

無水晶体眼における眼鏡, コンタクトレンズ,  
人工水晶体各装着時の倍率 (図8, 表7)

八百枝 浩 (長岡市)  
三 国 政 吉 (東京都)

Magnification in Cases of Aphakia Wearing Spectacle  
Lenses, Contact Lenses and Intraocular Lenses

Hiroshi Yaeoda

*Nagaoka, Niigata*

Masakichi Mikuni

*Tokyo*

要 約

無水晶体眼に眼鏡, コンタクトレンズ, 人工水晶体を装着したときの倍率は, 今まで比較検討されたことがない。そこでこれらの光学的条件をプログラミングして, 実際の光学値をインプットすることにより, コンピューター計算を行なった。結果は正常眼に対する倍率は, 眼鏡で約1.2倍, コンタクトレンズで1.1倍, 人工水晶体で1.0倍という値であった。この値は手術眼が軸性近視であった方が軸性遠視であった場合より高い数値を示した。なお像形成論的に同一光学系で, 倍率差が高いほど像形成の差が大きいう原理から, 網膜像は人工水晶体, コンタクトレンズ, 眼鏡の順に手術前の像形成に近いと結論した。(日眼 91: 579—588, 1987)

キーワード: 無水晶体眼, 眼鏡, コンタクトレンズ, 人工水晶体, 倍率

Abstract

The magnifications of the retinal image with the spectacle lenses, contact lenses and intraocular lenses in cases of aphakia were calculated after programming in the normal eye each optical index into a computer. As a result, the magnification was about 1.2 times larger in the case of spectacle lenses, 1.1 times larger in case of contact lenses and the same as that of the phakia eye. Moreover the multiplication was greater in axial myopic eyes in every aspect than in axial hyperopic eyes. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 91: 579—588, 1987)

Key words: Magnification, Aphakia, Spectacle Lens, Contact Lens, Intraocular Lens

I 緒 言

白内障術後, 眼鏡, コンタクトレンズを装用した場合, そして最近急速に普及している人工水晶体を挿入したときの網膜像の倍率がいかなるものか, コンピューターによる光学計算を行なったので以下に報告

する。

II 計算方法

以前はこの種の計算を行なうに際しては, 光線追跡式に各光学値を代入し, 三角関数表と手動計算器等により光線を一本ずつ追跡計算した。現在は光線追跡の

別刷請求先: 〒940 長岡市長町2丁目2-12 八百枝 浩

Reprint requests to: Hiroshi Yaeoda, M.D.

Nagacho 2-2-12, Nagaoka-shi 940, Japan

(昭和62年1月6日受付) (Accepted January 6, 1987)

プログラムはできており、研究目的によりそのプログラムを少し変えることによって計算が可能になっている。あとは各光学値を入力すれば瞬時に計算できる<sup>1)2)</sup>。

なお本研究における光線追跡プログラムはそれぞれ膨大な文字と数値の配列となり、本誌の規定枚数をはるかに越えるものになるので、省略する。

本研究のプログラムの条件は次の如くである。

**1. 眼球光学系**

眼球光学系は私どもが日常使用しているグルストランド模型眼の数値を用いた<sup>3)</sup>。また各屈折異常（近視、遠視）は軸性として計算した。

**2. 眼鏡**

眼鏡レンズはメニスカスレンズである。前面曲率 ( $R_1$ )、後面曲率 ( $R_2$ )、中心厚 ( $d$ )、屈折率 ( $n$ ) をプログラミングした。眼鏡の位置は、眼鏡後面中心と角膜表面中心の間の距離を10mm とした。普通眼鏡では

12mm であるが白内障術後眼鏡の位置は10mm とされている<sup>6)</sup>。

この  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $d$ ,  $n$  の数値は東京光学製のものを採用した。この場合  $n=1.523$  である。なお  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $d$  の値は後述する如く  $\pm 10D$  の幅の数値に限定した (図1)。

眼鏡レンズには近年高屈折率ガラス、硬質プラスチックなどが使用されることも多くなってきたが、倍率計算上における差は無視してよい。何故なら倍率計算というような幾何光学計算においては、レンズの評価はその位置と焦点距離の二つの因子のみで規定される。したがって眼鏡の屈折率は全く問題にならない。ただし本研究のような光線追跡プログラムによる計算では、それぞれの光学値を代入するわけでレンズの種類によって若干の差異が生じるが、その差は極めて小さい。

