



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	無掃引型超高速度駒取カメラの開発 : 近接型光増幅素子の高速シャッターリング特性
Author(s)	榎戸, 武揚; Enoto, Takeaki; 木村, 雅紀 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 139, 153-160
Issue Date	1988-02-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42084">https://hdl.handle.net/2115/42084</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	139_153-160.pdf



無掃引型超高速駒取カメラの開発  
——近接型光増幅素子の高速シャッターリング特性——

榎戸 武揚 木村 雅紀 春山 和郎  
(昭和 62 年 9 月 30 日受理)

**Development of a Ultra High Speed Framing Camera without  
a Deflecting Electrode**  
— High Speed Shuttering Characteristics  
of Proximity Focused Image Intensifier —

Takeaki ENOTO Masanori KIMURA Kazuo HARUYAMA  
(Received September 30, 1987)

**Abstract**

This paper shows the transient behavior of a Ultra High Speed Framing Camera using the proximity focused image intensifier with an additional external transparent electrode. The experiment of fast speed gating of proximity focused image intensifier by supplying electrical pulse voltage to photocathode or to the additional external transparent electrode is accomplished. By utilizing an external transparent electrode, gating time of sub-nanosecond is available.

Experimental results can be analysed sufficiently and accurately, by using RLC transmission line equations. The fundamental experiment of pulse operation of image intensifier by using divided electrodes is accomplished, and MTF characteristic is obtained. This result can be explained well by the resolution function of proximity focused image intensifier.

**1. 緒 言**

極微の現象を計測する顕微鏡に対比して、超高速カメラは極短時間現象を計測する Time-Micro-Scope と言え、時間・空間分解能に優れ、視覚による観測が可能な装置として古くから用いられてきた。近年では画像情報処理技術・半導体技術の進歩により、デジタル画像処理系と組み合わせられた定量解析が可能な高速 2 次元画像入力装置として認識が高まり、放電現象、核融合、生体系光化学反応、医療診断研究等へ応用され始め、より一層の超高速化、高感度化、解像力の向上が不可欠となってきている。

超高速カメラは大別して空間情報は 1 次元に制約されるが時間分解能に優れたストリーク・カメラと通常のカメラと同じく空間の 2 次元情報を記録し、時間分解能では若干劣るフレーム・カメラ(駒取カメラ)に分類され、前者では時間分解能数 100 フェムト秒が可能となっているが、後者では時間分解能は 1 nsec が限界である。著者等はこの超高速駒取カメラに於いて近接型光増幅素子前面に低抵抗分割外部透明電極を付加することにより、時間分解能、空間分解能を向上

させる新しい超高速分割ゲーティング法を提案し、この方式に基づく超高速撮影装置を試作し、その MTF 特性、時間分解能 1 nsec でのシャッターリングの実証、シャッターリング時に於ける光増幅素子輝度分布の過渡応答特性解析並びに測定結果との比較検討を行なったので報告する。

## 2. 無掃引型超高速駒取カメラの原理

2次元情報が得られる超高速駒取カメラが満足すべき仕様としては (1) 超高速シャッターリング (2) 駒取りの為の画像の移動、掃引あるいは画像分割及び分割動作 (3) 高感度性 (4) 高解像力等が挙げられる。駒取カメラの性能は1秒間あたりの駒どり数により評価され、上述の仕様を満足するために種々の方式が知られているが、主に画像の移動に用いられる手段により分類出来、フィルム、プリズム、ミラー、光電子とその質量が軽くなるに従い高速化が図られているが、露光時間、露光間隔が 1 nsec の超高速カメラ装置は未だ得られていない現状にある。

超高速カメラでは露光時間が短くなり入射光量が極端に少なくなるため、何等かの画像増強が必要となる。このため光電面、Micro-Channel-Plate、蛍光面から構成される近接型光増幅素子等の光増幅素子が使用される。現状で最も高速シャッターリングが可能な Electronic Cameras は測定対象の時間的変動に応じて光電面から放出される光電子を偏向電極によって偏向し、その空間的位置を変えて記録する方式である。ここで提案する光電子の掃引を用いない無掃引型超高速カメラ方式はこの近接型光増幅素子を単に画像増幅だけに用いず、同時に超高速シャッターリングに利用し且つ分割動作させることに特徴がある。

