

# 熱ルミネッセンス 2次元読み取りシステム II

山本 勲, 富山 毅, 今枝国之助, 高橋信介, 蛭川清隆\*,  
中村改樹\*, 高野安正\*\*, 山下敬彦\*\*\*, 和田俱典\*\*\*

岡山理科大学 電子理学教室  
\*岡山理科大学 応用物理学教室  
\*\*岡山理科大学 機械理学教室  
\*\*\*岡山大学 理学部 物理学教室

(昭和60年9月26日 受理)

## 要 旨

熱ルミネッセンス (TL) の 2次元読み取りシステムについては, 前年度紀要に報告した。今回は, さらに詳しくシステムの特性を報告する。又, 解析系とビデオテープレコーダとの同期がとれるようにしたことにより活用範囲が大幅に拡大した。特に TL のような “transient” 現象には一旦ビデオに収録した後, 繰り返し読み取ることにより精密解析が可能になる。又同様にシステムの特性を調べる上で有効であった。

## 1. はじめに

前回の紀要<sup>1)</sup>に熱ルミネッセンス 2次元読み取りシステムを報告した。このシステムは CCD-TV カメラからのシグナルを, 直接イメージプロセッサに取り込んで処理する方法であった。今回は, ビデオテープレコーダ (VTR) とイメージプロセッサの同期がとれるように改良し, CCD-TV カメラからの画像シグナルを VTR で記録しておき, 後にこの VTR を再生し, イメージプロセッサに取り込む方式とした。

熱ルミネッセンス [TL] は, ひとたび加熱すると発光に関する情報はその試料から消滅する。しかしながら, 発光の経過を VTR で記録しておくことにより保存することができる。高エネルギー宇宙線による反応を研究するために開発された熱ルミネッセンスシートは, Photon counting による計測によると, 放射線 ( $^{90}\text{Sr}$ ) の照射線量と TL の発光量の直線性が良いことが報告されている<sup>2)</sup>。これに対して, イメージインテンシファイヤー, CCD-TV カメラ, イメージプロセッサ等を用いた 2次元読み取りシステムを用いると, 照射線量と TL の発光量の関係式が比例関係にないという指摘が最近なされた<sup>3)</sup>。また, TL の発光ではなく発光ダイオード (緑) の微弱光を光源として用いた 2次元読み取りシステムのテストでは, 入射光子数とシステムからの出力信号は, 比例関係にないということがわかっている<sup>4)</sup>。そこで, これらの矛盾がどの部分において, どのように引き起こさ

れているかを VTR を使って精度よく種々の解析を行なった。さらにその特性に対する補正処理方法を研究した。

## 2. VTR の導入と活用例

熱ルミネッセンスの2次元読み取りシステムの全体図を Fig. 1 に示す。このシステムの改良点は、VTR とイメージプロセッサの同期をとり、イメージプロセッサが VTR から安定な画像を取れるようにした事である。熱ルミネッセンスは加熱と同時にその情報は試料から消滅するため、前回の紀要で報告した2次元読み取りシステムでは、解析条件(例えば、画面の加算回数、画面の抜き取り領域、n 値化のレベル等)の設定が適切でないと、熱ルミネッセンスの読み取りに失敗し貴重なデータを失う恐れがある。そこで、今回