**3. コンタクトレンズ**

眼鏡の場合と同様に、前面曲率 ( $R_1$ )、後面曲率 ( $R_2$ )、

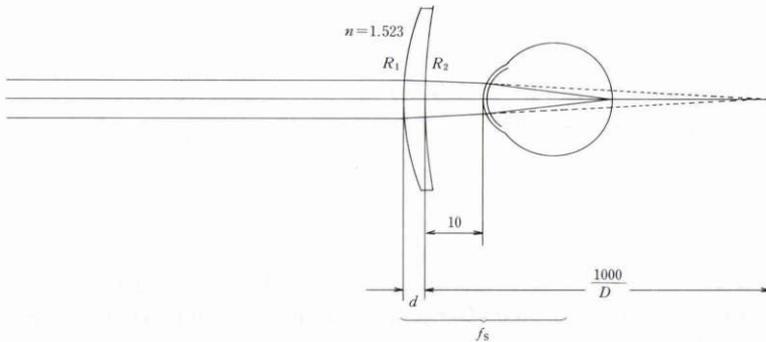


図1 眼鏡プログラムの説明図 ( $R_1$ : 眼鏡前面曲率,  $R_2$ : 眼鏡後面曲率,  $n$ : 眼鏡屈折率,  $f_s$ : 眼鏡と眼の総合焦点距離,  $D$ : 眼鏡度数ジオプター)

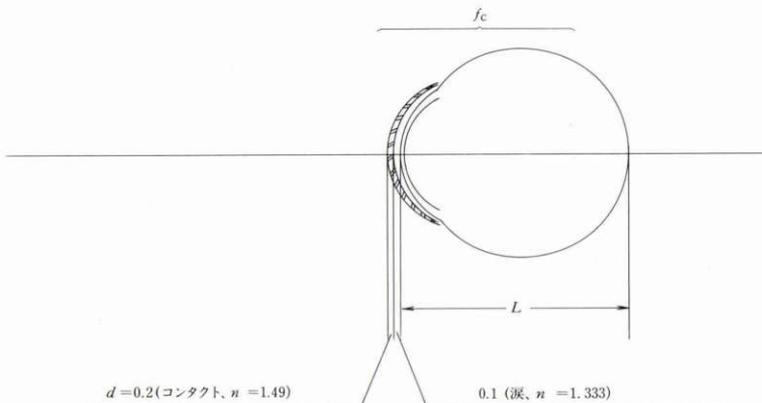


図2 コンタクトレンズ・プログラムの説明図 ( $f_c$ : コンタクトレンズの眼の総合焦点距離,  $L$ : 眼軸長)

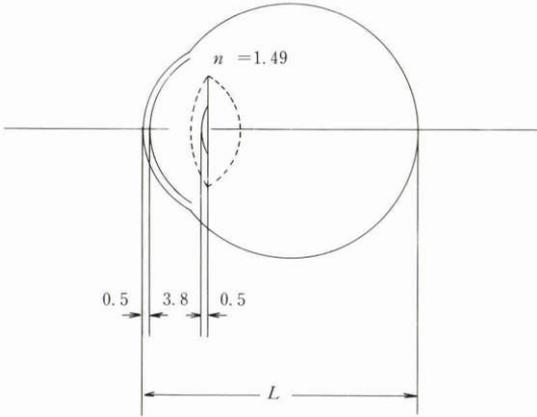


図3 人工水晶体プログラムの説明図 (n: 人工水晶体屈折率, L: 眼軸長)

中心厚(d), 屈折率(n)をプログラミングし,  $R_2=7.6$  mm,  $d=0.2$  mm, コンタクトレンズと角膜表面の間の涙液層の厚さを0.1mmとし, 涙液の屈折率は1.333,  $n=1.49$ とした. なお  $R_1$ の値の幅は眼鏡同様 $\pm 10D$ である (図2).

