

18 Gated Night Vision System (15711)  
on a gated night vision system

松田正幹

藤沢 彰

Masaki Matsuda

Akira Fujisawa

防衛庁第1研究所

The 1st Research Center of  
Japan Defense Agency

## §1 序言

低照度下の遠方の物体を光学的に観測する方法には、星明り等の微光の反射を受光するパッシブ法と投光器を用いて物体を照明し、その反射光を受光するアクティブ法とがある。遠距離物体の観測にはアクティブ法が有利である。アクティブ法の投光器の光源として、従来Xeランプ等の放電管が用いられてきたが、投光器により目標を照射観測するとき、目標物体の手前にはある大気による散乱等の影響により映像画質が低下し、目標観測可能距離の限界を定める大きな原因となっている。

最近レーザー発振器の開発が進むにつれて、投光器としてレーザーが用いられるようになり、さらに進歩したレーザー照射ゲートイメージ方式が開発されている。本報告では、レーザー照射ゲートイメージ方式の理論的解析とYAGレーザーおよびガラスレーザーの投光器をもつ装置による実験結果について述べる。

## §2 送信出力と受信入力

### 1) 大気による後方散乱

本装置の構成を図1に示す。ビーム幅 $\theta$ で送信されたレーザー光は目標を照射し、その反射光は口径 $D$ の受信光学系にて受信される。しかしながら受信入力の中には、目標の反射光以外の途中の伝播路中の大気による散乱が含まれている。レーザー出力を $P(t)$ とすると、距離 $r \sim r + \Delta r$ 間にある大気からの散乱光のうち、角度 $\alpha_n$  ( $\alpha_n < \theta$ )に含まれるものは、

$$P(t - \frac{2r}{c}) \alpha_n^2 D r^2 T_t T_r U e^{-2\alpha r} \Delta r \quad \dots (1)$$

$$4 \pi \theta^2 r^2$$

である。ただし、

- $T_t$ : 送信光学系の透過率
- $T_r$ : 受信光学系の透過率
- $c$ : 光速
- $U$ : 大気の散乱係数
- $\alpha$ : 大気の減衰係数

である。したがって角度 $\alpha_n$ に含まれる受信散乱入力 $P_s(t)$ は

$$P_s(t) = \int_{r_c}^{r_b} \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K \alpha_n^2 D r^2 U e^{-2\alpha r}}{4 \pi \theta^2 r^2} dr \quad \dots (2)$$

となる。ただし、 $r_c$ は送受信地点から送信ビームと角度 $\alpha_n$ が交差する地点までの距離であり、 $r_b$ は $\alpha_n$ が目標を含む場合 $r$ とし含まぬ場合 $\infty$ である。また $K = T_t T_r$ である。

### 2) 目標からの反射光

簡単のため目標は完全散乱面であると仮定する。距離 $r$ にある目標の $S_1$ 部分の反射光のうち時刻 $t$ に受信される反射入力 $P_r(t)$ は、

$$P_r(t) = \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K \alpha_n^2 D r^2 \rho e^{-2\alpha r}}{\pi \theta^2 r^2} \quad \dots (3)$$

となる。ただし $\rho$ は目標の反射係数である。

## §3 像増倍管による光シャッター作用

### 1) 像増倍管中の電子流

像増倍管は入射光の光増倍作用だけでなく任意の時間の光シャッター作用をもつ。大気による散乱光および目標からの反射光は、像増倍管の光電面においてそれそれ次のような電子流 $i_s(t)$ 、 $i_t(t)$ に変換される。

$$i_s(t) = g(t) \int_{r_c}^{r_b} \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K \alpha_n^2 D r^2 U e^{-2\alpha r}}{4 \pi \theta^2 r^2 h c} dr \quad \dots (4)$$

$$i_t(t) = g(t) \int \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K \alpha_n^2 D r^2 \rho e^{-2\alpha r}}{\pi \theta^2 r^2 h c} \quad \dots (5)$$

ただし  $\eta$  は光電面の量子効率、 $g(t)$  は像増倍管のシャッター作用にともなう電子ビーム透過率、 $n$  はプランクの定数、 $\lambda$  は送信レーザー波長である。さらに光電面からは受信光学系の迷光による電子流および熱電子流が生じ、その電子流密度  $I_n$  は次のように表わされる。

$$I_n = g(t) \left\{ \int_0^{\infty} \frac{P_{sr}(\lambda') \eta(\lambda')}{h \left( \frac{c}{\lambda'} \right)} d\lambda' + \frac{P_{\lambda m} \eta(\lambda_m)}{h \left( \frac{c}{\lambda_m} \right)} \right\} \dots (6)$$

ただし、 $P_{sr}$  は迷光の光電面上における入力密度、 $P_{\lambda m}$  は等価雑音入力密度である。 $\lambda_m$  は等価雑音入力が定義された波長である。

### 2) 電子ビームシャッター

レーザー送信出力を尖頭値  $P_0$ 、幅  $T_1$ 、周期  $T_2$  のパルスであると仮定すると(図2) 距離  $r$  の目標からの反射光は、受信されて送信パルスより  $\frac{2r}{c}$  の遅れをもつ周期パルスとなる(図3)。また同時に空気中の散乱光も周期信号として受信される。像増倍管の電子ビーム透過率をレーザー送信出力より  $T_3$  の遅れをもつ幅  $T_4$  の周期パルスとし(図4)

$$T_3 < \frac{2r}{c}, \quad \frac{2r}{c} + T_1 < T_3 + T_4 \dots (7)$$

とすれば、目標からの反射光に対応する電子ビームは像増倍管にて増幅される。同時に目標付近の散乱信号および受信光学系の迷光および熱電子ノイズも若干透過され像増倍管にて増幅される。しかしながら目標からの反射光以外の大気の散乱、迷光、熱電子ノイズはこのシャッター作用により大幅に除かれるため像増倍管の出力像画質は著しく向上する。

## §4 映像増幅と観測可能最小入力信号

### 1) 写真フィルムによる観測

受信光学系に入射する目標からの反射光および目標付近の散乱光は像増倍管の光電面上に結像される。図1において、遠方にある目標の  $S$  部分の光電面上における結像面積は  $(\alpha n f_0)^2$  である。 $E D \alpha n f_0$  は受信光学系の焦点距離である。したがって光電面に入射する目標反射光の入力密度  $P_T$  は式(3)より、

$$P_T = \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K P D n^2 e^{-2\alpha r}}{\pi \theta^2 r^2 f_0^2} \dots (8)$$

となる。像増倍管の利得(蛍光面輝度/光電面入力放射照度)を  $G$  とすると、蛍光面輝度  $B_{TS}$  は、

$$B_{TS} = \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K P D n^2 e^{-2\alpha r} G}{\pi \theta^2 r^2 f_0^2} \dots (9)$$