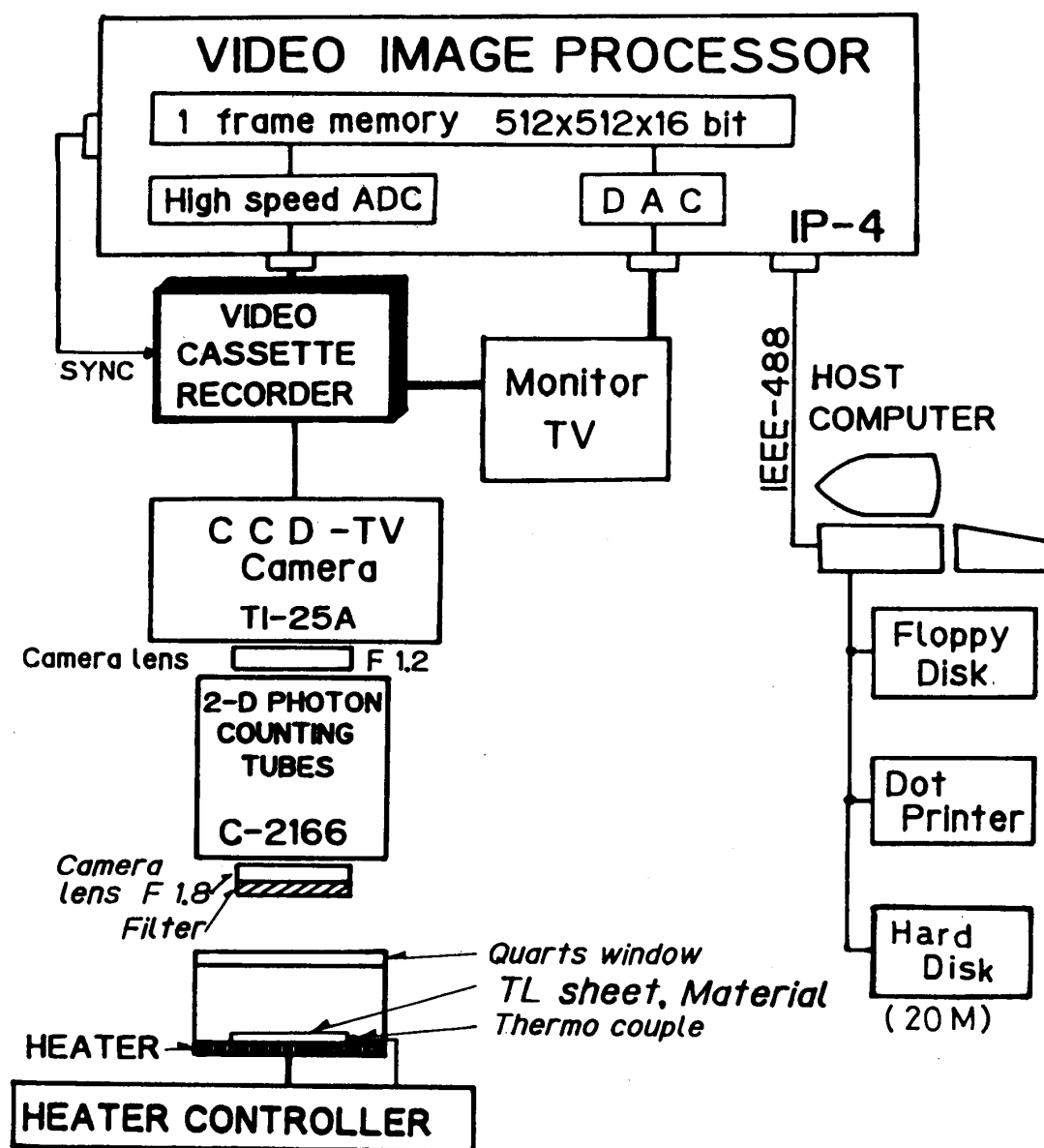


Fig. 1 熱ルミネッセンス2次元読み取りシステム。

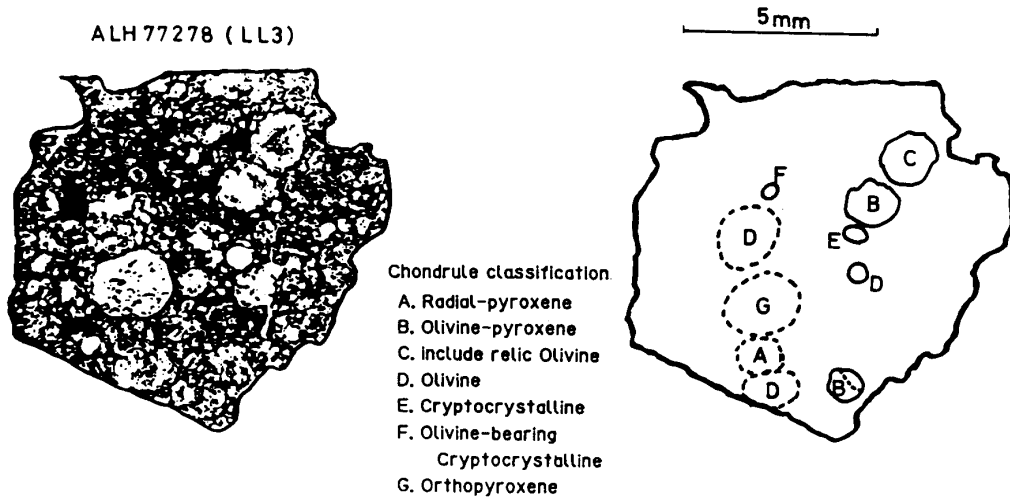


Fig. 2 隕石薄片の偏光顕微鏡写真とコンドールの分類.

