

乾板型プレートによる空間周波数特性(MTF)測定の試み

小沢 信 治 , 谷 村 裕

はじめに

眼の空間的解像力評価は従来、ランドルト環や文字視標を用いた視力測定によって行なわれてきた。この方法は手軽に視機能低下をスクリーニングできる点で非常に便利であり、今後も臨床検査に欠くことのできないものとして使用されると思われるが、ただ、視標が高コントラストであるため、コントラスト感度が微妙に低下した症例を検出できないこともあり得る。そこで新たな次元から眼の空間解像力を促えようとして導入されたのがMTF(Modulation Transfer Function)の概念である。(視力値が正常であってもMTF曲線に異常があらわれる例を報告した文献としてはBodis-Wollner(1972), (1976), Regan et al(1977), Zimmermann et al(1979)があり、視力値とMTF曲線の比較を論じたのには、小沢ら(1981)などがある。)

あるコントラストをもった物体の像は、光学系を通過することによってそのコントラストを低下させるのであるが、同様に、眼のコントラスト感度を空間的稠密さ(空間周波数)を関数として測定することによって、眼のMTF曲線を得ることが可能である。特定周波数におけるMTFは以下の式によって与えられる。

$$MTF = \frac{B_{max} + B_{min}}{B_{max} - B_{min}} = \frac{\bar{B}}{\Delta B} \dots\dots\dots ①$$

(B_{max} 閾値刺激の最大輝度, B_{min} 閾値刺激の最小輝度, \bar{B} 閾値刺激の平均輝度, ΔB 閾値刺激の輝度振幅)

MTF測定に使われる正弦波状格子刺激は通例CRT上に出す方法が多いが、装置が大がかりであるとともにコストが高く、手軽に臨床に供し難いという難点がある。Arden(1978)は、こうした理由から6枚のArden's chartを作成し、臨床への応用が試みられている(Minassian et al

(1978), Arden et al(1978^{a, b}), Weatherhead(1980), Canavan et al(1980), 中野ら(1980))。ただ、Arden's chartによる測定空間周波数は0.4CPDから6.4CPDであるため、高周波側の測定報告がなく、また、印刷上の問題から正確なMTF測定は得難いと思われる。乾板型プレートによるMTF測定は以上の問題点を補い得るものである(河原ら(1979))。

筆者らは調光可能な照明箱を作成し、乾板型プレートによる眼のMTF測定を試みたのでその結果を報告する。

実 験

目 的

乾板型プレート格子視標を用いて眼のMTF曲線を求める。

方 法

測定用プレート

測定に用いられたプレートは200×200(mm)の乾板型で、6枚からなっている。1.5mの視距離で測定した場合の各プレートの空間周波数は以下のように計算された。

視角 α degの l cm離れた垂直面における平面距離は $2 \times l \tan(\alpha/2)$ である。プレート a cmあたりに含まれるline数を b 本とすると $2 \times l \tan(\alpha/2)$ 内に含まれるline数 X は、 $X = 2 \times l \times b / a \tan(\alpha/2)$ である。したがって $\alpha = 1$ (deg), $l = 150$ (cm), $a = 10$ (cm)であれば、

$$X = 30 \times b \tan(\alpha/2) \dots\dots\dots ②$$

プレートの10cm内のline数 b を求め、②式に代入することによって各プレートの空間周波数 X (lines/degすなわちCPD)を得た(表1)。

各プレートの透過率(transmittance)は X 軸方

Table 1. 1.5 mの視距離における各プレート
の空間周波数

plate No.	X (CPD)
1	1.02
2	2.04
3	4.08
4	8.16
5	16.32
6	32.64

向には正弦波状に、Y軸方向には、その振幅が対数的に変化している。すなわち底辺から上辺に向かって縞と地のコントラスト (modulation, 略して m) が \log 単位で linear に小さくなっている。縞がはじめて見える高さでのコントラストの逆数 (④式) でMTFが求められる。