となる。像増倍管の拡大率を  $m$  とすると、蛍光面上の像の面積は  $(\alpha n f_0 m)^2$  であるから、接写レンズに入射する光束は、

$$\frac{B_{TS} (D \alpha n f_0 m)^2}{4 l_0^2} \dots (10)$$

である。ただし  $D$  は接写レンズの口径、 $l_0$  は蛍光面と接写レンズ間の距離である。接写レンズの焦点距離を  $f_e$ 、接写レンズとフィルム面間の距離を  $l_t$  とすると、フィルム面上の像の面積は、

$$(\alpha n f_0 m \frac{l_t}{l_0})^2 \dots (11)$$

となり、フィルム面上の照度  $\phi_s$  は

$$\phi_s = \frac{P(t - \frac{2r}{c}) K P D n^2 D e^2 \alpha n^2 m^2 G e^{-2\alpha r}}{4 \pi \theta^2 r^2 l_0^2} \dots (12)$$

となる。レーザー送信出力を尖頭値  $P_0$ 、幅  $T_1$  のパルスとし、フィルムによる観測時間を  $T_5$  とすればフィルムに入射する光量は、

$$L_f = \frac{P_0 k P D r^2 D_e^2 \alpha n^2 m^2 G e^{-2\alpha r} T_1 T_5}{4\pi \theta t^2 r^2 l_0 T_2} \quad \dots (13)$$

となる。ところでフィルムの濃度と入射光量との関係は図5に示される。図によるとフィルムは $L_0$ 以上の入射光量に対して感度を有する。また $L_0$ は

$$L_0 = \frac{0.8}{\text{ASA感度}} \left( \frac{\text{lmsec}}{\text{m}^2} \right) \quad \dots (14)$$

により与えられる。したがってフィルムによる検出可能最小信号 $L_f$ は

$$L_f \geq L_0 \quad \dots (15)$$

により与えられる。

## 2) 眼による観測

蛍光面輝度 $B_{rs}$ なる物体を口径 $D_e$ 、倍率 $M$ なる接眼レンズを用いて蛍光面、接眼レンズ間の距離 $l_1$ にて観測する場合、眼の観測する物体の輝度 $B_{se}$ を

$$T_2 \leq 0.2 \text{ 秒の場合} \quad B_{se} = \frac{1}{T_2} \int_T^{T+T_2} \frac{\pi B_{rs} D_e^2}{4M^2 l_1^2} dt \quad \dots (16)$$

$$T_2 > 0.2 \text{ 秒の場合} \quad B_{se} = \frac{1}{0.2} \int_T^{T+0.2} \frac{\pi B_{rs} D_e^2}{4M^2 l_1^2} dt \quad \dots (17)$$

とおく。物体の輝度と分解能との関係は図6により表わされ、これにより接眼系を用いた場合の眼の分解能および観測可能最小信号を知る事が可能である。

## §5. 映像画質

### 1) 光量十分なる場合の分解能

通常、光学系の分解能はコントラストの高テストチャートの観測により定められる。本実験装置において目標は図7に示すように結像される。無限遠の物体を観測する場合、分解能 $Q_0$  radの受信光学系による最小分解可能長は光電面上にて $f_0 Q_0$ である。 $lp/mm$  単位を用いると分解能は、

$$Q_0 = \frac{1}{2f_0 Q} \quad \dots (18)$$

である。したがって像増倍率の分解能を $Q_i (lp/mm)$ とすると両者を組合せた分解能は光電面上で $Q_s lp/mm$ となり次式で表わされる。

$$\frac{1}{Q_s^2} = \frac{1}{Q_0^2} + \frac{1}{Q_i^2} \quad \dots (19)$$

したがって、光電面上において $1/2Q_s$ なる長さのものまで観測可能である。これは蛍光面上において

$$\frac{m}{2Q_s} \quad \dots (20)$$

である。接写光学系の分解能を $Q_e (rad)$ とすると蛍光面上における分解能 $Q_p$ は

$$\frac{1}{Q_p^2} = \left( \frac{m}{Q_s} \right)^2 + (2 \log_e)^2 \quad \dots (21)$$

で与えられる。したがって、蛍光面上における最小観測可能長は $1/2Q_p$ である。これはフィルム面上では

$$\frac{lt}{2Q_p l_0} \quad \dots (22)$$

となる。フィルムの分解能を $Q_f (lp/mm)$ とするとフィルム面上の最小分解可能長は $1/2Q_f$ となり、

$$\frac{1}{Q_f^2} = \left( \frac{lt}{Q_p l_0} \right)^2 + \frac{1}{Q_f^2} \quad \dots (23)$$

となる。1/Qt に対する光電面の最小分解可能長は

$$\frac{l_0}{2m\Omega t l f} \dots (24)$$

である。したがって本装置の総合分解能  $\alpha t$  (rad) は

$$\alpha t = \frac{l_0}{2m\Omega t f_0 l f} \dots (25)$$

となる。式(19), (21), (23)を用いさらに変形すると

$$\alpha t^2 = \frac{1}{4f_0^2} \left\{ \frac{1}{Q_0^2} + \frac{1}{Q_i^2} + \frac{(2l_0 f_0)^2}{m^2} + \frac{l_0^2}{m^2 Q_f^2 l f^2} \right\} \dots (26)$$

となる。

2) 量子ノイズと分解能

光電面へ入射する光入力密度が減少するにしたがって像増倍管中の電子の量子ノイズが増加し、映像分解能に大きな影響を与える。図8において像増倍管中の電子流に注目すると、観測時間中に蛍光面に到達する電子数は目標A, および目標B に対してそれぞれ  $N_A, N_B$  であり次のように表わされる。

$$N_A = \frac{P_0 K T_1 T_5 \eta P_A D r^2 \lambda e^{-2\alpha r}}{\pi \Omega t^2 r^2 T_2 h c} \alpha n^2 + \int_T^{T+T_5} g(t) \int_{r_c}^{r_b} \frac{\rho(t - \frac{2r'}{c}) K \eta \lambda D r'^2 \lambda e^{-2\alpha r'} \alpha n^2}{4\pi \Omega t^2 r'^2 h c} dr' dt + \frac{I_n T_4 T_5 (\alpha n f_0)^2}{T_2} \dots (27)$$

$$N_B = \frac{P_0 T_1 T_5 \eta P_B D r^2 \lambda e^{-2\alpha r}}{\pi \Omega t^2 r^2 T_2 h c} \alpha n^2 + \int_T^{T+T_5} g(t) \int_{r_c}^{r_b} \frac{\rho(t - \frac{2r'}{c}) K \eta \lambda D r'^2 \lambda e^{-2\alpha r'}}{4\pi \Omega t^2 r'^2 h c} \alpha n^2 dr' dt + \frac{I_n T_4 T_5 (\alpha n f_0)^2}{T_2} \dots (28)$$