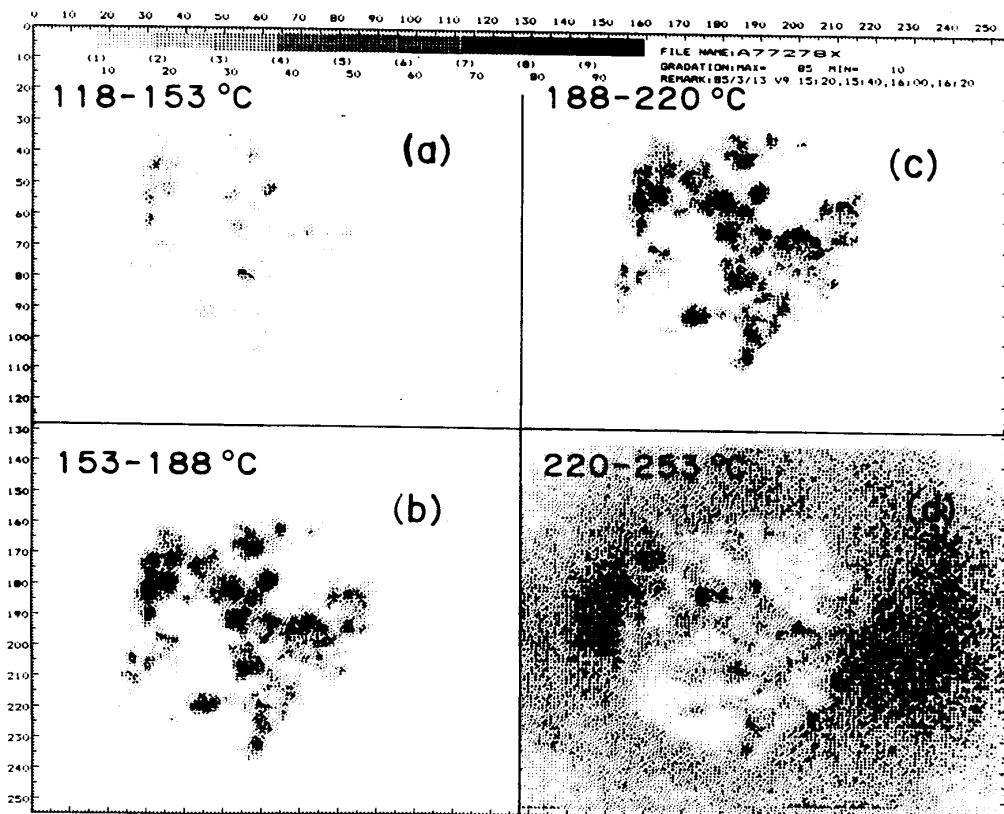


Fig. 3 時間分割処理の例.

ビデオテープに録画した画像を再生し、4つの温度域に分割した隕石の TL 空間分布.

の読み取りシステムでは熱ルミネッセンスの発光の経過をあらかじめ VTR で録画しておき、この VTR の再生画像を使って解析を行う方式に改良した。この方式では録画されたビデオテープを繰り返し再生することにより繰り返し解析することが可能である。これにより、試料の興味ある部分にのみ注目した空間的な分割処理、試料の必要な温度範囲（画面数に相当）にのみ注目した時間的な分割処理、及び両者の混合型の分割処理等ができる。したがって VTR 導入によって前回の紀要で報告した読み取りシステムより、さらに精密な解析が可能となった。

例えば、前回の紀要で報告した読み取りシステムではすべての画像の加算結果を Foppy disk に収納していた。加算結果は試料の時間（試料の温度）に関する積分量であるため、2次元的な場所に関する解析はできるが、時間（試料の温度）に関する解析は不可能である。これに対して今回の読み取りシステムでは、ビデオテープに TL の発光の時間的な変化の経過（TL 発光の微分量）を録画して、データ解析のためのオリジナルなデータを保存することができる。このビデオテープを再生することによりデータ解析の条件（画像の加算回数、画像の抜き取り領域、n 値化レベル等も含め）を適当に選びながら、最適なところを探ることができるようになった。さらに、このビデオテープの複製テープをつくることにより、同一のデータを異なる研究室で解析することが可能であり、他の研究者との

