ca を十分に検出できることから, 少なくとも 5 けたのダイナ

Fig. 6 Time-of-flight mass spectra for calcium by using image detection system
Total exposure time was 300 seconds (5 s $\times$ 60 images).
Calcium atom source was CaO (2000 K).

ミックレンジを利用できることが分かった。DSO により Ca 同位体すべてを計測するためには, レンジの切り替えにより数回に分けて行わなければならない。

画像検出による方法のもう一つの特徴として, カウンティング法の併用が挙げられる。 ^{46}Ca のような存在比の小さい同位体は, 検出されるイオンは一つ一つの光点として識別することができる。この場合, 輝度ではなく光点の数を数えることにより, カウンティング法による計測が可能であるが, そのために計測条件を変える必要はなく, 同一の画像情報をソフトウェアの上で使い分けるだけでよい。

3.4 画像検出法による同位体比測定

Table 1 に画像検出法を使った同位体比測定の結果を示す。比較のため, DSO を使って得られる結果を併記した。DSO を使う場合は, ^{40}Ca と ^{44}Ca , ^{44}Ca と ^{42}Ca のように同位体比の比較的近い組み合わせでレンジを調整し測定を行い, その結果から計算した。 ^{40}Ca との比を直接測定しているのは ^{44}Ca のみである。すなわち, 同位体比測定の操作としては 5 回の計測操作が 1 回分のデータとなっている。一方, 画像検出法による測定では, すべて直接的に同位体比を測定した結果であるので, 1 回の計測操作が 1 回のデータに当たる。

Table 1 Determination of isotope ratio analysis of Ca by image detection and digital oscilloscope

	Isotope ratio of calcium		
	Natural	Image detection (RSD %, $n = 5$)	Digital oscilloscope (RSD %, $n = 5$)
$^{42}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$	6.674×10^{-3}	6.90×10^{-3} (4.0)	7.01×10^{-3} (6.3)
$^{43}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$	1.393×10^{-3}	1.38×10^{-3} (7.7)	1.50×10^{-3} (20)
$^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$	2.152×10^{-2}	2.09×10^{-2} (6.7)	2.23×10^{-2} (8.1)
$^{46}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$	4.123×10^{-5}	4.43×10^{-5} (24)	
$^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$	1.929×10^{-3}	2.14×10^{-3} (16)	1.85×10^{-3} (16)

Sample is metallic calcium.

画像検出法による結果は、ほぼ天然同位体比に近い値が得られ、DSO による測定結果との比較では同等かそれ以上の精度が得られた。また、 ^{46}Ca についても精度ある結果が得られ、検出感度の点からも DSO に劣らない性能であることが分かった。

4 おわりに

開発した画像検出法を用いて Ca の同位体比測定を行い、基本的な測定事象におけるダイナミックレンジの向上と、同位体比測定における 10^5 レベルのダイナミックレンジが得られるようになった。この方法により実際の放射性廃棄物中の ^{41}Ca を測定するためには、今後改良が必要である。また、RIMS の特長を生かすと、コンクリート中の Ca の同位体比を非分離で測定できるものと考えられる。コンクリート中には数% の Ca が含まれているが、これを分離操作せずに ^{46}Ca まですべての Ca 同位体を同重体などの妨害を受けずに計測できるのは、画像検出法が RIMS 法の選択性の高さを十分に生かしきることができることを示すよい例であると考えられる。

現在、試料からの原子化を含めて Ca 同位体比測定法としての詳細な検討を行っている。一般的なコンクリートブロックの一部を粉砕し、単純にフィラメント上で加熱することにより、含まれる Ca を原子化し、本実験装置で計測しても、Fig. 6 と同様なマススペクトルを得ることが可能である。

本計測システムでは、データを画像として蓄積してから質量スペクトルを得るまでに画像処理の工程が加わるため、DSO のような使い勝手の良さは期待できない。しかし、年々パーソナルコンピュータはその処理速度が向上していることから、ルーチン化した画像処理に必要とされる時間も急速に短くなっており、自動化もそれほど難しいことではない。