ここで  $n=1.49$ としたが, これはハードレンズの値である. 現在のコンタクトレンズ, 特に無水晶体眼用のものは種々の含水率をもつ, 屈折率のやや低いソフトレンズが使用されることが多い. しかしこの差も倍率計算上における差異は無視できる. その理由は前述の眼鏡の項で述べたと同じことがいえるからである.

4. 人工水晶体 (IOL)

この場合前房レンズと後房レンズによって異なる. 現在は後房レンズが主流であり, 計算もこれに基づいた.

レンズの位置は図3に示したような状態を設定した. なおループには角度がないものと仮定してある.

表1 各屈折異常度に対する眼軸長

D		P (mm)	L (mm)
10		13.303	20.503
9		13.657	20.857
8		14.013	21.213
7		14.372	21.572
6		14.733	21.933
5		15.096	22.296
4		15.462	22.662
3		15.830	23.030
2		16.200	23.400
1		16.573	23.773
0	$f_0$ 22.43828 (mm)	16.949	24.149
- 1		17.327	24.527
- 2		17.708	24.908
- 3		18.091	25.291
- 4		18.477	25.677
- 5		18.865	26.065
- 6		19.257	26.457
- 7		19.651	26.851
- 8		20.047	27.247
- 9		20.447	27.647
-10		20.849	28.049

人工水晶体はメーカーによって異なるが, 本研究では平凸レンズのものを採用した. 前面 ( $R_1$ ) が球面で, 後面が平面である ( $R_2=\infty$ ). 厚さ(d)は0.5mmとして, 屈折率(n)はコンタクトレンズ同様1.49とした. なお  $R_1$ の値の幅は前二者同様 $\pm 10D$ である.

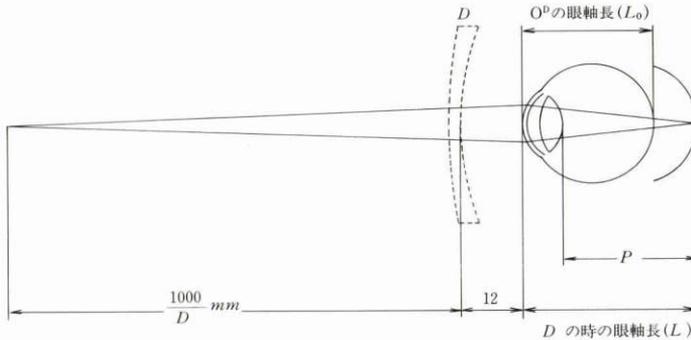


図4 眼軸長計算の説明図 (D: 眼鏡レンズジオプター)

### III 計算結果

眼屈折異常を軸性と設定したことから、まず0～±10Dまでの眼軸長を計算した(図4, 表1)。

ODの像側焦点距離 $f_0$ を22.43828mmとしたのは、グルストランドの諸光学値をプログラミングし、ODの眼鏡レンズを角膜前12mmに装用したとき、網膜上に正確に結像するための条件を満たすための数値である。ここでのプログラムも前述したように膨大になるので省略する。

表1は0～±10Dの眼鏡レンズを装着したとき、網膜上に結像するときの各屈折異常の値で、Pは水晶体後面から網膜までの距離、Lは眼軸長である。

次に倍率計算であるが、眼屈折異常度ODつまり正常眼の場合を1として、各眼屈折異常(0～±10D)における倍率比を求めた。

要するに眼鏡、コンタクトレンズ、人工水晶体を装

着した場合の合成焦点距離を計算し、正常眼のそれとの比によって倍率を導出した。

#### 1. 眼鏡

表2において、各屈折異常に対する眼鏡曲率前面( $R_1$ )、後面( $R_2$ )、厚さ(d)、眼と眼鏡の総合焦点距離( $f_s$ )、眼軸長(L)を示し、最後に倍率 $M_s$ の計算値を記した。