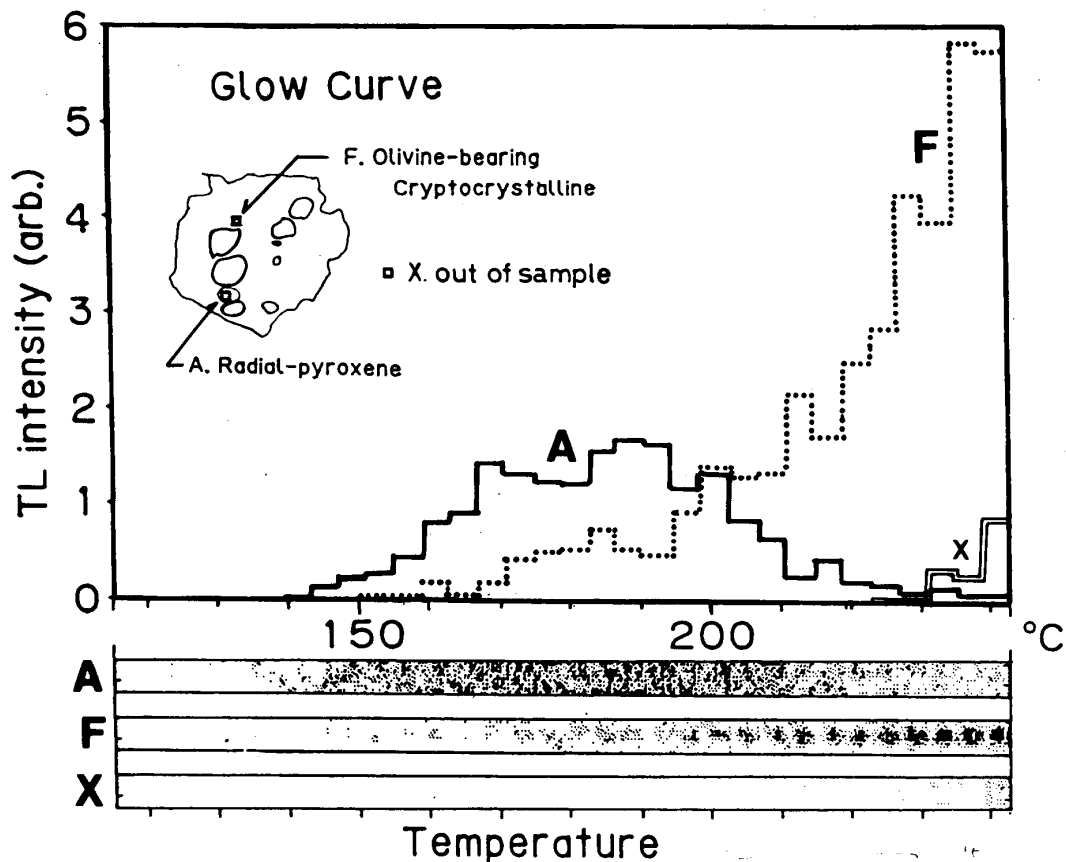


Fig. 4 時間・空間分割処理の例。

場所（コンドルール）により TL グローカーブが異なっている。

データの交換が容易になった。

VTR の活用例として隕石の TL 空間分布を示す。Fig. 2 は読み取りに使用した隕石薄片の偏光顕微鏡写真である。試料は一度アニールした後  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線で 20kR 照射したものをを用いた。この隕石薄片を一定の温度上昇速度 ( $0.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ ) で加熱し、発光の経過を VTR で録画した。Fig. 3 に、このビデオテープを再生し、時間 (温度) 分割処理を行なった例を示す。この例は 4 つの温度範囲で、発光の場所的な強度分布を求めたものである。低温度領域で発光した部分、比較的高温部でよく発光した部分、又殆んど発光しなかった部分等。これらの差違は隕石の部分、部分の構成物質・構造の違いに起因していると考えられる。次に、同じビデオテープを再生して、時間・空間の分割処理を行なった例を Fig. 4 に示す。

偏光顕微鏡鑑定により同定されたコンドルールの内、ある特定のものについて、そのコンドルールのグローカーブを求めたものである。録画されたビデオテープを再生しながら、イメージプロセッサで画像の蓄積をしつつ、一定時間ごとに注目する領域をホストコンピュータに転送することによって、この図は得られた。(A) は Radial pyroxene chondrule の、(F) は、Olivine-bearing Cryptocrystalline chondrule の部分のグローカーブを示しており、(X) は試料の外で、ヒーターの黒体輻射を示している。この試料だけではなく、自然界の試料は不均一であり、また各部分でいかなるグローカーブを呈するか予想できない。けれども、VTR を導入することによって、あらかじめ粗いスキャンをし、次にくわしい読み出し (時間及び空間の分割処理による解析等) をすることが可能となった。

### 3. イメージインテンシファイヤー [I. I.] の入力と出力の関係

#### (i) 測定方法

I. I. は光電面、静電レンズ、マイクロチャンネルプレート [MCP]、及び蛍光面から構成された真空管である。1 個の光子が光電面に当たり 1 個の電子を放出したとき MCP で約  $10^6$  個の電子に増倍され、その電子が加速されて蛍光面に当たる。蛍光面に電子が当たったとき、当たった部分が蛍光を発する。外部から蛍光面を見ていると短時間輝点が見える。この輝点は約  $10^7$  個の光子からなっている。この輝点を Single Photon Spot [SPS] と呼ぶ。単位時間に蛍光面に表われる SPS の個数は光電面に入射した光子数と比例し、入射光子数の約 5% (量子効率約 20%、静電レンズに含まれるメッシュ電極の透過率約 50%、MCP の開口率 50%) である。

I. I. の入力と出力の関係の測定方法は、微弱光源から I. I. の光電面に入射する光子の個数 (入力) とこの 2 次元読み取りシステムから最終的に得られる値 (出力) との関係調べることである。微弱光源として緑色の発光ダイオードを使用した。入射光子の個数は 4 種類の減光フィルター (透過率、70%、50%、25%、10%) を交換するのと、発光ダイオードに流す電流値 ( $1\ \mu\text{A}$ ,  $0.5\ \mu\text{A}$ ,  $0.3\ \mu\text{A}$ ) を変えることで調整した。対物レンズは意

図的に焦点をぼかし、光が広い面に一様に当たるようにした。

まず Photon counting により、光源から発する光子数と減光フィルターを透過してくる光子数をカウントし、フィルターの減光率と透過光子数の比例関係を確認した。測定には光電子増倍管（浜松ホトニクス R-878）を冷却状態で使用した。

次に、CCD カメラ以後のシステムの入力と出力の関係を調べるために I. I. を取りはずして、光源を CCD カメラで見るテストをした。結果は入力と出力の関係は比例していた。

再び I. I. を含むシステムにもどし、発光ダイオードの発光を、減光フィルターと発光ダイオードの電流をある値に設定して、数分間 VTR で録画した。さらにフィルターの減光率と発光ダイオードの電流値の設定を変えて同様の録画を行ない、入射光量の異なる15種類の画像データを得た。この画像データを解析して I. I. の特性を調べた。

(ii) 入力と出力の関係

[A] 先に得られたビデオ画像（512×512画素/1画面，30画面/1秒）を一画面ずつ再生して、SPS の個数を数えた。光は100×100画素にほぼ一様に当たっているのので、その中心部の64×64画素分を調べた。SPS の個数を数えることは、I. I. の蛍光面のかわりに金属 Anode 板を置いた場合を仮定すると、Anode に流れるパルス電流の個数を数えることに相当し、光電子増倍管で Photon counting を行うのと等価である。従って、もし入射光と SPS の個数が比例しているなら、光電面、MCP の部分は、光電子増倍管と同様に考えてよいはずである。もし比例していないなら、この部分に非線型を生ずる原因があるはずである。