本装置は原理図 1 に示すごとく光路分割系、分割制御電極、近接型光増幅素子及び記録系とから構成される。図の左側から入射した光画像は、プリズム等の光路分割系により、複数の同一画像に分割された後に近接型光増幅素子に至り複数の同一光電子画像に変換される。通常近接型光増幅素子(シャッターリング電極部を図 2 に示す)は MCP 入力面を接地し、MCP には必要な増幅度を得るために 500~1000 V を、蛍光面には凡そ 6000 V を印加しておく。この状態で光電面が正の逆バイアス電位(例えば+30 V)に保持されていれば、電子は光電面に引き戻されカット・オフ即ちシャッターは閉じた状態にある。もしも、分割された外部透明電極の特定の電極にのみごく短時間負のバルス電圧を印加した場合には、その電極部分では電界が反転し電子には加速電界が加わるため電子は MCP 入力面に到達でき、位置情報を保持しつつ増倍を受けた後、更に加速されて蛍光面に衝突再び 2 次元光画像となる。この様に分割制御電極へ印加したバルス電圧により短時間だけ分割動作させ得ればその時刻の光電子画像のみが光画像に戻され記録される。即ちシャッターが開いた事になる。引続き別の制御電極を動作させることにより異なる時刻の光画像を無掃

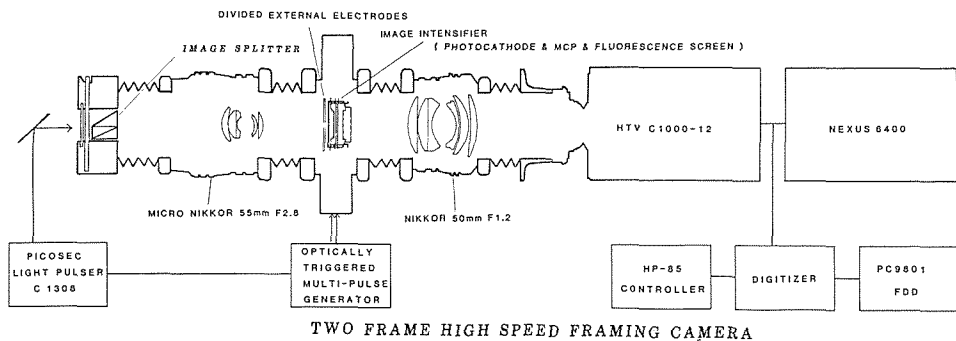


図 1 無掃引型超高速カメラ原理図

引で順次異なる位置に記録することが可能となる、即ち分割電極数 (= 光路分割数) だけの駒取が達成される。複数制御電極は互いに独立に制御することが可能であるので、印加するパルス電圧の幅、時刻を変更することによって、露光時間を現象の変動に応じて容易に変化させ得るだけでなく露光間隔をも自由に変え得る。従ってこの無掃引型超高速カメラは従来方式の持つ時間・空間分解能の低下要因をほとんど持たず、しかも露光時間・露光間隔を大幅に短縮することが期待できる。