各プレートの底辺からの高さを y mm とすると、その場所でのコントラスト (m) との関係は次式のようにになっている。

$$y = A + B \log_{10} m \quad \text{..... ③}$$

これを变形して

$$m = 10^{-\frac{A}{B}} \times 10^{\frac{1}{B} \times y} \quad \text{..... ④}$$

④式の $10^{-\frac{A}{B}}$ は $y=0$ すなわちプレートの底辺でのコントラストを示し、 $1/B$ は傾きを示す。各プレートについて③式のA, Bを得るため、 $y = 5$ mm, 30mm, 60mmで濃度計 (microdensitometer) を水平方向に走査し、濃度 (density) 曲線を求めた。記録の一部を図1, 図2に示す。これはプレート1とプレート4のものである。ところで濃度 (D) と透過率 (T) は、 $T = 10^{-D}$ の関係である。透過する光量は照射する光量に比例するから

$$\text{Modulation} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad \text{..... ⑤}$$

表2は $y = 5, 30, 60$ (mm) における濃度 (D) を透過率 (T) に変換し、⑤式からコントラスト (m) を求めたものである。(但し、DとTの最大、最小は入れかわる。)

y と m の3点から各プレートについて回帰曲線を求めた (図3~8)。得た式は、

- プレート 1. $y = -13.994 - 70.619 \log_{10} m$
($R = -0.999$)
2. $y = -10.777 - 67.533 \log_{10} m$
($R = -0.999$)
3. $y = -11.639 - 68.515 \log_{10} m$
($R = -0.999$)
4. $y = -13.342 - 69.282 \log_{10} m$
($R = -0.996$)
5. $y = -12.851 - 68.705 \log_{10} m$
($R = -0.996$)
6. $y = -12.127 - 65.262 \log_{10} m$
($R = -0.999$)

これを④式の形に変えると、

- プレート 1. $m = 0.634 \times 10^{-0.0142 \times y}$
2. $m = 0.693 \times 10^{-0.0148 \times y}$
3. $m = 0.676 \times 10^{-0.0146 \times y}$ ⑥
4. $m = 0.642 \times 10^{-0.0144 \times y}$
5. $m = 0.650 \times 10^{-0.0146 \times y}$
6. $m = 0.652 \times 10^{-0.0153 \times y}$

測定装置

図9. 作成した装置は $400 \times 400 \times 700$ (mm) の金属箱で、プレートが位置する乳白板上の明るさは、ほぼ一定になるように調整された。各プレートは厚紙ではさまれており、溝にさし入れられて乳白板上に固定される。プレート装着時の視標の平均輝度は約 130 cd/m^2 であり、視標のなす見込み角は約 7.7° である。cover用の厚紙を上下させ、プレートの底辺に 0 mmを合わせた物指で縞の知覚できる高さを測定した。