結果を Fig. 5 (a) に示す。○は測定値であり、実線は1乗の線である。但し、Fig. 5 で横軸 K は入射光の強さに比例した量である。この結果から、SPS の個数は入射光子数と比例していることが確かめられた。

$$\text{SPS の個数 } N \propto \text{入力} \quad (1. a)$$

我々が実際に扱っている画像はこのSPSの集合体であるが、各 SPS の重心点を求め、その1画素に1個の光子が入射したとしてできる画像を得ることが望ましい。しかし、パーソナルコンピュータを用いた我々の方法では、演算速度とメモリー容量の制約があるので、64×64画素で数秒間隔程度の処理が限度である。ただ画像全体（512×512画素）を毎画面（30フレーム/sec）抜き出して処理することは、多くの場合必要であるとはかぎらないので、RAM disk と DMA 転送（又は双方向 RAM）を導入すれば、この求心法処理は将来的には不可能ではない。ここではイメージプロセッサ上で画面を加算して得られた結果に、画素ごとに適当な補正を施すという実用的な方法を考える。

[B] さらに蛍光面の性質を調べた。SPS の個数を数えるのに用いたデータテープを再び使って、イメージプロセッサ内に、画像を2値化しながら約1000フレーム分加算した。得られた画像から、上と同様に64×64画素の画像をコンピュータに抜き取って、SPS の占める画素の数の総和を求めた。これと入力との関係を Fig. 5 (b) に●印で示す。こ

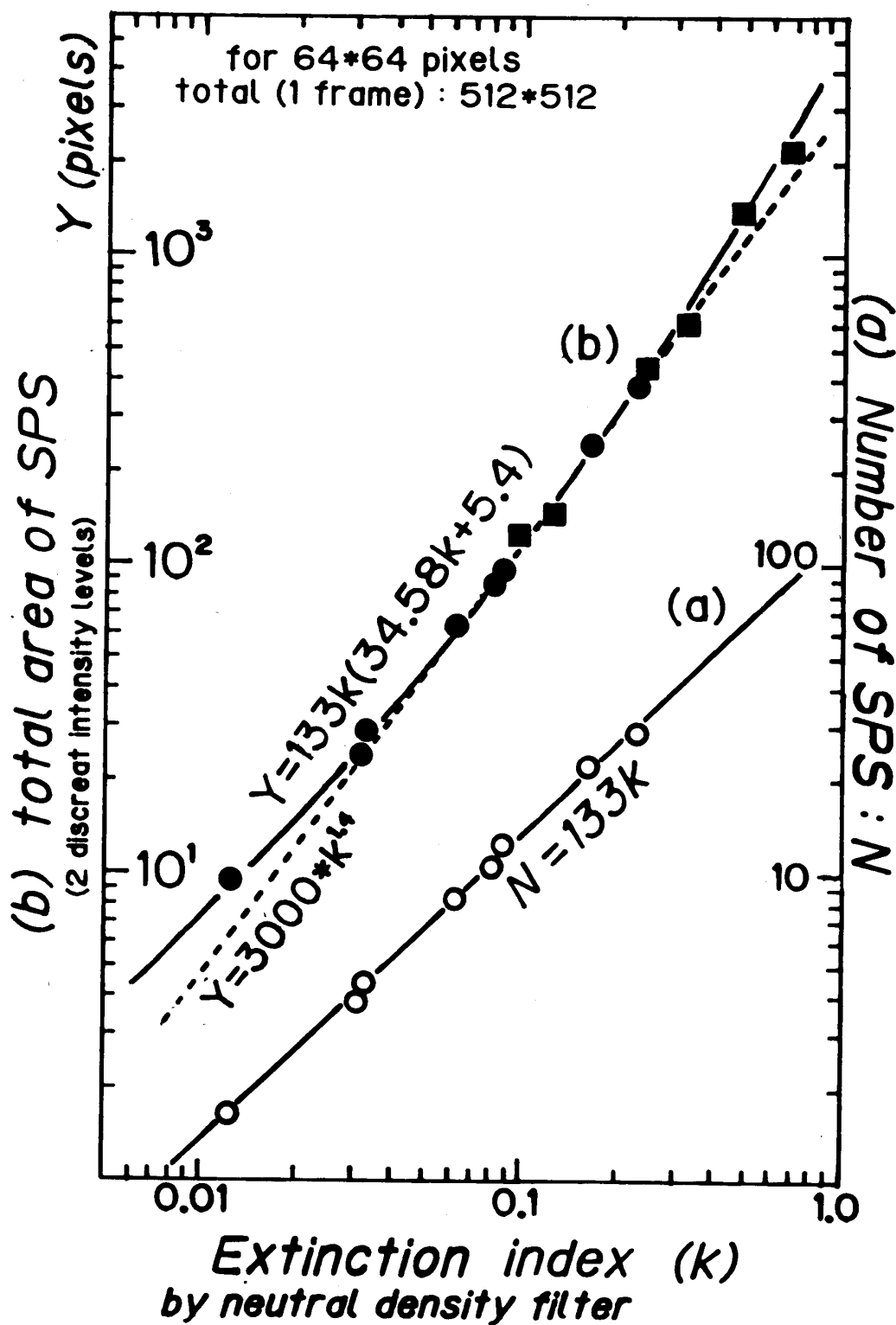


Fig. 5 I. I. の蛍光面の出力特性.

(a)軸は SPS の個数. (b)軸は SPS の画素数の総和. これは, 微弱光源 (緑色 LED) を用い, 画面上の 64×64画素によって得られた.