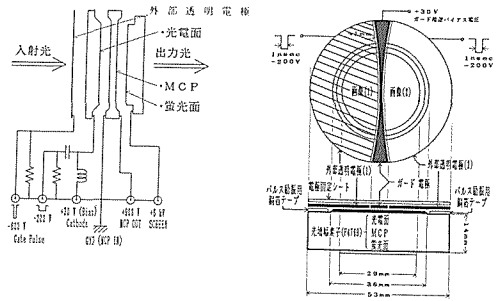


図2 近接型光増幅素子ゲーディング電極部

### 3. シャッターリング電界・輝度分布過渡応答解析

近接型光増幅素子をシャッターリング動作させるには (1) MCP への印加電圧をパルス化する (2) 光電面—MCP 入力面にパルス電圧を印加する (3) 制御電極を別に内蔵或いは外付けさせ、パルス電圧を印加する等の手法が考えられる。しかしながら MCP の抵抗が高抵抗である為、(1)は Recovery Time を要し、短パルス動作は困難である。(2)の方法は印加電圧も 200 V 程度で良く、比較的容易にパルス動作を達成できるが、やはり光電面の高抵抗性の為、数ナノ秒以下のシャッターリングは困難となる。近接型光増幅素子の超高速シャッターリングに関しては A. J. Lieber の報告—4 nsec シャッターリング : 9 lp/mm 解像力—があり、更に速いパルス動作を行なわせるためには、光電面の面抵抗値を下げるか、別途シャッターリング用の電極を用いる必要がある。前者の例として ITT 社製 F 4111 があり、1 nsec のシャッターリング時間を得ているが、光増幅素子の高感度性と光電面の低抵抗性は相反する特性で、低抵抗化のため光電面を厚くすると透過率が落ち、感度が低下する欠点がある。

(3)の制御電極内蔵方式は筆者等と浜松ホトニクス㈱との共同で試作例があるが電極の影が写る欠点がある。これに対し本研究の外部に透明電極を付加する方式は必要電圧が若干大きくなるが非常に容易に超高速シャッターリングが可能となり、分割動作も可能となる。MCP 或いは光増幅素子に関する解像力、感度等の解析は Electro-Optical Products Division ITT の Dr. Edward H. Eberhardt 氏により詳細に報告されている。超高速パルス動作に関しては Los Alamos Scientific Laboratory の A. J. Lieber や Lawrence Livermore の L. B. Olk の実験が有るが、解析は Los Alamos Scientific Laboratory の B. W. Noel の簡単な報告がある程度で実験結果との比較は行なわれていない。図2に於いて抵抗性円板状電極間へのパルス電圧の印加は電極周辺部より行なわれる。このパルス伝播過程の解析は電磁界的には R-Line Representation を用いて可能であるが、過度応答解析を行なうには各空間での逆ラプラス変換が必要となるが、分割動作をしない場合は、これまでの実験により印加パルス電圧は同心円状に内向きに伝播することが確かめられており、また L. B. Olk 等も光電面—MCP 入力面から成る円板状電極間にパルス電圧を印加するときパルス波形が半径方向内向きに約 2 nsec を要して伝播することを実測している故、円板状電極間を円筒座標系での  $r$  依存次元 RLC 分布定数回路と見做した解析が可能となる。

今接地された MCP 入力電極と光電面あるいは光電面前面に付加した外部透明電極が平行に置かれた構造を考える。円板状平行電極を  $N$  個の同心円に分割し、多段 RLC 縦続回路と見做したときの半径  $r \sim r + dr$  の位置の円環平行電極の半径方向単位長さ当たりの抵抗、インダクタンス、キャ

パシタンスはその円環部分でのジュール損失並びに貯えられる磁気，電気エネルギーから以下の様に求められる。但し添え字 0, 1 は光電面，外部透明電極へのパルス電圧印加の場合である。

$$\begin{aligned} R_0 &= \rho_0 / 2\pi : R = R_i / r : R_1 = \rho_1 / 2\pi \\ L_0 &= \mu_0 d_0 / 2\pi : L = L_i / r : L_1 = \mu_1 (d_1 + d_2) / 2\pi \\ C_0 &= 2\pi \epsilon_0 / d_0 : C = C_i r : C_1 = 2\pi \epsilon_1 / (d_1 + \epsilon_{1s} d_0) \end{aligned}$$