被験者

眼疾患を有しない正眼者10名、計20眼である。視力はいずれも1.0以上。屈折補正の必要な場合はこれを行ない、正視状態で測定した。

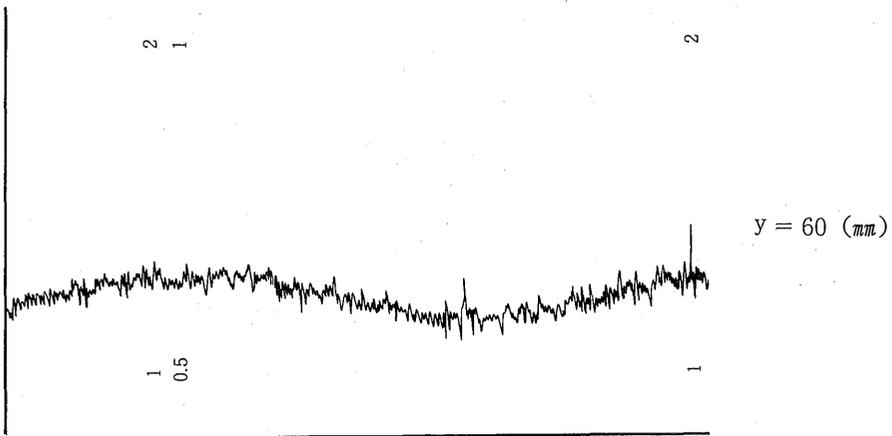
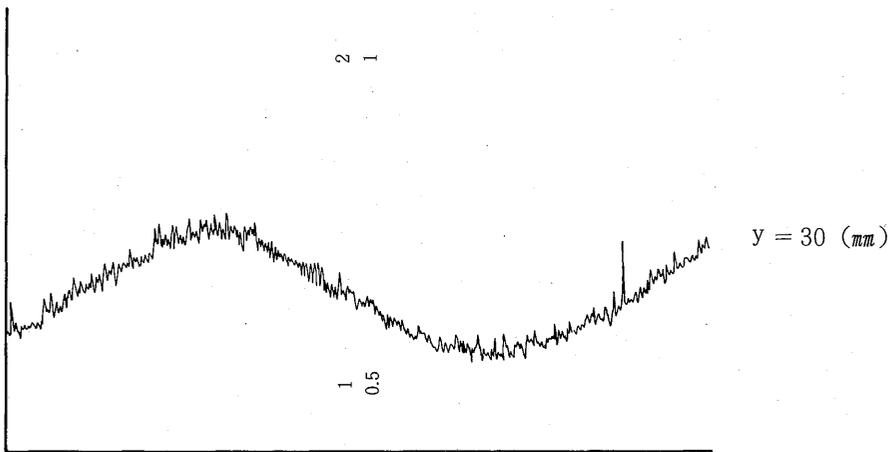
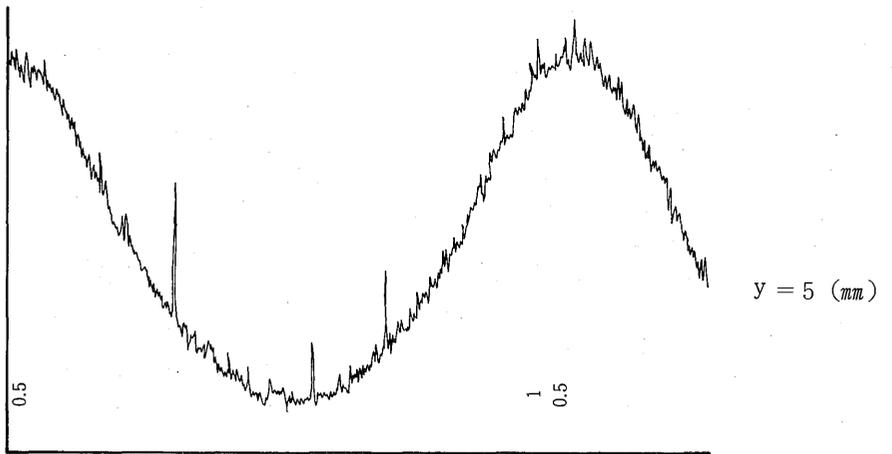
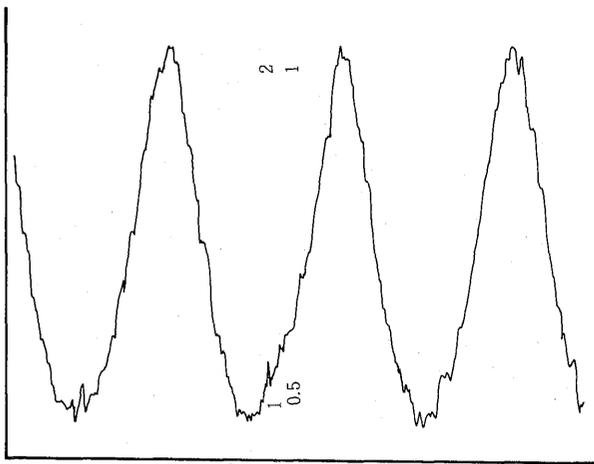
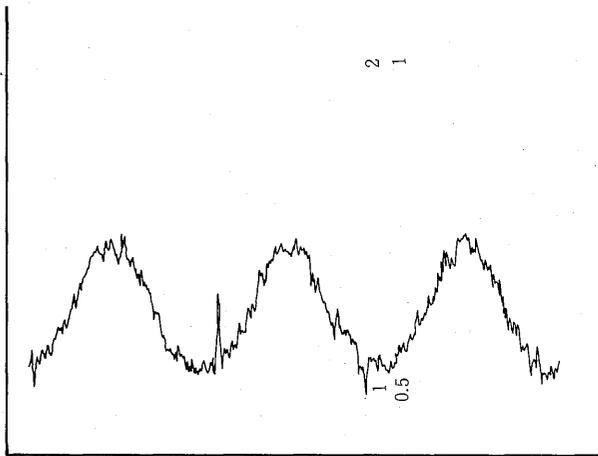