れは、1画面当り、64×64画素内で SPS の占める面積(画素数)の平均を入力関数として示したもので、その関数の型は後で記すが、今得られた範囲では、super linearity を示していることが判かる。

[C] 以上の結果の定量化を試みる。入射光子の画面上での1フレーム当りの密度を  $\rho$  とすると、 $\rho$  は SPS の個数そのもので、入力に比例する量である。また、SPS の画面上の広がり(画素数)を  $S$  とすると、イメージプロセッサーで2値化された  $n$  画面分の画素数の総和は、 $\rho \cdot S \cdot n$  となる。つまり、上に述べた Fig. 5 の(a)は  $\rho$  に相当し、(b)は  $\rho S$  に相当するものを入力関数として示している。

Fig. 5 に示した測定値を用いて、 $S$  を  $\rho$  の関数として示したものが、Fig. 6 である。この図で横軸は、1秒間に光電面全体に入射する光子数に換算してある。図中の実線は、

$$S = 5.4 + 6.77 \times 10^{-6} \cdot x$$

但し  $x \propto \rho$

(1. b)

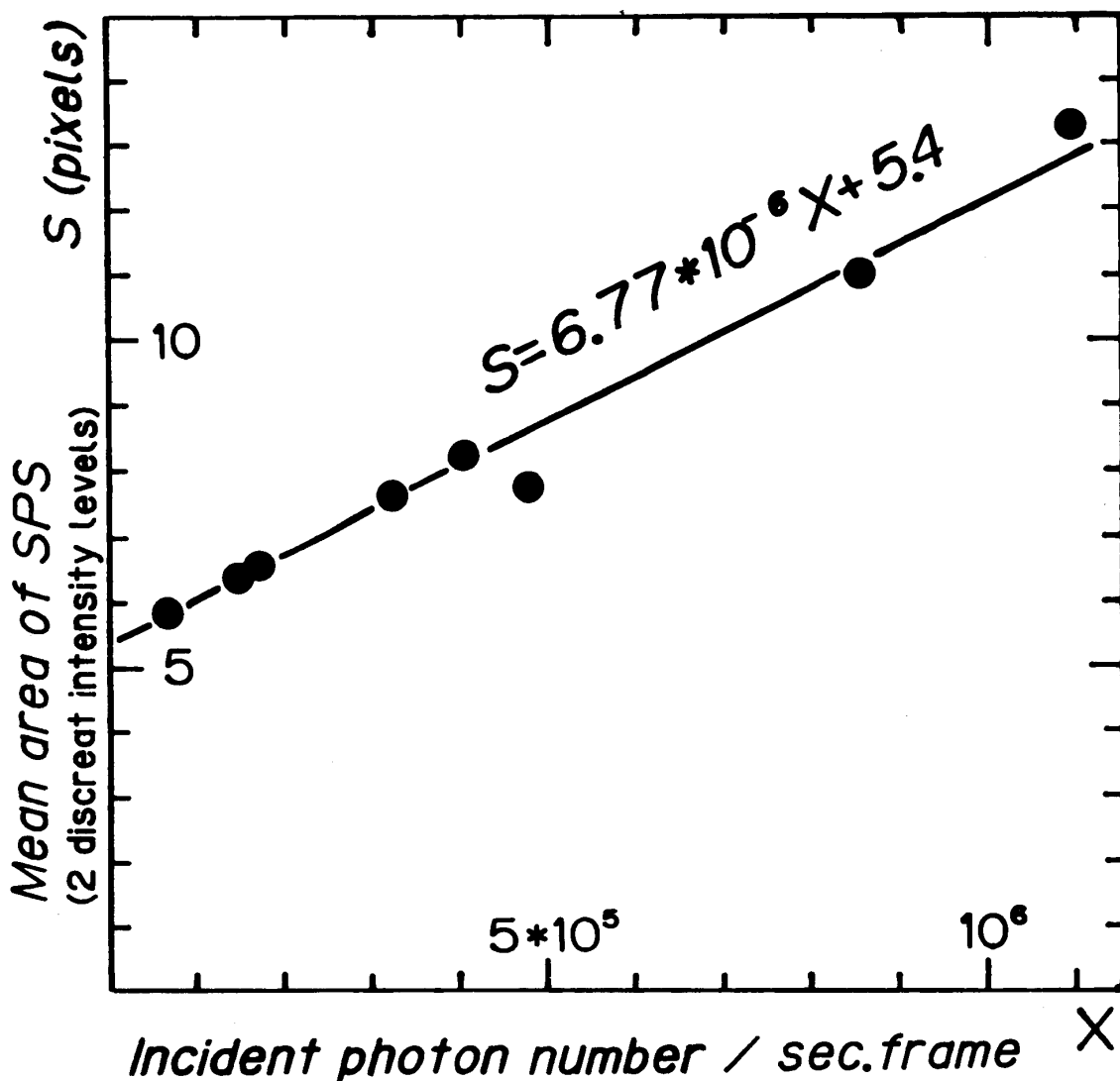


Fig. 6 I. I. の螢光面での SPS の広がり と入射光子頻度との相関図。

I. I. の螢光面の特性を示すもの。



を示し、これが今の我々の設定条件 (I.I. の Gain  $8.0 \times 10^7$ ) での、S と  $\rho$  との関係を表わす近似式である。光子の入射頻度が非常に低い場合でも有限な広がりをもった SPS が作られ、この SPS の広がりには I.I. の Gain に依存している<sup>1)</sup>ことから S と  $\rho$  の関係式に定数項 (今の場合 5.4) が含まれるのは当を得ている。この定数項は、I.I. の Gain, Fig. 1 の TV カメラレンズの倍率、レンズの明るさ、及び TV カメラの感度等で変る量である。この様にして、I.I. の入力に対する出力の super linearity を数式化することができる。