図3の構造のMCP入力画と光電面，及び外部透明電極間の静電容量  $C_0, C_1$  の実測値がそれぞれ 62 pF, 17.5 pF であること及び  $d_0 = 0.2$  mm,  $d_1 = 2.5$  mm,  $\epsilon_{1s} = 3.9$  を用いると， $L_0 = 4.0 \text{ E-}11$  H,  $C_0 = 2.78 \text{ E-}11$  F/m<sup>2</sup>,  $R_0 = 318 \Omega$ ,  $L_1 = 5.4 \text{ E-}10$  H,  $C_1 = 2.06 \text{ E-}12$  F/m<sup>2</sup>,  $R_1 = 15.9 \Omega$ ,  $\rho_0 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $\rho_1 = 100 \Omega$ ,  $A = 2.5$  cm (電極直径) となる。図3の  $n$  番目の円環構造で半径はその中心の値を用い，この点を電流接点とし，電圧接点は一番内側の点とした。この等価回路より  $n$  番目の円環の各節点での，電流，電圧は(1)式で与えられる。印加パルス電圧時間幅を後述の実験結果との比較のため FDHM = 2.2 nsec (外部透明電極へ印加)，及び 10.6 nsec (光電面電極へ印加) としたパルス電圧伝播過程の過渡応答分布を計算した。但し  $c$  は光速である。得られた過渡応答電圧分布に光増幅素子の光電面—MCP入力面間の電圧に依存する増幅度の非線形性 (実測値を用いた) 迄を考慮して蛍光面上の輝度に換算して輝度分布の過渡応答を最終的には求めた。

$$\begin{aligned} I_{n-1/2}(t+dt/2) &= \frac{1-R_n}{1+R_n} \frac{dt/2}{L_0} \{I_{n-1/2}(t-dt/2)\} + \frac{1}{1+R_n} \frac{1}{dt/2 L_n} \cdot \frac{\{V_{n-1}(t) - V_n(t)\}}{L_n c} \\ V_n(t+dt) &= V_n(t) + \frac{\{I_{n-1/2}(t+dt/2) - I_{n+1/2}(t+dt/2)\}}{L_n c} \end{aligned} \quad (1)$$

この方程式は半径方向を線路と見る電磁界の回路網解析に於ける R-Line Representation で与えられる伝送方程式を差分化しても求められることが確かめられている。この式を数値計算して求めたパルス電圧を光電面に印加した場合及び外部透明電極に印加した場合の結果を図7, 8に示す。図7の光電面—MCP入力面間にパルス電圧を印加した場合には光電面の高抵抗性と容量が比較的大きいことの2点からパルス電圧の伝播に時間がかかることが示され，中心までの伝播時間は後述する実験結果及び L. B. Olk が先に報告している実測値数 nsec と良く一致した結果が得られた。図の左上の数字はパルス電圧印加後の時間である。

この結果，この光電面を使用する方法ではパルス幅数 nsec 以下では電極中心部までは電圧がかからず，シャッターリングが出来ないことが理論上からも示された。一方外部透明電極を用いる場合には抵抗値を比較的容易に下げることが可能であることと，静電容量を小さく出来，励振部とのインピーダンス整合がとりやすい，電極の分割が容易，特別な近接型光増幅素子を必要としない等の利点があり，印加パルス電圧が零となった後の応答も十分に速く減衰し，従って数 100 psec でのシャッターリングが可能であることを示している。但しシャッターリング電圧は前者に比べ大きくなるが最大でも 1000 V 以下で可能である。