$M_s$ はODのときの $f_s=26.449$ に対する比で表現される(表2)。

#### 2. コンタクトレンズ

眼鏡の場合と同様に、 $M_c$ が倍率である(表3)。

#### 3. 人工水晶体

同様に $M_i$ が倍率である(表4)。

以上の計算結果をまとめると、次のようになる。

1) 無水晶体眼に眼鏡、コンタクトレンズ、人工水晶体を装着したときの倍率は、いずれも遠視側の方が低く、近視側が高い。

表2 眼鏡の場合の倍率

D	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)	d (mm)	$f_s$ (mm)	L (mm)	$M_s = \frac{f_s}{26.449}$
10	27.70958	$\infty$	13	25.012	20.503	0.9457
9	29.84279	$\infty$	12.4	24.871	20.857	0.9403
8	31.80915	$\infty$	12.1	24.918	21.213	0.9421
7	32.46638	$\infty$	11.8	25.146	21.572	0.9507
6	34.74550	$\infty$	11.2	25.136	21.933	0.9504
5	35.49731	$\infty$	10.9	25.378	22.296	0.9557
4	38.18304	1046	9.9	25.306	22.662	0.9568
3	36.76919	523	9.6	25.711	23.030	0.9343
2	37.92137	418.4	8.8	25.823	23.405	0.9763
1	38.70139	298.4	8.5	26.087	23.774	0.9863
0	38.27125	190.2	8.3	26.449	24.149	1.0
-1	41.74270	232.4	8.2	26.639	24.527	1.0072
-2	42.60426	190.2	8	26.945	24.908	1.0187
-3	44.96438	190.2	7.4	27.106	25.291	1.0249
-4	45.80028	160.9	7	27.382	25.777	1.0353
-5	48.51182	160.9	6.4	27.566	26.065	1.0422
-6	52.81736	174.3	5.9	27.757	26.457	1.0495
-7	52.54690	139.5	5.4	28.061	26.351	1.0609
-8	57.75011	149.4	5.4	28.361	27.247	1.0723
-9	65.93529	174.3	5.3	28.624	27.647	1.0822
-10	65.16906	139.4	4.6	28.921	28.049	1.0935

表3 コンタクトレンズの場合の倍率

D	R <sub>1</sub> (mm)	R <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	f <sub>c</sub> (mm)	L (mm)	$M_c = \frac{f_c}{24.533}$
10	5.79284	7.6	0.2	20.869	20.503	0.8506
9	5.86690			21.224	20.857	0.8651
8	5.94075			21.582	21.213	0.8797
7	6.01460			21.943	21.572	0.8944
6	6.08824			22.306	21.933	0.9092
5	6.16167			22.671	22.296	0.9241
4	6.23507			23.038	22.662	0.9391
3	6.30825			23.408	23.030	0.9542
2	6.38120			23.780	23.400	0.9693
1	6.45412			24.155	23.573	0.9846
0	6.52700			24.533	24.149	1
-1	6.59964			24.913	24.527	1.0155
-2	6.67223			25.296	24.908	1.0311
-3	6.74457			25.680	25.291	1.0468
-4	6.81685			26.068	25.677	1.0626
-5	6.88888			26.458	26.065	1.0785
-6	6.96102			26.852	26.157	1.0945
-7	7.03289			27.248	26.851	1.1107
-8	7.10451			27.646	27.247	1.1269
-9	7.17622			28.048	27.647	1.1433
-10	7.24765			28.452	28.049	1.1598

表4 人工水晶体の場合の倍率

D	R <sub>1</sub> (mm)	R <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	f <sub>1</sub> (mm)	L (mm)	$M_1 = \frac{f_1}{23.026}$
10	4.71753	∞	0.5	18.785	20.503	0.8158
9	4.98865			19.197	20.857	0.8337
8	5.28101			19.611	21.213	0.8517
7	5.59812			20.028	21.572	0.8698
6	5.94222			20.448	21.933	0.8881
5	6.31691			20.870	22.296	0.9064
4	6.72760			21.296	22.662	0.9249
3	7.17840			21.724	23.030	0.9435
2	7.67548			22.154	23.400	0.9622
1	8.22788			22.588	23.773	0.9810
0	8.84531			23.026	24.149	1.0
-1	9.53797			23.465	24.527	1.0191