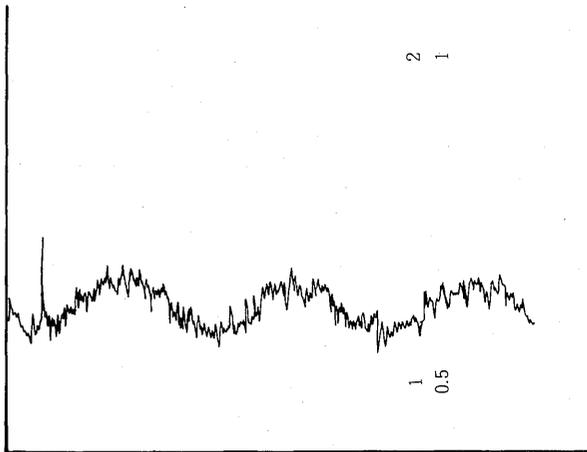
Fig 1. チャート1の $y = 5, 30, 60 \text{ (mm)}$ における濃度曲線



$y = 5 \text{ (mm)}$



$y = 30 \text{ (mm)}$



$y = 60 \text{ (mm)}$

Fig.2. チャート4の $y = 5, 30, 60 \text{ (mm)}$ における濃度曲線

Table 2. 各プレートの $y = 5, 30, 60$ (mm) における最大濃度 D_{max} , 最小濃度 D_{min} から得られた最小透過率 T_{min} , 最大透過率 T_{max} , 及び Modulation (m)

		5 mm		30 mm		60 mm	
1	D	1.03	0.49	0.75	0.55	0.65	0.57
	T	0.0933	0.3236	0.1778	0.2818	0.2239	0.2692
	M	0.5524		0.2263		0.0919	
2	D	1.04	0.44	0.73	0.52	0.61	0.53
	T	0.0912	0.3631	0.1862	0.3020	0.2455	0.2951
	M	0.5985		0.2372		0.0917	
3	D	1.05	0.47	0.74	0.53	0.62	0.54
	T	0.0891	0.3388	0.1820	0.2951	0.2399	0.2884
	M	0.5835		0.2371		0.0918	
4	D	1.03	0.47	0.72	0.53	0.65	0.57
	T	0.0933	0.3388	0.1905	0.2951	0.2239	0.2692
	M	0.5682		0.2154		0.0919	
5	D	1.04	0.47	0.73	0.54	0.69	0.61
	T	0.0912	0.3388	0.1862	0.2884	0.2042	0.2455
	M	0.5758		0.2153		0.0918	
6	D	1.02	0.47	0.72	0.53	0.58	0.51
	T	0.0955	0.3388	0.1905	0.2951	0.2630	0.3090
	M	0.5602		0.2154		0.0804	