第1項は目標からの反射光、第2項は大気の大散乱光、第3項は受信光学系の迷光および熱電子ノイズによるものである。ただし  $I_n$  は光電面に入射する迷光にともなう電子流密度および熱電子として光電面から出る電子流密度の和である。ここで信長  $S$  およびノイズ  $N$  を次のように定義する。

$$S = N_A - N_B = \frac{P_0 \eta K \alpha n^2 D r^2 \lambda (P_A - P_B) T_1 T_5 e^{-2\alpha r}}{\pi \Omega t^2 r^2 h c T_2} \dots (29)$$

$$N = \sqrt{N_A + N_B} = \left\{ \frac{P_0 \eta K \alpha n^2 D r^2 \lambda (P_A + P_B) T_1 T_5 e^{-2\alpha r}}{\pi \Omega t^2 r^2 h c T_2} + 2 \int_T^{T+T_5} g(t) \int_{r_c}^{r_b} \frac{\rho(t - \frac{2r'}{c}) K \eta \alpha n^2 \lambda D r'^2 \lambda e^{-2\alpha r'}}{4\pi \Omega t^2 r'^2 h c} dr' + \frac{2 P_n \eta \lambda (\alpha n f_0)^2 T_4 T_5}{h c T_2} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (30)$$

ただし、 $P_n$  は  $I_n$  に対する等価入力とある。ここで  $C_T = (P_A - P_B) / P_A$  とすると  $S/N$  は次のように与えられる。

$$R = \frac{S}{N} = \alpha n D r C_T \sqrt{\frac{P_0 K \eta P_A T_1 T_5 \lambda e^{-2\alpha r}}{(2 - C_T) \pi \Omega t^2 r^2 h c T_2}} \times \left\{ 1 + \frac{2 \int_T^{T+T_5} \int_{r_c}^{r_b} \frac{\rho(t - \frac{2r'}{c}) K D r'^2 \lambda e^{-2\alpha r'}}{4\pi \Omega t^2 r'^2} dr' dt + \frac{2 P_n T_4 T_5}{T_2} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (31)$$

となる。したがって電子の粒子性により定まる分解能は

$$\alpha_n = \frac{h}{4\pi C_T} \sqrt{\frac{\pi \theta^2 r^2 (2-C_T) h C T_2}{K \eta P_A e^{-2a r} \lambda P_0 T_1 T_5}} \times \sqrt{1 + \frac{2 \int_{r_0}^{r_0+T_1} \int_{r_c}^{r_b} \frac{P(t-\frac{2r}{c}) K P r^2 e^{-2a r}}{4\pi \theta^2 r^2} dr dt - \frac{2 P_0 f_0^2 T_4 T_5}{T_2}}{P_A (2-C_T) K P r^2 P_0 T_1 T_5 e^{-2a r}}}$$

..... (32)

で与えられる。

### 3) 装置の総合分解能

装置の総合分解能  $\alpha_{sys}$  は蛍光面を写真観測する場合と目視観測する場合により異なり、写真観測による場合は主として式(26)および式(32)で与えられる  $\alpha_t$  および  $\alpha_n$  により定まり

$$\alpha_{sys}^2 = \alpha_t^2 + \alpha_n^2 \quad \dots (33)$$

で表わされる。ただし式(15)の条件を同時に満足しなければならぬ。目視観測の場合は式(26)および式(32)で与えられる  $\alpha_t, \alpha_n$  の他に図6にて与えられる蛍光面輝度により定まる分解能  $\alpha_e$  にも依存する。したがって総合分解能  $\alpha_{sys}$  は

$$\alpha_{sys}^2 = \alpha_t^2 + \alpha_n^2 + \alpha_e^2 \quad \dots (33)'$$

により与えられる。

## 86 実験装置

実験に用いた装置の構成の主要部を図9に示し、実験装置の主要諸元を表1および表2に示す。赤外光 (1.06  $\mu$ m) の送信器として Nd:YAG レーザ および Nd:ガラス レーザ を用い、Nd:YAG レーザ の共振器中に LiNbO<sub>3</sub> を挿入し可視光 (0.53  $\mu$ m) の送信器とした。また像増倍管の諸特性は直流電圧動作時の値である。観測は目視および写真フィルムにて行なった。表2にコダック 2475 LC-マニックフィルムを用いた場合、このフィルムにて検知しうる最小光電面入カエネル  $\alpha_e$  を示した。ただしフィルムに増感現像処理を行なうものとする。

## 87 実験および実験結果

昭和45年11月伊豆半島、川奈海岸において装置 A, B, C を用い距離 2~10 km の目標船およびターゲットを観測し、目標距離と分解能との関係を測定した。装置 A, B および装置 C による測定値をそれぞれ図10、および図11に○印にて示す。装置 A, B および装置 C を用いた実験においてそれぞれ観測時間中に送信されたエネルギーはそれぞれ 2~10 J, 1 J である。実験時の諸元にしたがい装置 A, B および C について式(33)を用い目標距離と分解能との関係を求めそれぞれ図10および図11に示した。解析に際して、観測時間中に送信されたエネルギー E を  $\rho \times \gamma \times \Omega$  の想定を行なった。

$$h = 5, \quad C_T = 1, \quad E = \frac{P_0 T_1 T_5}{T_2}, \quad P_A = 0.2, \quad a = 4, \quad T_4 = 1/4 \text{ sec}$$

また 1.06  $\mu$  および 0.53  $\mu$  に対する減衰係数  $a$  を実験時の視程 (3~5 km) より計算により求めた。さらに  $S-1$  光電面および  $S-20$  光電面の量子効率をそれぞれ  $\eta = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\eta = 1.2 \times 10^{-3}$  とし、これの他の値は表1および表2の諸元を示した値を用いた。図10、図11において実線部分はそれぞれの装置においてコダック 2475 LC-マニックフィルムにて記録する場合、観測可能な領域を示す。いずれの場合も 1/4 sec のシャッター動作により大気の大散乱、迷光、熱電子ノイズの影響は無視される。

## 88 結言

本報告では、はじめにレーザ送信出力と目標距離および観測分解能等の関係を理論的に解析し、これらの関係を明らかにした。さらに YAG レーザ、ガラスレーザを送信光源としたレーザ照射ゲートイメジ装置を試作し実験により目標距離と分解能との関係等を求めた。理論値と実験値との間には若干のちがいがみられる。この原因は目標の反射特性および大気の大散乱等の想定が実際と異なったためであろうと思われる。本装置の解析および実験により次の事実を知ることができた。

- 1) 受信入力に同期した  $1/\mu\text{sec}$  程度の受信部のゲート動作により通常の天候における大気の散乱の影響による画質の劣化は避けられ、さらに暗視装置でハレーションの源となる視野内の光および迷光、熱雑音も除かれるため観測画質はよくなって向上する。
- 2) 受信部のゲート動作により大気の散乱、迷光、熱雑音を無視しうる状態においては、装置の分解能は観測時間中に送信するエネルギーに依存し、送信エネルギーを大きくする程、観測装置の分解能は向上する。
- 3) 送信波長  $1.06\mu$ 、 $0.53\mu$  を比較した場合、送信エネルギーが等しいならば、視程数 km 以上目標距離約 10 km の状態では、分解能において受信部の量子効率の大きい波長  $0.53\mu$  が優る。
- 4) 遠距離目標の観測分解能 (観測可能距離) は量子雑音により定まる。観測分解能を向上させるためには送信エネルギーを増大させるとか、観測時間を延長する等の方法はあるが、さらに量子雑音により画質が支配される領域における情報処理技術の開発を行なう必要がある。