- 2	10.32266			23.908	24.908	1.0383
- 3	11.21642			24.354	25.291	1.0577
- 4	12.24653			24.803	25.677	1.0772
- 5	13.44331			25.254	26.065	1.0968
- 6	14.85855			25.710	26.457	1.1166
- 7	16.54840			26.168	26.851	1.1365
- 8	18.60129			26.629	27.247	1.1565
- 9	21.16246			27.094	27.647	1.1767
-10	24.42838			27.561	28.049	1.1970

表5 有水晶体正視眼に対する倍率

D	(mm)	$f_s$ (mm)	$M_s = \frac{fc}{f_0}$	$fc$ (mm)	$M_c = \frac{fc}{f_0}$	$f_1$ (mm)	$M_1 = \frac{f_1}{f_0}$
10		25.012	1.1147	20.869	0.9301	18.785	0.8372
9		24.871	1.1084	21.224	0.9459	19.197	0.8555
8		24.918	1.1105	21.582	0.9618	19.611	0.8740
7		25.146	1.1207	21.943	0.9779	20.028	0.8926
6		25.136	1.1202	22.306	0.9941	20.448	0.9113
5		25.378	1.1301	22.671	1.0104	20.870	0.9301
4		25.306	1.1278	23.038	1.0267	21.296	0.9491
3		25.711	1.1459	23.408	1.0432	21.724	0.9682
2		25.823	1.1508	23.780	1.0598	22.154	0.9873
1		26.087	1.1626	24.155	1.0765	22.588	1.0067
0	$f_0$ 22.43828	26.449	1.1787	24.533	1.0934	23.026	1.0262
- 1		26.639	1.1872	24.913	1.1103	23.465	1.0458
- 2		26.945	1.2008	25.296	1.1274	23.908	1.0655
- 3		27.106	1.2080	25.680	1.1445	24.354	1.0854
- 4		27.382	1.2203	26.068	1.1618	24.803	1.1054
- 5		27.566	1.2285	26.458	1.1791	25.254	1.1255
- 6		27.757	1.2370	26.852	1.1967	25.710	1.1458
- 7		28.061	1.2506	27.248	1.2144	26.168	1.1662
- 8		28.361	1.2640	27.646	1.2321	26.629	1.1868
- 9		28.624	1.2757	28.048	1.2500	27.094	1.2075
-10		28.921	1.2889	28.452	1.2680	27.561	1.2283