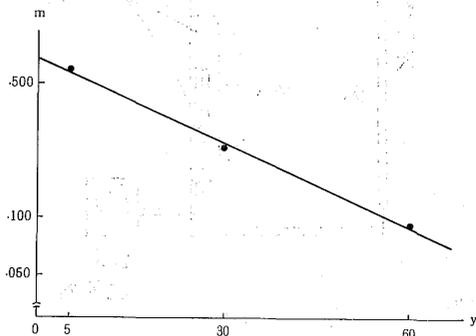


Fig. 3

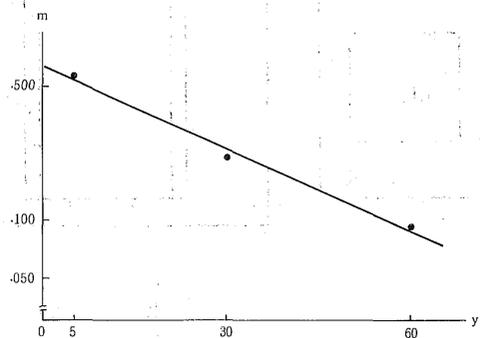


Fig. 4

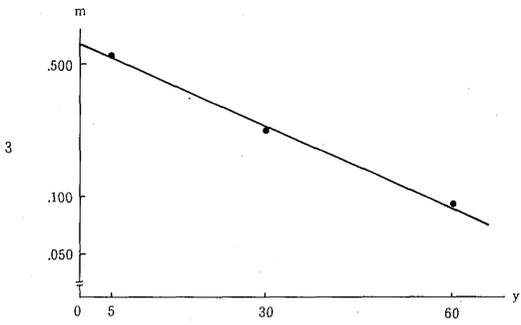


Fig. 5

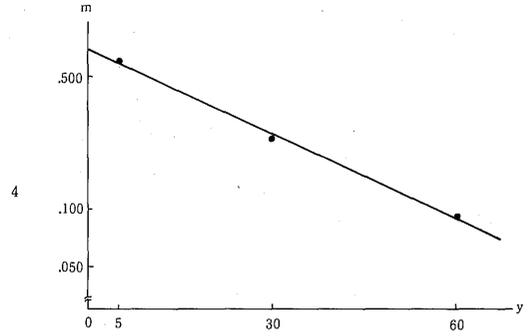


Fig. 6

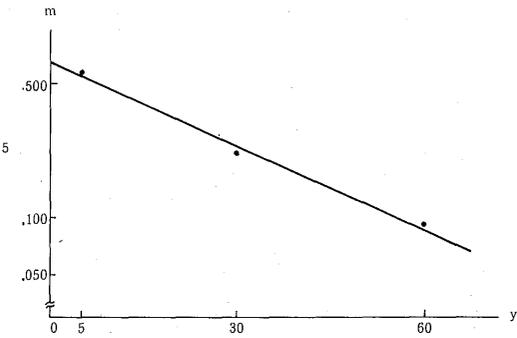


Fig. 7

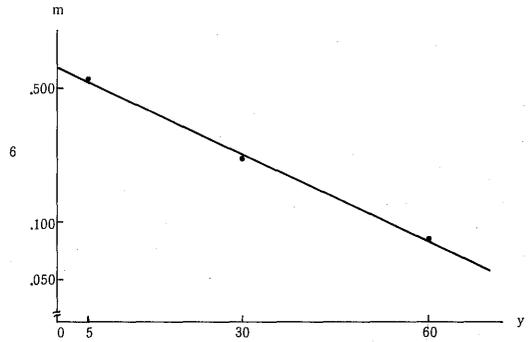


Fig. 8

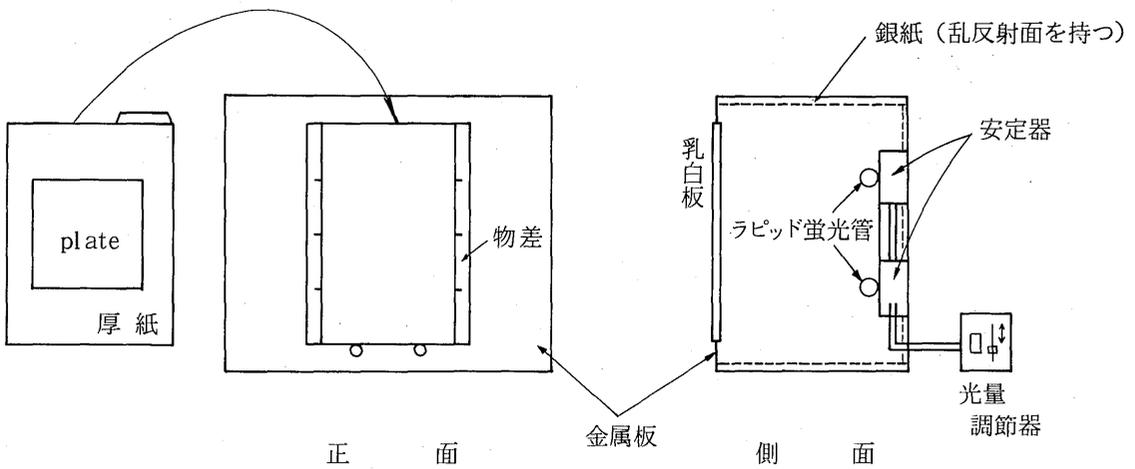


Fig. 9 乾板型 MTF 測定プレート用に作成された照明箱

手順

室内照度は20 luxとした。視野内には視標輝度を越える光源が入らないように配慮した。視標面を眼の高さに保ち、1.5 mの視距離で測定を行った。検者はプレートの縞の見えることを被検者に確認した後、cover用の厚紙でプレートの上辺から徐々に下げて、被験者には縞が見えた瞬間に合図をするように教示を与えた。必要に応じてcoverを逆に持ち上げ、縞の大きさを再確認させた。被験者が合図した瞬間のcoverの上端の高さを読み取って、これを記録した。プレート(1~6)は無作為な順序で呈示され、各プレートにつき7回測定を繰り返した。片眼を遮眼子で覆い、一眼ずつ測定した。

結果と考察

表3が各被験眼におけるプレート別の7回の測定結果の平均である。これを⑥式に代入し、 m を得た。図10はその1例(被験者MU, 右眼)をプロットしたものである。黒丸はレーザーの干渉縞を直接、網膜に投射する測定法によって得た本被験者の網膜-大脳系のMTF曲線である。白丸が今回得た乾板型プレートの測定結果である。両者ともに高周波側だけではなく、低周波側でも感度の減衰が見られるBand-Pass型を示している。これは、密なるものが見えにくいとともに、あまり粗なるものも見えにくく、適度の大きさを有したものが、一番見えやすいということを示していると理解できる。前者は、網膜照度は300トロラ

Table 3. 縞が見えはじめる高さ y (mm) の平均
()内は S.D.

Chart N.O.		1	2	3	4	5	6
Subj.							
1	R	77 (2.2)	99 (3.5)	106 (1.7)	83 (7.3)	48 (8.5)	13 (2.0)