文 献

- 1) B. L. Rodriguez, J. M. Los Arcos: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, **369**, 353 (2002).
- 2) M. Itoh, K. Watanabe, M. Hatakeyama, M. Tachibana: *Anal. Bioanal. Chem.*, **372**, 532 (2002).
- 3) G. S. Hurst, M. G. Payne, S. D. Kramer, J. P. Young: *Rev. Mod. Phys.*, **51**, 767 (1979).
- 4) G. S. Hurst, M. G. Payne: *Spectrochim. Acta*, **43B**, 715 (1988).
- 5) V. S. Letokhov: "*Laser Photoionization Spectroscopy*", Ch. 8, (1987), (Academic Press Inc, Orlando, Florida).
- 6) G. K. Nicolussi, M. J. Pellin, W. F. Calaway, R. S. Lewis, A. M. Davis, S. Ameri, R. N. Clayton: *Anal. Chem.*, **69**, 1140 (1997).
- 7) H. Rimke, G. Herrmann, M. Mang, C. Mühleleck, J. Riegel, P. Sattelberger, N. Trautmann, F. Ames, H. J. Kluge, E. W. Otten, D. Rehklaue, W. Ruster, F. Scheerer: *Mikrochim. Acta*, **3**, 223 (1989).
- 8) G. Passler, N. Erdmann, H. U. Hasse, G. Herrmann, G. Huber, S. Köhler, J. V. Kratz, A. Mansel, M. Nunnemann, N. Trautmann, A. Waldek: *Kerntechnik*, **62**, 2 (1997).
- 9) J. Roboz: "*Introduction to Mass Spectrometry*", p. 77 (1968), (J. Wiley & Sons, New York).
- 10) M. Guilhaus: *Spectrochim. Acta, Part B*, **55**, 1511 (2000).
- 11) P. Muller, K. Blaum, B. A. Bushaw, S. Diel, Ch. Geppert, A. Nähler, W. Nörtershäuser, N. Trautmann, K. Wendt: *Radiochim. Acta*, **88**, 487 (2000).
- 12) P. Müller, B. A. Bushaw, K. Blaum, S. Diel, Ch. Geppert, A. Nähler, N. Trautmann, W. Nörtershäuser, K. Wendt: *Radiochim. Acta*, **370**, 508 (2001).
- 13) I. A. Lys: "*Time-of-Flight Mass Spectrometry*", Edited by R. J. Cotter, Ch. 10, (1987), (American Chemical Society, Washington, DC).
- 14) D. W. Chandler, P. L. Houston: *J. Chem. Phys.*, **87**, 1445 (1987).
- 15) L. Wang, H. Kohguchi, T. Suzuki: *Faraday Discuss.*, **113**, 37 (1999).
- 16) K. Hono, R. Okano, T. Saeda, T. Sakurai: *Appl. Surf.*

- Sci.*, **87/88**, 453 (1995).
- 17) 土屋 裕: “超高速光エレクトロニクス”, 末田 正, 神谷武志共編, p. 246 (1991), (培風館).
- 18) E. B. Saloman: *Spectrochim. Acta*, **46B**, 319 (1991).
- 19) W. C. Wiley, I. H. McLaren: *Rev. Sci. Instrumen.*, **26**, 1150 (1955).
- 20) S. Ichimura, K. Goto, K. Kokubun, H. Shimizu, S. Matsuura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, L1209 (1990).

要 旨

飛行時間型質量分析計 (TOFMS) を用いた元素の同位体比測定におけるダイナミックレンジの拡大を目指し, イオンの画像検出法の導入を検討した. TOFMS のイオン検出器として位置検出型の蛍光板付マイクロチャンネルプレート (MCP) を使用し, イオンを光としてカメラで計測した. レーザー共鳴イオン化したイオンビームを質量弁別した後, 時間依存の電場へ入射させて MCP 上に掃引した. CCD カメラで記録した光点群を解析し質量スペクトルを得た. 開発した方法をカルシウムの同位体比測定に適用し, 5 けた以上のダイナミックレンジを得た.