#### 4. 光増幅素子の超高速シャッターリング・輝度分布過渡応答の測定結果

シャッターリング時間の測定は外部透明電極を用いた場合は電極上のパルス波形を直接観測する

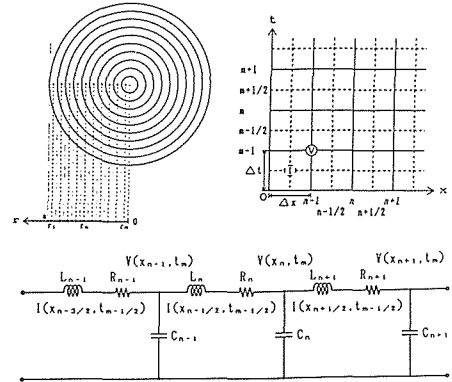


図3 電極部のRLC等価回路表示

ことによっても測定し得るが、光電面電極の場合には困難であるため、より詳細な測定が可能な、短パルスレーザを用いた計測を実施した。ゲートパルサーは、Avalance transistor や Photoconductive switch が考えられるが、今回はパルス幅 1—500 nsec, 出力±1000 V のパルスを負荷抵抗 50 Ω に供給出来る Lead switch を用いた Transmission line pulser (SPI-PULSE 25) を、又短パルスレーザには浜松ホトニクス社製 C1038 を使用した。然し乍らこのゲートパルサーの外部同期信号と出力パルス間のジッターが、15 μs と大きく本測定には使えないため、超高速シャッターリングには不利ではあるが、SPI-25 をトリガー源とする図 6 の測定体系を採用した。

ゲーティングパルスとレーザパルス光の間の時間関係を調節するためにパルサー・外部透明電極間には同軸ケーブルを用いた 111 nsec の固定遅延線を、又トリガー回路・パルスレーザ間には可変遅延線を挿入している。従って、ゲーティングパルスに対して光パルスの遅延時間を変えることにより、任意の時間に於ける光増幅素子の超高速シャッターリング特性を二次元的に測定出来るようになった。この為シャッターリング時間はゲートパルサーから発生出来る 0.8 nsec を印加出来ず最小でも 2.2 nsec とならざるを得なくなった。尚、本測定系の時間分解能は 60 psec, ジッターは約 150 psec であった。但し、シャッターリング時刻は別途測定しているのでこのジッターは測定に影響を与えない。測定は光電面には FDHM 10.6 nsec, 外部透明電極には FDHM 2.2 nsec のパルス電圧を印加して行なった。パルス動作している光増幅素子蛍光面の残光は数 msec であるため、読みだし時間のバラツキを避けるためブランキング回路で読み出しを制御した撮像管光電面上に保持した後に取込んだ。測定された各時間に於ける輝度分布の NEXUS 上での画像を図 4, 5 に示す。

更にこの結果から輝度分布の伝播特性をグラフィックに示すと図 9, 10 となる。図 9 では、光電面の周辺部から印加したパルス電圧が徐々に中心部へと伝播し、更に周辺部から中心部に向かって立ち下がる、いわゆる Iris 効果が見られる。即ち光電面を用いるゲーティ