	L	78 (5.7)	102 (3.2)	105 (2.2)	98 (4.9)	69 (2.5)	29 (4.5)
2	R	80 (4.3)	121 (13.8)	113 (7.9)	110 (4.7)	91 (8.0)	35 (6.9)
	L	76 (4.4)	136 (5.1)	115 (3.8)	126 (3.0)	88 (4.5)	57 (6.8)
3	R	76 (3.7)	103 (3.4)	114 (3.9)	109 (2.3)	75 (3.1)	41 (1.3)
	L	72 (2.4)	104 (2.5)	115 (3.7)	113 (2.6)	83 (1.8)	41 (1.8)
4	R	83 (5.1)	98 (6.2)	100 (4.9)	112 (7.0)	88 (2.7)	42 (2.7)
	L	78 (4.9)	104 (0.9)	85 (1.8)	113 (4.5)	111 (3.8)	43 (2.9)
5	R	77 (10.8)	123 (4.7)	129 (6.1)	122 (7.9)	112 (3.9)	73 (12.2)
	L	81 (10.0)	121 (6.5)	134 (3.8)	121 (4.9)	118 (2.3)	72 (8.2)
6	R	63 (4.6)	93 (2.4)	95 (1.8)	78 (2.1)	56 (2.6)	1 (1.4)
	L	72 (2.8)	94 (1.9)	100 (2.2)	93 (6.3)	62 (4.0)	5 (3.5)
7	R	78 (2.4)	92 (5.9)	118 (7.6)	111 (4.2)	86 (4.5)	51 (3.3)
	L	78 (2.4)	87 (5.1)	112 (6.0)	108 (3.5)	86 (4.5)	40 (7.6)
8	R	71 (3.3)	91 (5.2)	101 (4.2)	91 (1.7)	69 (4.5)	41 (4.3)
	L	69 (5.2)	89 (6.1)	101 (9.5)	96 (3.2)	87(10.0)	42 (3.6)
9	R	67 (3.8)	85 (5.7)	90 (5.1)	84 (4.7)	69 (3.9)	31 (7.2)
	L	67 (5.3)	86 (9.1)	99 (4.8)	99 (3.4)	78 (3.3)	24 (6.1)
10	R	71 (1.5)	84 (4.2)	95 (5.6)	87 (4.9)	67 (5.5)	10 (4.8)
	L	63 (3.2)	81 (2.4)	89 (4.6)	90 (2.2)	75 (3.0)	38 (4.6)