## 文 献

- 1) Don. B. Newman "Precision Range-Gated Imaging Techniques" AFAL-TR-64-278
- 2) H. Steingold, R. E. Strach "Back scatter Effects in Active Night Vision Systems" Appl. Opt., Vol. 8, 1, p 147 (1969-Jan)
- 3) 高田隆, 海野陽一, 後藤顯也 "物体探知装置" 電子技術 (1970~00) p 33
- 4) R. Kingslake "Applied Optics and Optical Engineering Vol II" Academic Press New York 1955
- 5) George C. Higgins, "Methods for Engineering Photographic Systems" Appl. Opt. Vol. 3, 1. (1964-Jan)

諸元	レーザー	波長	送信出力	送信繰返し	送信光学系 透過率	送信ビーム幅
送信器 A	Na-YAG	1.06 $\mu$	50mJ	32pps	70%	5mrad
送信器 B	Na-YAG	1.06 $\mu$	1.6J	1pps	70%	5mrad
送信器 C	Na-YAG LIMED	0.53 $\mu$	10mJ	32pps	70%	5mrad

表1 実験に用いた発振器の諸元

諸元	送信器	受信光学系				像増倍管			像増倍管の構成	相互光学系		総合 分解能	最大検出可能 フラク
		口径	距離	透過率	型式	被照径	利得	分解能		口径	相互軸位置		
装置 A	A	345 mm	1000 mm	70%	反射	S-1	$8 \times 10^5$ *	20 lp/mm	NEC RCA 8605/V1	22mm	45mm	$2 \times 10^{-5}$ rad	$4.0 \times 10^{-7}$ J/m <sup>2</sup> (1.06 $\mu$ )
装置 B	B	345 mm	1000 mm	70%	反射	S-20	$4 \times 10^8$ *	20 lp/mm	NEC RCA 8605/V1	22mm	45mm	$2 \times 10^{-5}$ rad	$2.0 \times 10^{-10}$ J/m <sup>2</sup> (0.53 $\mu$ )

\*単位  
( $\frac{cm^2/sec}{J/m^2}$ )