[D] ここで Fig. 5 に戻って、測定点 (b) の近似曲線を式 (1.b) を用いて表わせば、実線が得られる。更に、この関係を、これからのデータ処理に便利のように、別の近似式

$$y = \alpha \cdot x^\beta \quad (1. c)$$

で表わすと、光電面への光子の入射頻度が  $1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$  個/sec/画面の範囲では、 $\alpha = 3000$ ,  $\beta = 1.4$  とおくことができる。この関係を図中では破線で示している。

[E] (1. c) の関係が成立する範囲で、発光が時間的に変化する場合を考える。この場合、入射光子密度  $\rho(t)$  を

$$\rho(t) = \rho_0 f(t) \quad (2)$$

とおき、時間  $t_1$  から  $t_2$  まで積分する。但し  $\rho_0$  は比較するサンプルごとの定数、 $f(t)$  はサンプルに依らないある関数形を示す。任意の 2 つの  $\rho_0$  の比は、それぞれの強度を添字 1, 2 で区別すると、I.I. を使った場合は、

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \alpha \cdot [\rho_{0,1} \cdot f(t)]^\beta dt}{\int_{t_1}^{t_2} \alpha \cdot [\rho_{0,2} \cdot f(t)]^\beta dt} = \left( \frac{\rho_{0,1}}{\rho_{0,2}} \right)^\beta \quad (3)$$

すなわち、

$$\frac{\rho_{0,1}}{\rho_{0,2}} = \beta \sqrt[\beta]{\frac{N_1}{N_2}} \quad (4)$$

を得る。従って、時間的に変化する場合にも、(1. c) の関係が成立するときは I.I. を使って得られたデータから画素毎の  $\beta$  乗根 ( $\beta = 1.4$  とすることができる) をとる方法で正しい強度の比が得られることがわかる。

[F] 次に  $\rho$  が SPS の広がりと同じ程度の局所的な広がりを持ち、時間的にも変化する場合の実験を行なった。測定に用いた試料は、テフロンシートに  $^{90}\text{Sr}$  ( $100 \mu\text{Ci}$ ) 線源に鉛のコリメータ ( $1.6 \text{ mm} \phi : 20 \times 20$  画素相当) をつけて、30秒から5000秒 (照射電子数にして  $2.4 \times 10^5$  個から  $4.0 \times 10^7$  個) 照射して作った。

まず、テフロンシートの TL 発光量は照射電子数に比例していることを Photon counting により確認した。Photon counting は光電子増倍管 (浜松ホトニクス, R-878) を冷却状態で行なった。試料の加熱条件は上昇速度  $0.5^\circ\text{C}/\text{sec}$  である。

次に、テフロンシートの発光を 2次元読み取りし、ビデオテープに録画しておいたもの

を解析する。この解析では、イメージプロセッサで320画面(約10秒)加算し、TLの発光領域(約 $20 \times 20$ 画素)を十分に含む $64 \times 64$ 画素の領域をホストコンピュータに抜き取る。これを64回繰り返して、ホストコンピュータ内で加算して(約680秒)、 $64 \times 64$ 画素