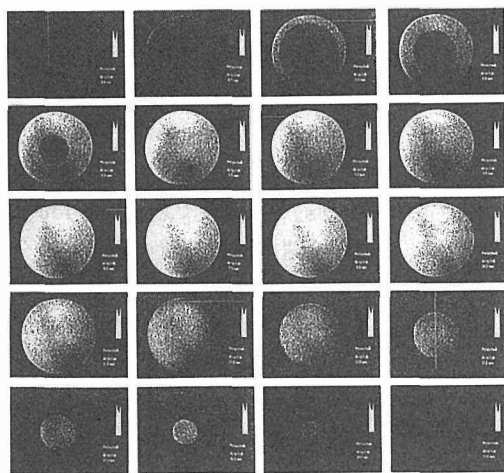


図 4 光増幅素子ゲーティング特性 (光電面) 輝度分布の時間応答特性

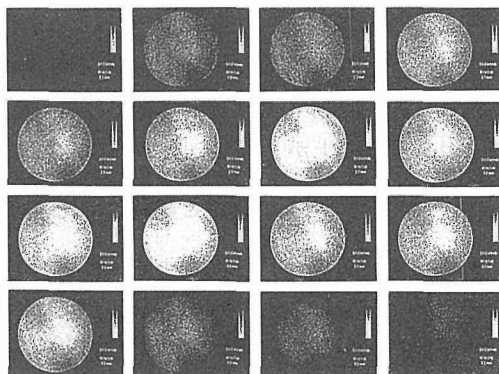


図 5 光増幅素子ゲーティング特性 (外部透明電極) 輝度分布の時間応答特性

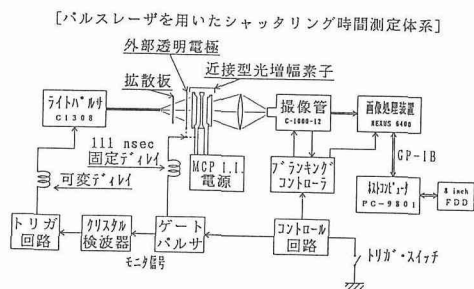


図 6 シャッターリング時間測定体系

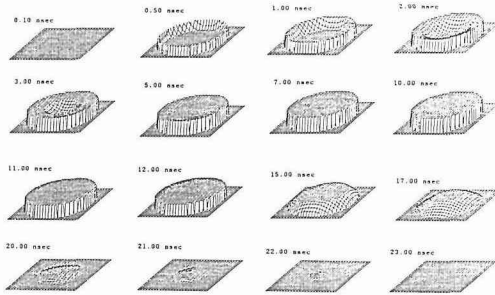


図7 光増幅素子高速シャッターリング特性, 解析結果(光電面)

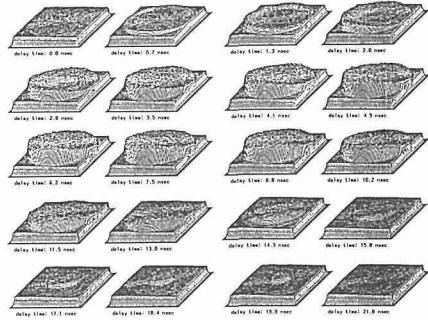


図9 光増幅素子高速シャッターリング特性, 測定結果(光電面)

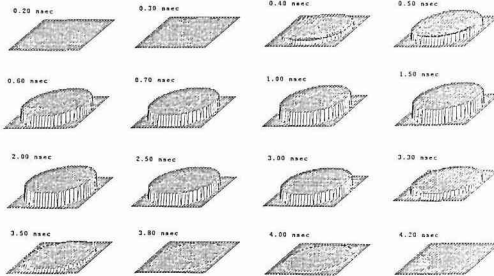


図8 光増幅素子高速シャッターリング特性, 解析結果(外部透明電極)

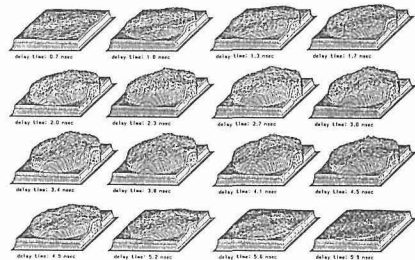


図10 光増幅素子高速シャッターリング特性, 測定結果(外部透明電極)

ングでは立ち上がり 3 ns, 立ち下がり, 13 ns を要し, 数ナノ秒以下のシャッターリングは困難である。一方, 図 10 の外部透明電極では周辺部と中心部とがほぼ同時に応答しており, Iris 効果が見られず, 立ち上がり, 立ち下がり時間は数 100 psec 程度である。

## 5. 理論と実験との比較, 超高速シャッターリングの可能性

解析結果(図 7, 8)と実験結果(図 9, 10)とを比較すると, 光電面使用時にはパルス電界の伝播に時間を要し, アイリス効果が見られるのに対して, 外部透明電極では空間全体に一樣にパルス電界がかかりこの測定の時間分解能ではパルス電界の伝播時間に伴うアイリス効果が見られないという特徴を示していることが明らかにされた。またパルス印加後の立ち上がり時間, 立ち下がり時間に関しても理論と, 実験は定量的にも良く一致している。

従ってこの計算シミュレーションに基づき実験ではパルス電圧源の制約から困難であった 0.4 nsec のパルス電圧を印加したときのシミュレーションを行ない, この超高速撮影装置の限界時間分解能を推定した。その過渡応答結果から, 約 100 psec で中心部までパルスが伝播していることが示され, 光増幅素子のサイズにも依存するが, 100 ps の超高速シャッターリングが可能であることが理論的には示された。