表2 実験装置の諸元

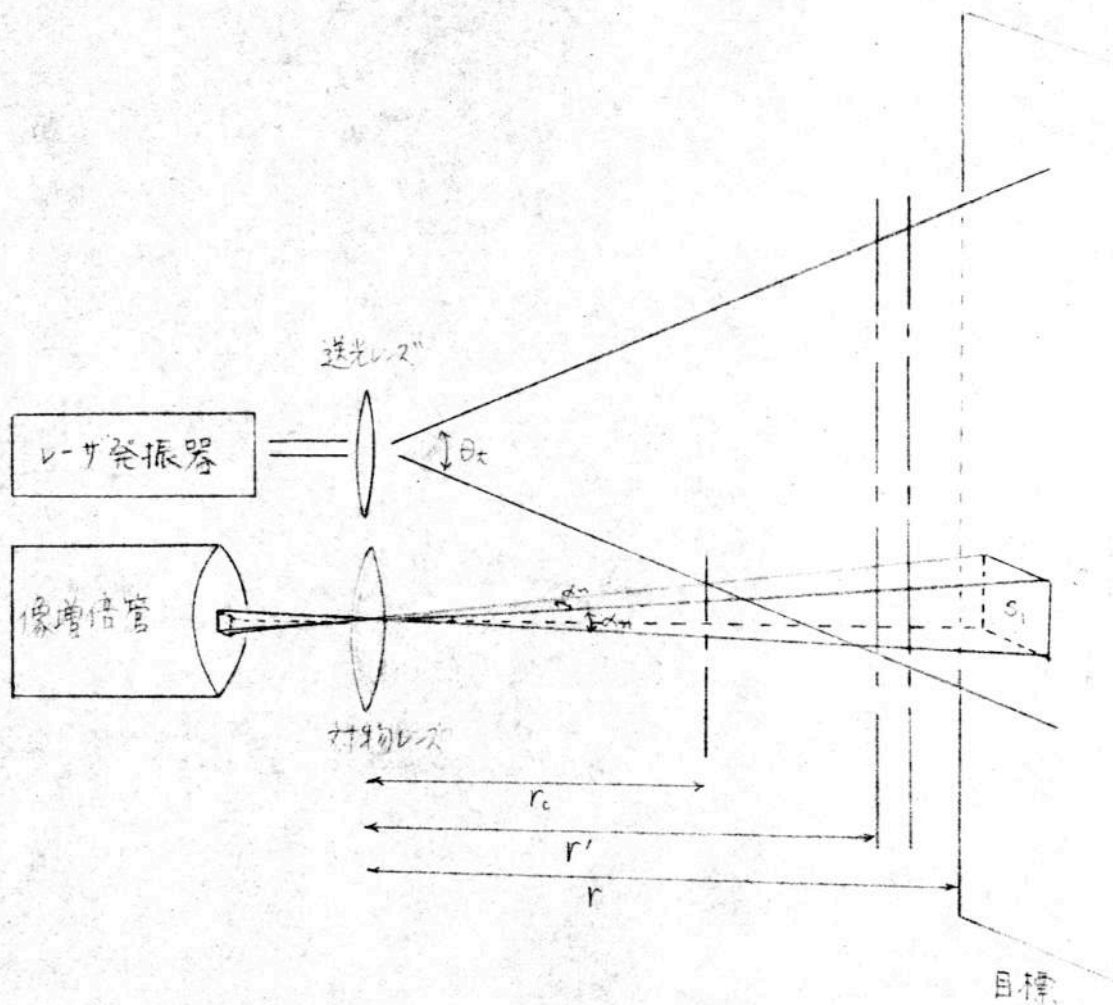


図1 光波レーダの構成



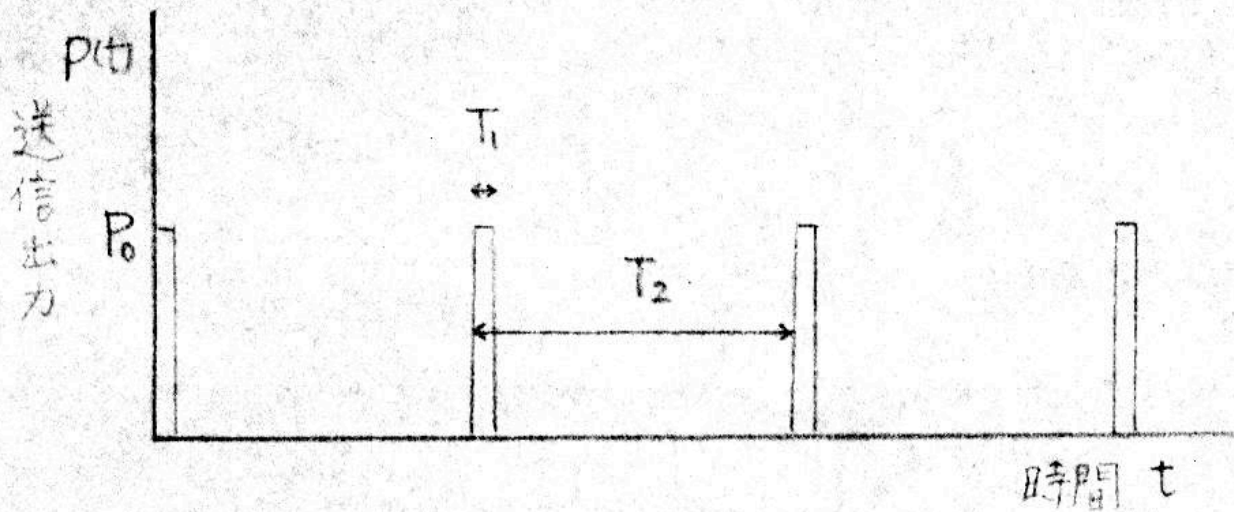


図2 レーザ送信出力の時間波形

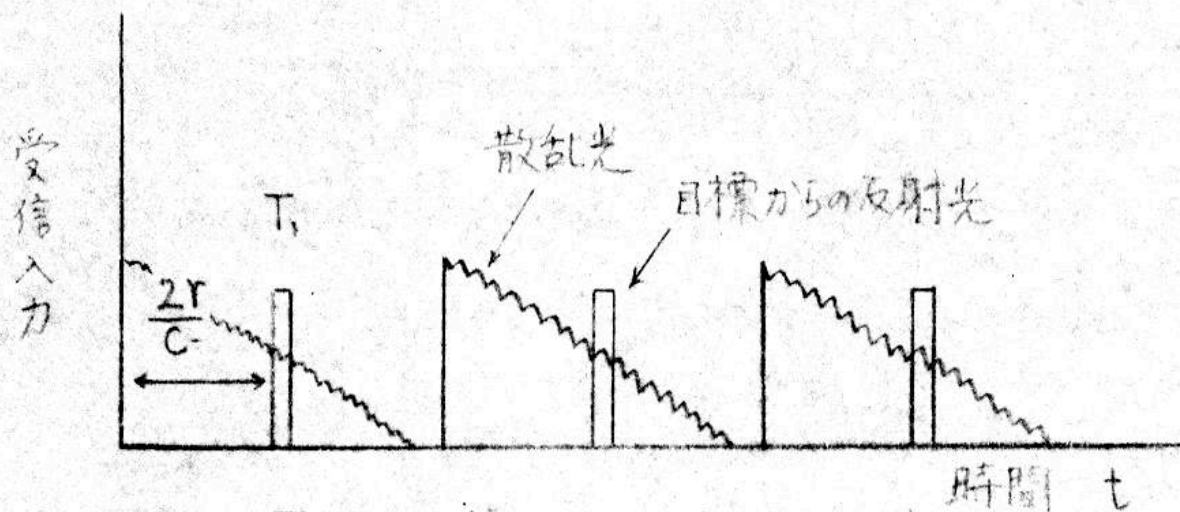


図3 目標からの反射入力と大気による散乱入力