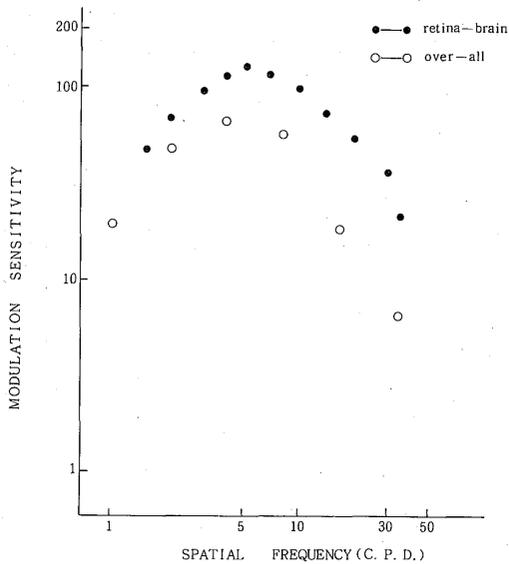


Fig. 10

ンドであり、後者は約3倍の網膜照度（瞳孔直径3 mmとした場合）であるが、Patel (1966), や河原ら (1977) の報告では高網膜照度域では、MTF 曲線には照度差の影響がほとんど見られないことから、両者の感度差は主に眼球結像系による感度損失であると思われる。感度比をプロットすると図11のようになる。1.0より低下している分が損失を表わしていると考えられる。Low-Pass型を示しているが、通例の光学レンズ系の特性を眼球結像系も有しているわけで、低周波での感度の減衰は網膜-大脳系に起因するものであることがわかる。図12は20眼の平均とSDをプロットしたものである。河原ら (1979) が得た結果より若干、感度が低くあらわれているが、ピークの位置や曲線の形はほぼ一致した結果となった。

乾板型プレートによるMTF測定は手軽に、被験者に心的な負担を与えずに測定できる点で便利であり、個人内の測定結果はレーザー法に比べて安定している等、臨床への応用がより模索されてもよいと思われる。ただ、周波数別プレート6枚を全部測定するには多少手数がかかる点がある。筆者らは、現在、一枚に低周波から高周波までが盛り込まれている乾板型プレートによる測定を検討中である。（プレートを提供して下さった千葉

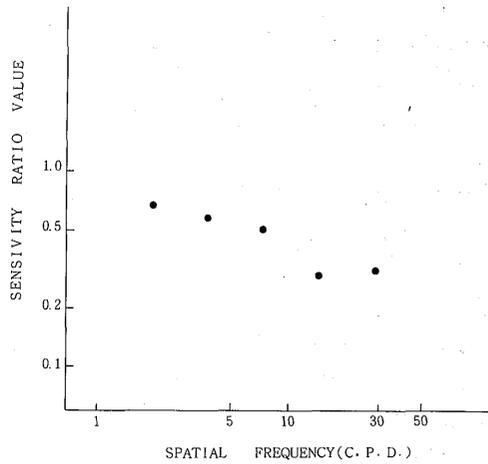


Fig. 11 網膜-大脳系 (retina-brain) と視覚系全体 (over-all) のコントラスト感度比。

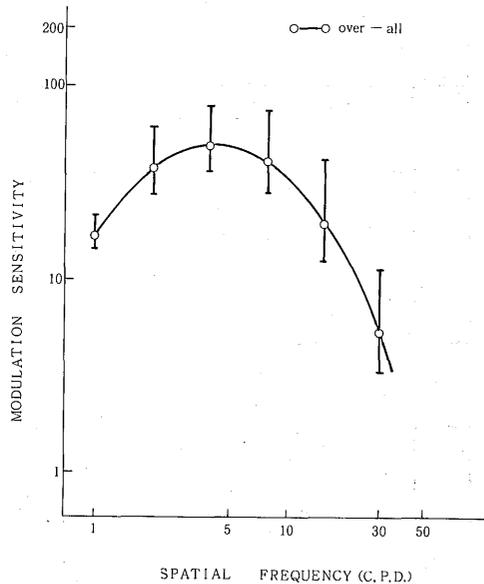


Fig. 12

大学、江森康文教授に感謝致します。）

文 献

- 1) Arden, G. B.: The importance of measuring contrast sensitivity in case of visual disturbance. Br. J. of Ophthalmol., 62, 198-209, 1978.
- 2) Arden, G. B. and Jacobson, J. J.: A simple grating