## 6. MTF 特性の解析と測定

光学系の性能を示す指標として, 空間周波数全般の情報が得られる MTF (Modulation Transfer Function) を測定して超高速カメラの性能を評価する。この MTF は入力画像のコントラストが光学系によりどの様に変調されたかを空間周波数の関数として与えるものである。コントラスト

トは (最大照度-最低照度)/(最大照度+最低照度) で与えられ, (2)式で与えられる空間周波数  $f$  の一方向に変化する照度分布が光学系に加えられたときの出力像のコントラストを零空間周波数に於ける値で割ったものを空間周波数  $f$  に於ける  $MTF$  と言う。空間周波数  $f$  を変化させて測定することにより  $MTF$  特性を求めることができる。光学系の応答特性を Line Spread Function  $L(x)$  で表わすとき  $MTF$  は(3)式で与えられる。

正弦波入力画像 (空間周波数  $f$ )

$$H(x) = (1 + \cos(2\pi fx))/2 \quad (2)$$

Modulation Transfer Function

$$MTF(f) = \frac{\int H(x)L(x) dx - \int H(x)L(x - \frac{1}{2f}) dx}{\int H(x)L(x) dx + \int H(x)L(x - \frac{1}{2f}) dx} \quad (3)$$

光電面-MCP 入力面間の  $MTF$

$$P(r) = (m/2 \pi k T t^2) \exp(-mr^2/2 k T t^2) \quad (4)$$

$$L(x) = 2 \int P(r)(r^2 - x^2)^{-1/2} r dr = (m/2 \pi k T t^2)^{1/2} \exp(-mx^2/2 k T t^2) \quad (5)$$

$$MTF_1(f) = \exp(2 \pi^2 k T t^2 f^2 / m) \quad (6)$$

$$MTF_1(f) = \exp(-2.4 * 10^{-3} f^2) \quad (7)$$

MCP (Micro Channel Plate) 内での  $MTF$

$$L(x) = A \int \sqrt{(D/2)^2 - (x-y)^2} dy \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &= \pi AD^2/4 \{1/2 + \pi^{-1} \sin^{-1}(1-2x/D) + 4/\pi (x/D)^{1/2} (1/2-x/D)(1-x/D)^{1/2}\} \\ &= 1/2 + \pi^{-1} \sin^{-1}(1-2x/D) + 4/\pi (x/D)^{1/2} (1/2-x/D)(1-x/D)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$MTF_2(f) = (2 J_1(\pi f D) / \pi f D)^2 \quad (10)$$

$$MTF_2(f) = \exp(-10 d^2 f^2 / 3) : \text{Gaussian approximation} \quad (11)$$

MCP 出力面-蛍光面間での  $MTF$

$$MTF_3(f) = \exp(-3.3 * 10^{-3} f^2) \quad (12)$$

近接型光増幅素子の  $MTF$  特性

$$MTF_{PH}(f) = MTF_1 * MTF_2 * MTF_3 = (-6.2 * 10^{-3} f^2) \quad (13)$$

この  $MTF$  特性を決める要因としては接写レンズ(前, 後), 近接型光増幅素子, フィルムあるいは撮像管とデジタル画像処理系があるが, 近接型光増幅素子の特性が最も影響が大きく, ほとんどこの特性で決まってしまう。近接型光増幅素子の  $MTF$  特性は, ①光電面-MCP 入力面間での電子の横方向広がり ② MCP チャンネル直径 ③ MCP 出力面-蛍光面間での電子の横方向広がりの3つの要因で大体決定される。ミニコピー・フィルムでは 200 lp/mm 以上, レンズ系も 50 lp/mm あり, 光増幅素子の解像力約 20 lp/mm に比べ大きいので無視出来ると考えると,

①光電面-MCP 入力面間の解像力: 光電面から出る電子の初期エネルギー分布をマックスウェル分布とし, かつ等方に飛び出すと仮定すると, MCP 入力面での Point Spread Function  $P(r)$  は(4)式, その積分で与えられる  $LSF$  は(5)式となる。(5)式を(4)式に代入すると  $MTF$  が(6)式の様になる。電子の飛行時間  $t = l \sqrt{\frac{2m}{eV}}$  が  $l = 0.2 \text{ mm}$ ,  $v = 200 \text{ V}$  とすると,  $t = 48 \text{ psec}$  となることと, 初期エネルギーが 0.3 eV であることを考慮すると, (7)式となる。