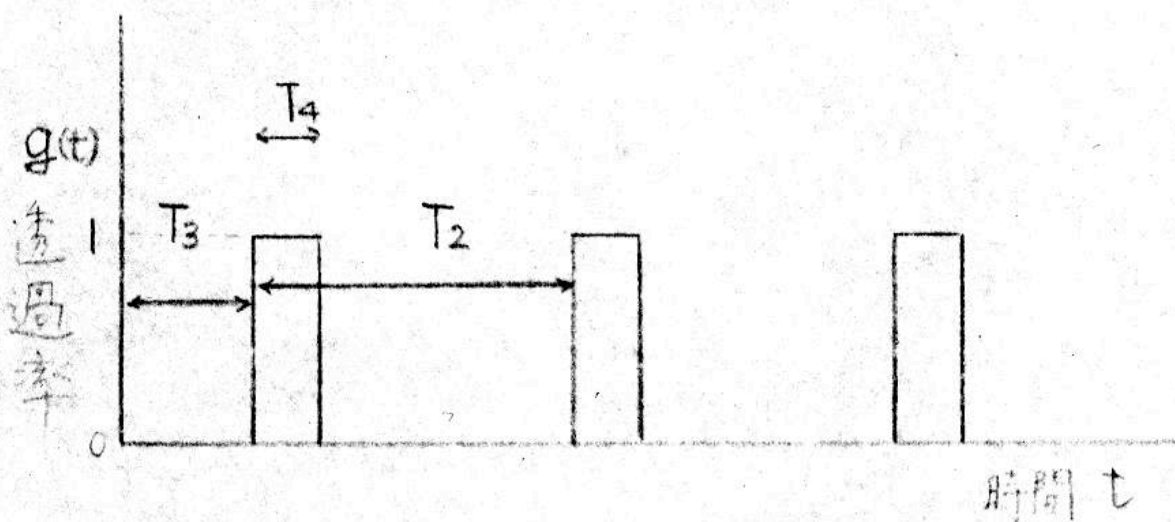


図4 電子ビーム透過率の時間波形

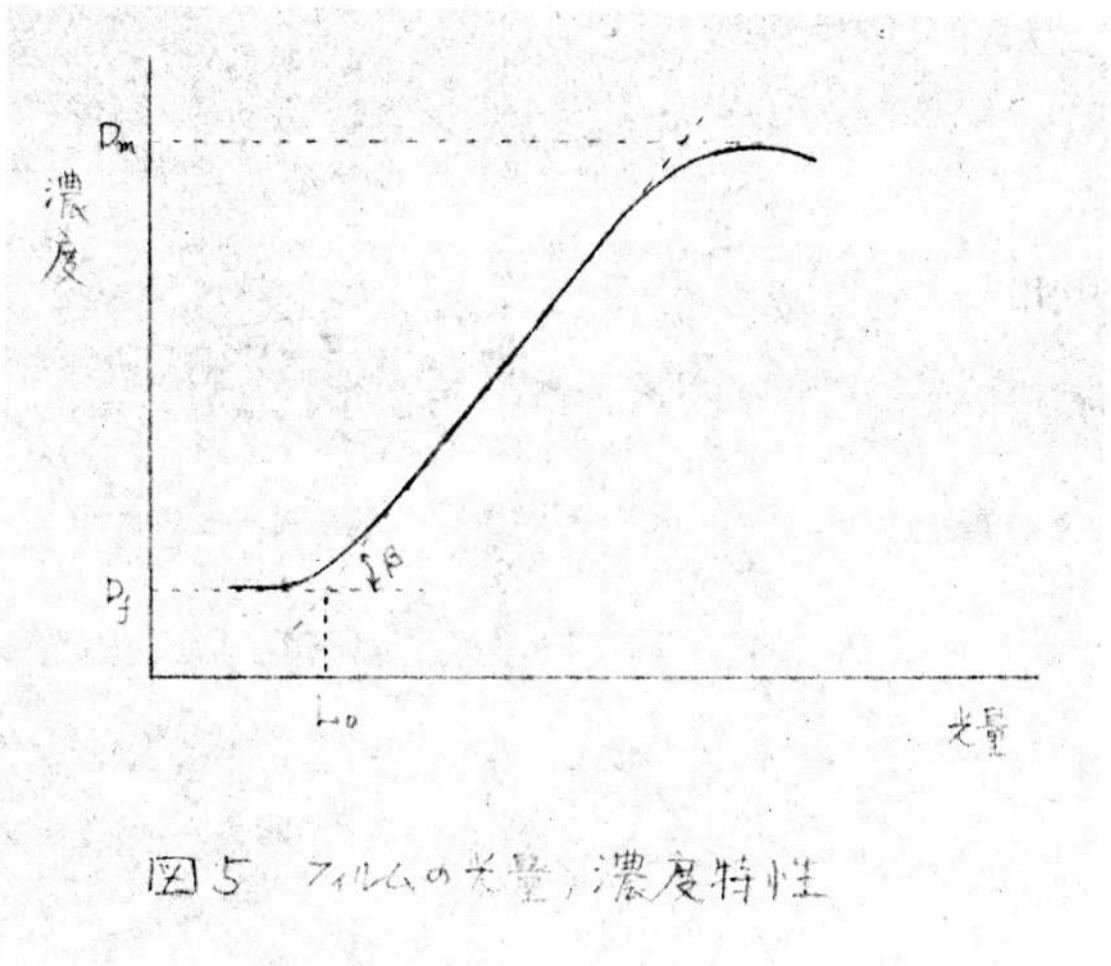


図5 フィルムの光量、濃度特性

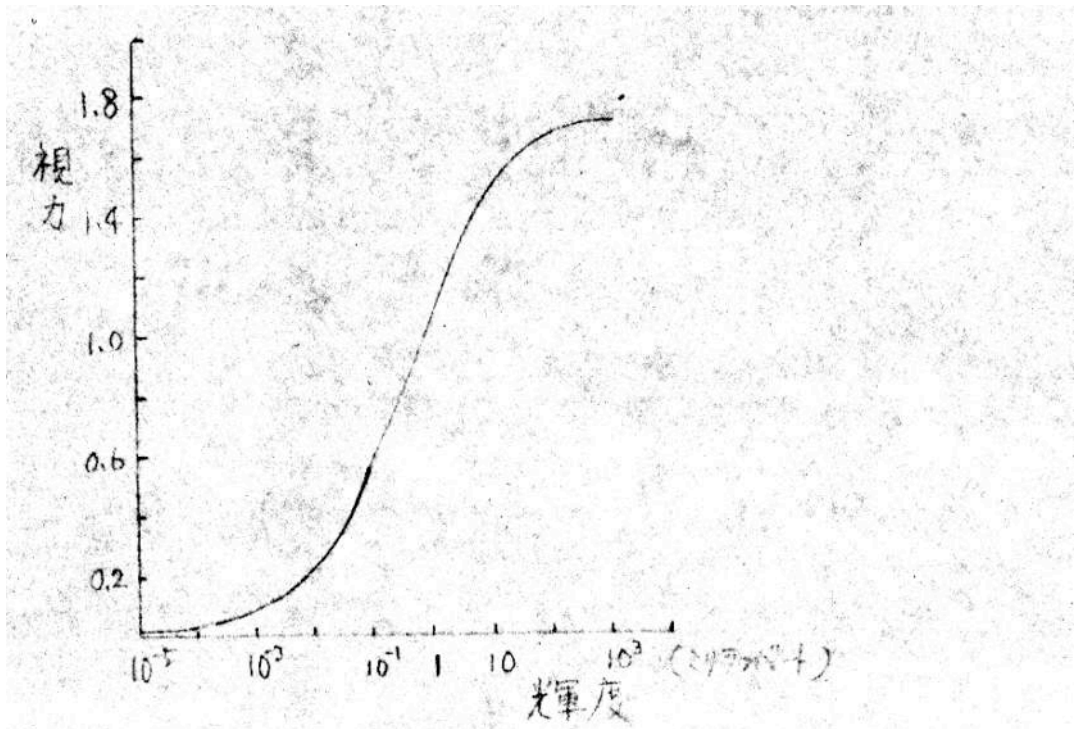


図6 輝度と目の分解能の関係  
(y軸は分を単位とした分解能の逆数)