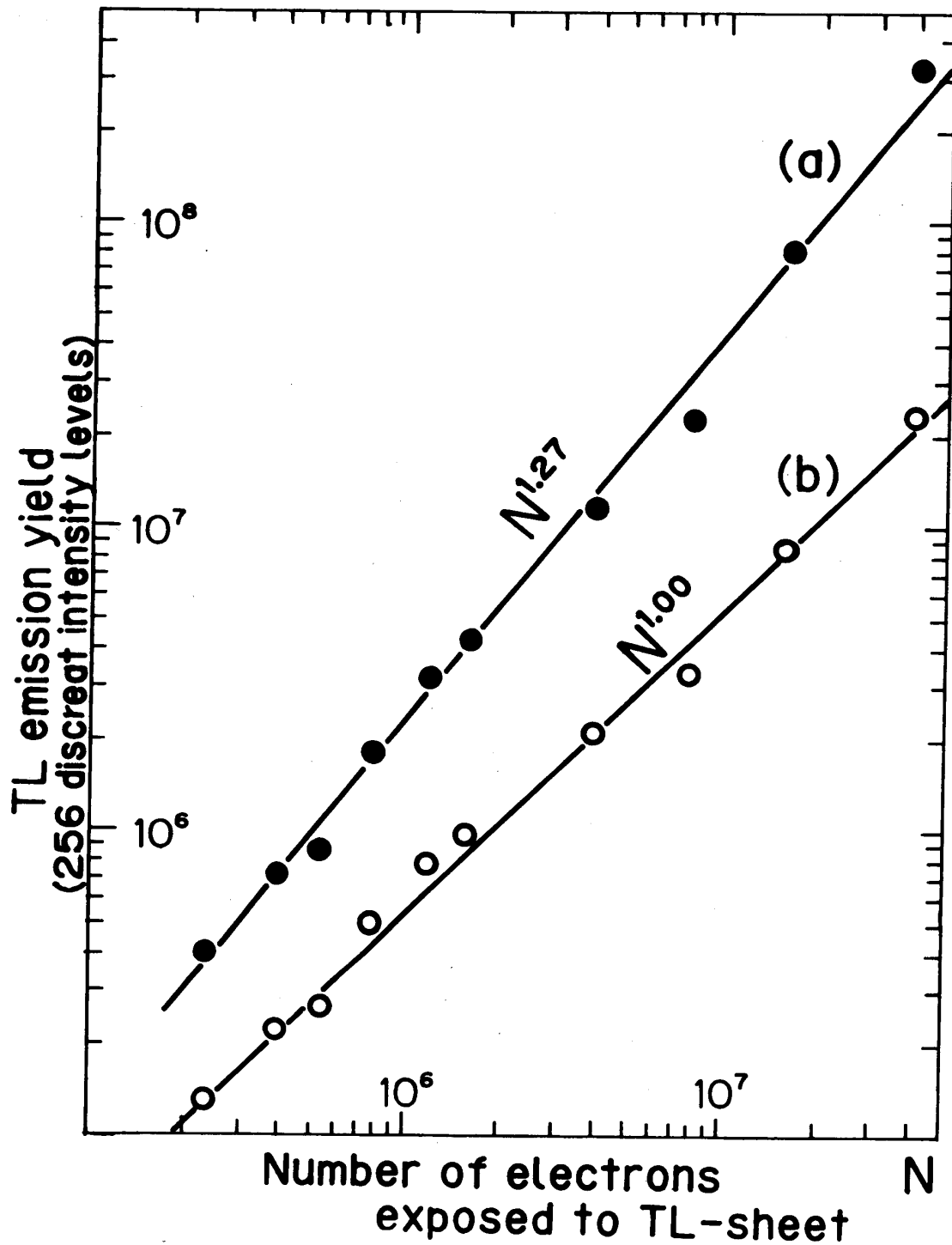


Fig. 7  $^{90}\text{Sr}$  を局所的に照射した TL シートの測定例.

- (a) TL 発光量と照射電子数の関係.
- (b) 補正した TL 発光量と照射電子数の関係.

の画像を作る。

まず、この画像の全画素分の総和を求めて、Fig. 7 (a) が得られた。次に、この画像一ターを画素ごとに 1.4 乗根をとったのちに総和を求めた結果を Fig. 7 (b) に示す。ここで、実線の傾きは 1 である。このことから、『画面の加算を行ったのちに、各画素ごとに 1.4 乗根を求める』補正方法が適用できることがわかる。

## 6. まとめ

Fig. 1 の 2次元読み取りシステムで VTR の導入は、このシステムの活用範囲を広げ、種々の解析を可能にした。

Fig. 1 のシステムの入力と出力の関係には super linearity がある。この原因は I. I. の蛍光面にある。I. I. の蛍光面の SPS の拡がりが入射光子密度によって変るためである。従って I. I. を使って測定する場合、蛍光面の SPS の拡がりの関与を考慮した定量化が必要である。

また BaSO<sub>4</sub>:Eu TL シートは照射線量と TL 発光量は比例している。

## 謝 辞

茨城大学の池田幸雄博士には、隕石薄片の作製およびコンドルールの同定をしていただきました。また岡山大学の山下信彦助教授には有益な助言や示唆をいただきました。ここに謝意を表します。

## Refereneces

- 1) 山本勲, 富山毅, 今枝国之助, 久我清, 蛭川清隆, 中村改樹, 高野安正, 山下敬彦, 和田俱典: 岡山理科大学紀要 20A (1984) 219.
- 2) Okamoto, et. al.: ICR-Report-120-85-1 (Univ. of Tokyo).
- 3) M. Akashi, et. al.: 19th ICRC LA JOLLA 1985, Vol. 8, 349.
- 4) K. Imaeda, et. al.: Nucl. Instr. and Method, A241 (1985) 567.

## SPATIAL DISTRIBUTION READ-OUT SYSTEM OF THERMOLUMINESCENCE II

Isao YAMAMOTO, Tsuyoshi TOMIYAMA, Kuninosuke IMAEDA  
Nobusuke TAKAHASHI, Kiyotaka NINAGAWA\*, Masaki NAKAMURA\*  
Yasumasa TAKANO\*\*, Yoshihiko YAMASHITA\*\*\*, and  
Tomonori WADA\*\*\*

*Department of Electronic Science, Okayama University  
of Science, Ridai-cho 1-1 Okayama 700 JAPAN*

*\*Department of Applied Physics, Okayama University  
of Science, Ridai-cho 1-1 Okayama 700 JAPAN*

*\*\*Department of Mechanical Science, Okayama University  
of Science, Ridai-cho 1-1 Okayama 700 JAPAN*

*\*\*\*Faculty of Science, Okayama University,  
Tsushima-cho 3-1-1 Okayama 700 JAPAN*

(Received September 26 1985)

### ABSTRACT

Some detailed properties of the spatial distribution read-out system for thermoluminescence (TL), which have been proposed by us, are reported. Then, the video-tape recorder is fully used: its reproducibility makes us to measure a "transient" phenomenon of TL "repeatedly". And, the recorder synchronized with an analyzing system makes us to cut-out any part of a picture accumulated from reproduced frame(s) and to analyze it.

The cause for the super-linear characteristics of the image intensifier used has been surveyed. And, a calibration method for the super-linearity is proposed.