② Micro Channel Plate の解像力: MCP や fiber のごとく直径  $D$  の多数の channel からなる光学系の LSF は(8)式の様計算されるから, (4)式に代入すると Drougard 等がもとの  $MTF$  (10)式が導かれる。Gaussian 近似をとると(11)式で与えられる。

③ MCP 出力面—蛍光面間の解像力: 前述の①と全く同様にして  $l=1.3\text{ mm}$   $V=5\text{ kV}$  初期エネルギー .25 eV として(12)式が求まる。近接型光増幅素子の  $MTF$  はこれ等の積として(13)式となる。これらを総合した  $MTF$  の解析結果を図 11 の理論値に示す。

近接型光増幅素子の外部透明電極によるシャッター時間 1 nsec 時のテストチャート測定結果とその時の  $MTF$  特性を図 11 に示す。実験値が理論値に比べ下がっているのは解析では考慮しなかった長時間使用したための近接型光増幅素子の性能低下の影響と同じく解析では無視した光電面, 蛍光面での解像力低下, 及び他の光学系の影響と考えられる。この中では前段, 後段とふたつの光学系の  $MTF$  及び撮像管の影響が最も大きい。

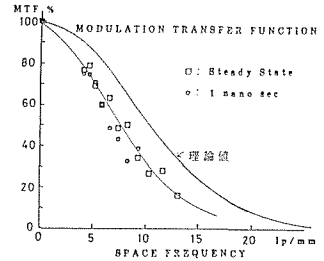


図 11 無掃引型超高速カメラ  $MTF$  特性

## 7. 結 論

通常の近接型光増幅素子に透明電極を付加する超高速撮影装置のシャッター特性をパルスレーザを用いて測定し, 光電面使用時にはアイリス効果が見られるが, 外部透明電極を使用した場合はおおよそ 100 psec 程度でパルス電界が伝播し, 超高速シャッターリングが可能となることが示された。またこの電極部分を一次元の  $r$  依存 RLC 分布定数線路と見做した解析結果は実験的に求めた輝度分布の過渡応答結果と定量的にも良い一致を示した。更に 1 nsec のシャッターリングを達成しその  $MTF$  特性を求め解析結果と比較した。今後の課題としては, 分割動作時のパルス電界伝播の理論解析, サブナノ秒短パルス電圧発生法と励振部の改善, 可視域に限定しない X 線や赤外光領域までの拡大等があげられる。

本研究は一部文部省科学研究費補助金 61050037 他を受けて行なった。

最後に, 本研究を遂行するにあたり, 北海道大学工学部, 諸住 高教授, 小川雄一教授, 山崎初男教授, 笠原達雄教授, 大阪大学レーザ・核融合研究センター山中龍彦教授, 山中正宣助教授, には貴重な御指導, 御援助を賜りました。また北海道自動車短期大学小沢保知学長に感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) E. C. Eberhardt; Applied Optics, Vol. 16, 1977
- (2) A. J. Lieber; The Rev. of Scien. Instru.
- (3) Proc. of Interna. Con. on High Speed Photography and Photonics
- (4) 榎戸武揚; 学術月報 Vol. 38, Nou 6 1985, 6
- (5) 榎戸武揚; 電子通信学会マイクロ波研究会 資料 MW 85-54, 1985
- (6) 榎戸武揚; 画像工学研究会, 電子通信学会 電子デバイス研究会, 電気学会, テレビジョン学会, レーザー学会 ED-86-24 1986, 6
- (7) B. W. Noel et al.; Los Alamos Conference on Optics Vol. 288 1981
- (8) 榎戸武揚; 電子情報通信学会, 電子デバイス研究会, 画像工学研究会, 電気学会 EID 80-10, p. 55-60, 1987, 6