- test for contrast sensitivity: preliminary results indicate value in screening for glaucoma. *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, 17, 23-32, 1978.^(a)
- 3) Arden, G. B. and Gucukoglu, A. G.: Grating test of contrast sensitivity in patients with retrobulbar neuritis. *Arch. Ophthalmol.*, 96, 1626-1629, 1978.^(b)
 - 4) Bodis-Wollner, I.: Visual acuity and contrast sensitivity in patients with cerebral lesions. *Science*, 178, 769-771, 1972.
 - 5) Bodis-Wollner, I. and Diamond, S. P.: The measurement of spatial contrast sensitivity in cases of blurred vision associated with cerebral lesions. *Brain*, 99, 695, 1976.
 - 6) Canavan, Y. and Archer, D. B.: Loss of contrast sensitivity following contusional eye injury. *Br. J. of Ophthalmol.* 64, 613-617, 1980.
 - 7) 河原哲夫, 大頭 仁: 視覚系の空間周波数特性, 応用物理, 46, 128 - 138; 1977
 - 8) 河原哲夫, 尾羽沢 大: 視覚系のMTF簡易測定装置の試作, 臨眼, 33, 1505 - 1509, 1979
 - 9) Minassian, D. C., Jones, B. R. and Zargarizadeh, A.: The Arden grating test of visual function: a preliminary study of its practicability and application in a rural community in north-west Iran. *Br. J. of Ophthalmol.* 62, 210-212, 1978.
 - 10) 中野直樹, 葛西 浩, 他: Arden grating testによる視神経疾患の検討. 眼科臨床医報 74, 708 - 711, 1980
 - 11) 小沢信治, 谷村 裕: 視覚障害者の見え方のMTFによる分析— 視力値との比較を中心として— 視覚障害教育・心理研究 2, 1 - 4, 1981
 - 12) Patel, A. S.: Spatial resolution by the human visual system. The effect of mean retinal illuminance. *J. O. S. A.* 56, 689-694, 1966.
 - 13) Regan, D., Silver, R. and Murray, T. J.: Visual acuity and contrast sensitivity in multiple sclerosis—hidden visual loss, an auxiliary diagnostic test. *Brain* 100, 563-579, 1977.
 - 14) Weatherhead, R. G.: Use of the Arden grating test for screening. *Br. J. of Ophthalmol.* 64, 591-596, 1980.
 - 15) Zimmern, R. L., Campbell, F. W. and Wilkinson, I. M. S.: Subtle disturbances of vision after optic neuritis elicited by studying contrast sensitivity. *J. of Neurol. Neurosurg. Psychiat.* 42, 407-412, 1979.

Zusammenfassung

Measurement of the MTF of the Human Visual System using Grating Dry Plates

Shinji OZAWA and Yutaka TANIMURA

The modulation transfer function (MTF) of the human visual system was obtained using 6 grating dry plates. Each plate was different in spatial frequency, that is, from the minimum frequency 1.0 CPD to the maximum frequency 32.6 CPD at the 1.5m viewing distance, and its transmittance varies sinusoidally in horizontal direction and logarithmically in vertical direction.

The 6 plates were set in turn in the illumination box and the cover plate was pulled downward gradually. The subject was asked to make a sign where he could barely detect the grating. The modulation of the boundary height indicates his modulation threshold (MTF).

The MTF curve obtained by this method was compared with that of the laser interference method which could measure the MTF of the retina-brain system only. Both of them showed sensitivity attenuation at the low frequencies as well as at the high frequencies (Band-Pass pattern). But the over-all visual system showed more attenuation especially at the high frequencies than the retina-brain system. Plotting the sensitivity ratio value between the two, the more high-frequency attenuation was due to the eye optics, and it was confirmed that the low-frequency attenuation was attributable to the retina-brain system.

The grating dry plates used in this experiment turned out to be very useful when measuring MTF. It was expected to make a clinical application of those plates.