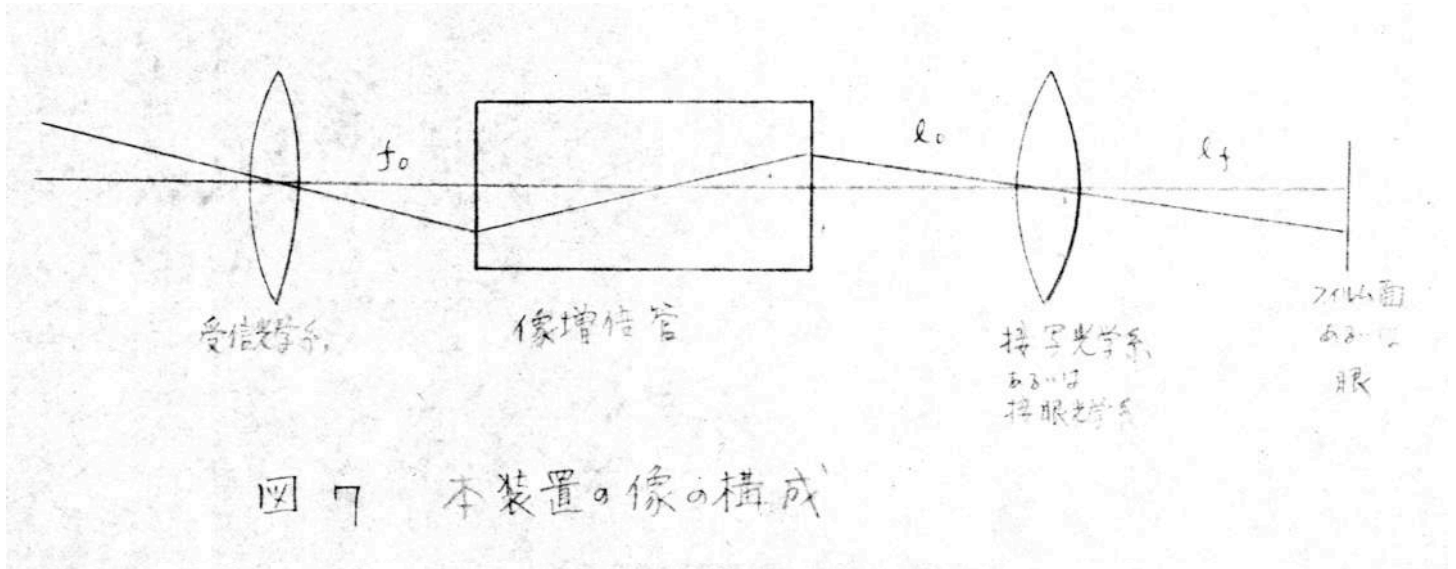


図 7 本装置の像の構成

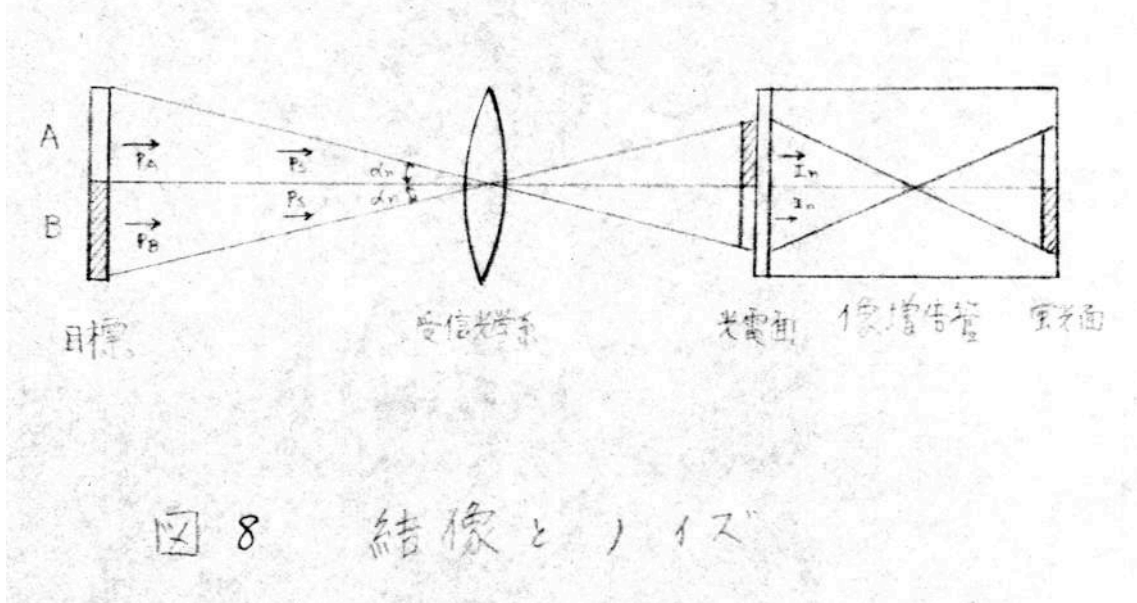


図 8 結像とノイズ

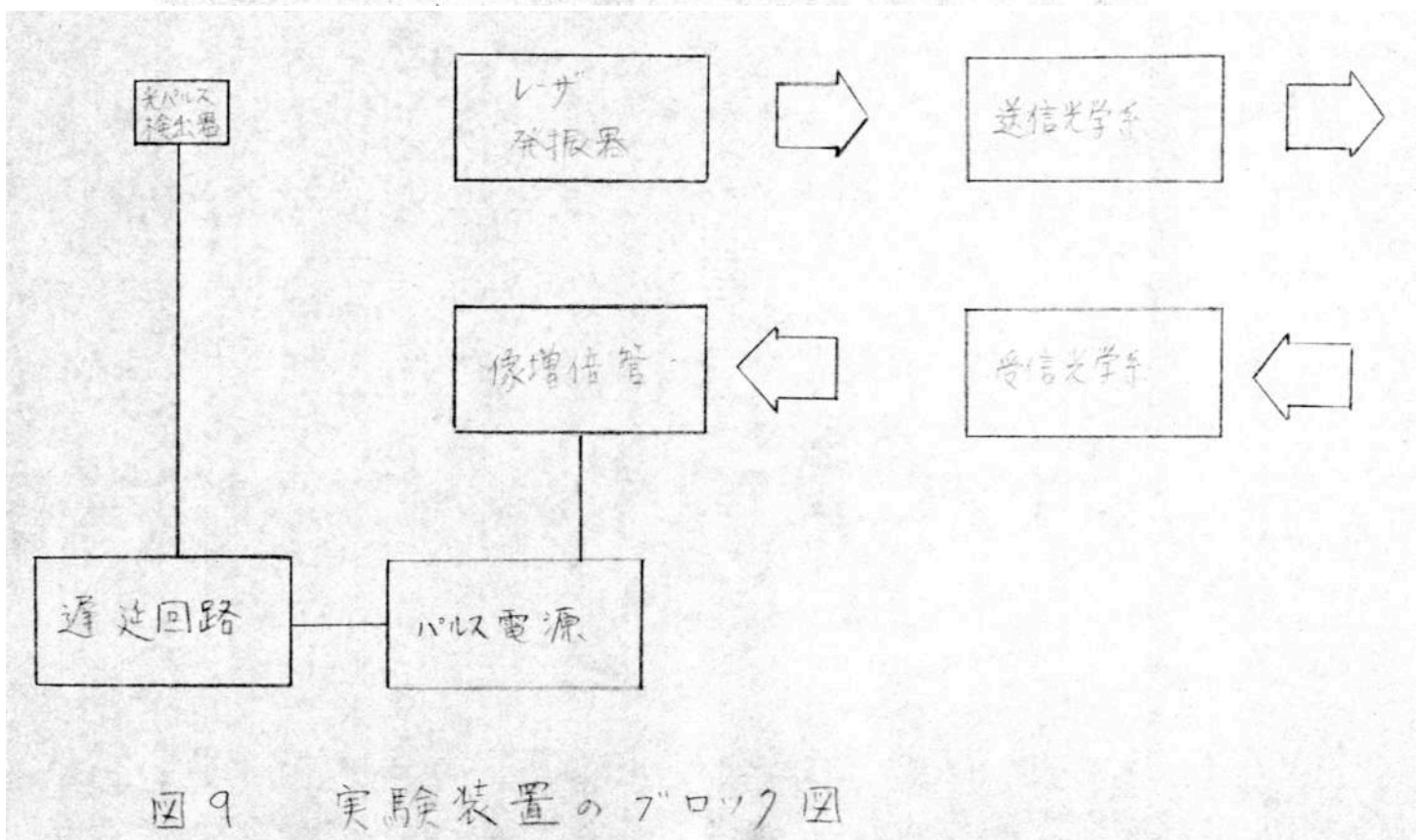


図 9 実験装置のブロック図

○ 実測値(2~10Jにて観測)

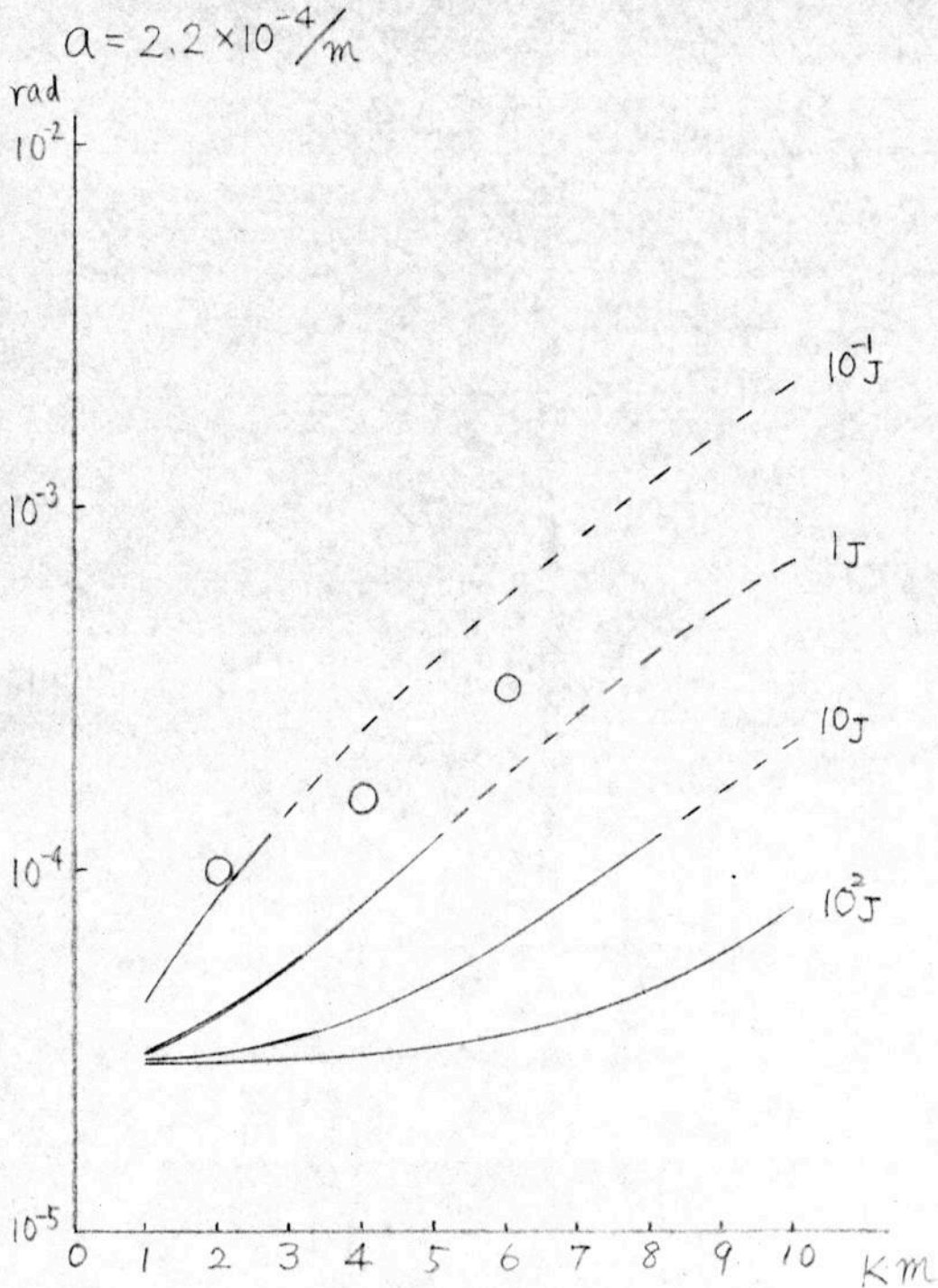


図 10 目標距離と分解能との関係(装置A,B)

$$a = 5.1 \times 10^{-4} / m$$

○ 実験値 (1Jにて観測)

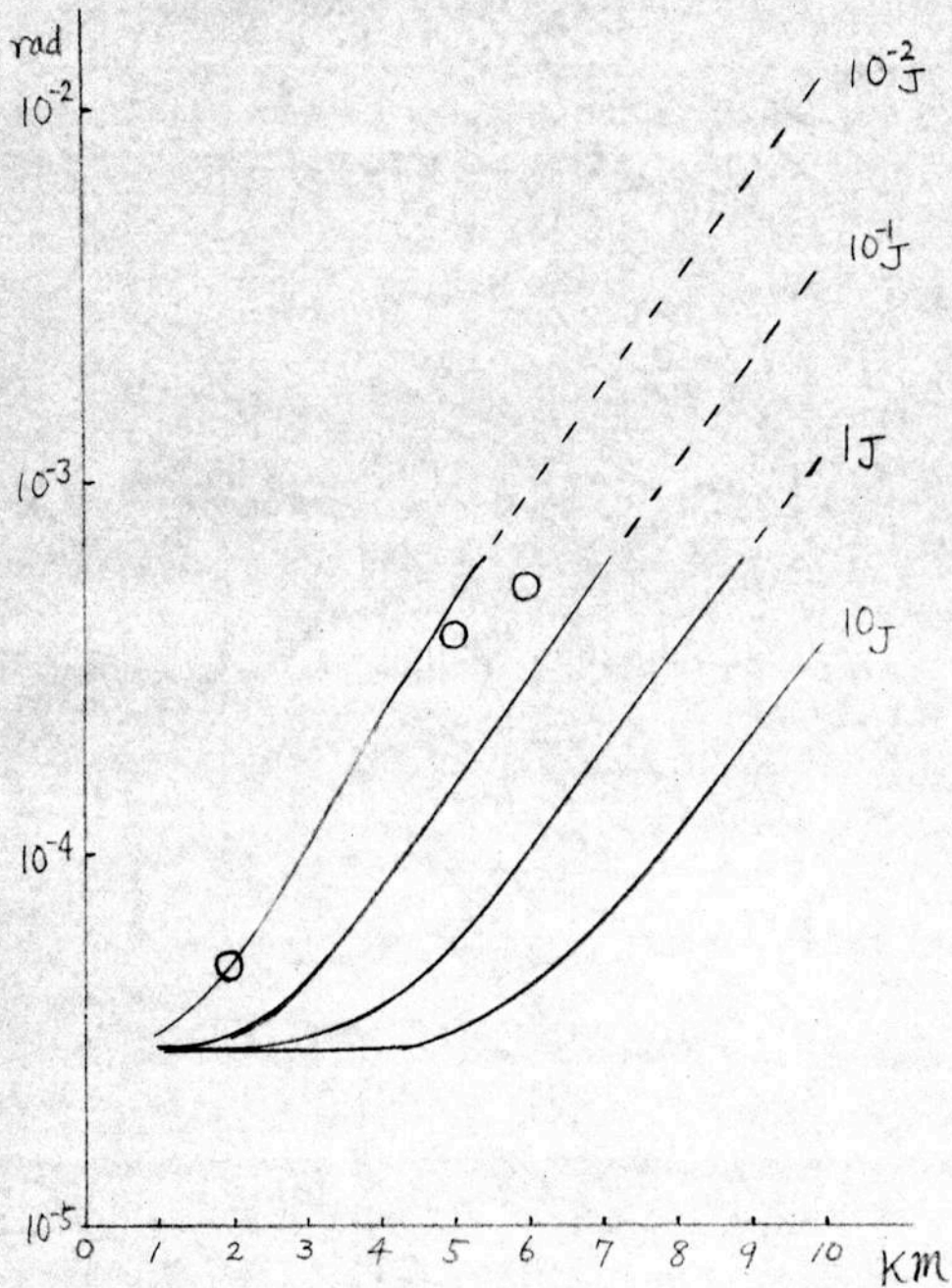


図 11 目標距離と分解能との関係 (装置 C)