2) その倍率の差は一番大きいのが眼鏡で、次いでコンタクトレンズ、人工水晶体の順である。

#### 4. 有水晶体正視眼に対する倍率

次に正常眼に対する倍率、つまり片眼正視眼で、他眼白内障術後に眼鏡、コンタクトレンズ、人工水晶体

を装着したときの倍率差を求めた(表5, 図5)。

その結果は次の如くである。

1) 眼鏡、コンタクトレンズ、人工水晶体の順に倍率が高い。

2) 白内障手術眼が近視であった方が、遠視の場合よ

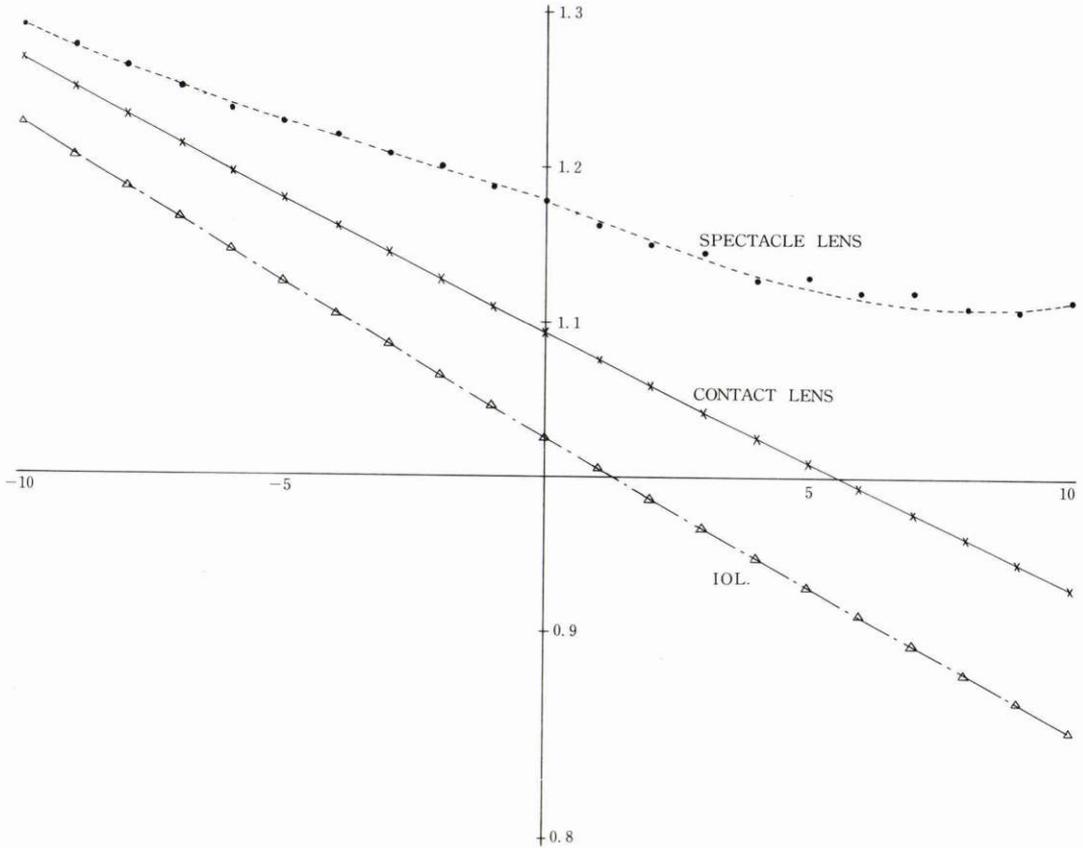


図5 有水晶体眼に対する倍率 (縦軸: 倍率, 横軸: 眼屈折度 D)

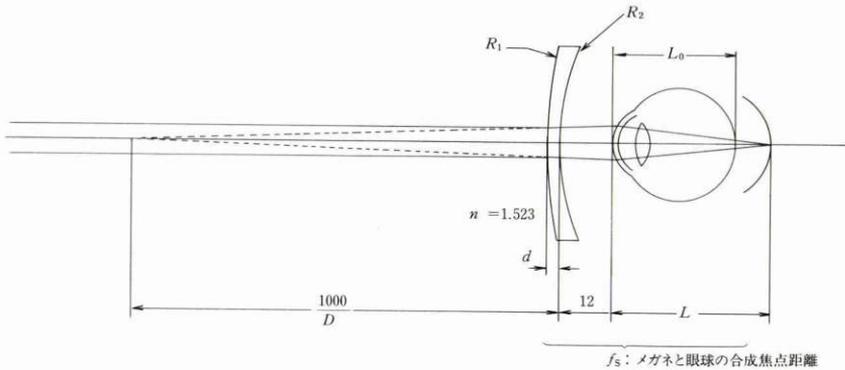


図6 有水晶体眼, 眼鏡装用プログラムの説明図 ( $R_1$ : 眼鏡前面曲率,  $R_2$ : 同後面曲率,  $n$ : 眼鏡屈折率,  $d$ : 眼鏡中心厚,  $L_0$ : 正視眼眼軸長,  $L$ : 屈折異常眼眼軸長,  $D$ : 眼屈折異常度)

り倍率が高い。

5. 有水晶体屈折異常眼に対する倍率

白内障手術をしない方の眼に屈折異常がある場合に

ついて述べる。本研究は眼屈折異常を軸性と設定したので、それに基づいて計算する。比較検討するために、前述同様のプログラムを作製し、コンピューターによ

表6 有水晶体眼鏡装用時の倍率

D	R <sub>1</sub> (mm)	R <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	fs (mm)	L (mm)	$M_s = \frac{fs}{22.578}$
10	42.3	160.02	8.4	23.296	20.503	1.0318
9	45.27	161.20	7.5	23.092	20.855	1.0228
8	48.75	160.02	6.7	22.933	21.216	1.0157
7	53.0	160.02	5.9	22.794	21.575	1.0096
6	58.55	160.02	6.1	22.811	21.934	1.0103
5	65.08	160.02	5.3	22.702	22.296	1.0055
4	73.74	160.02	4.9	22.658	22.665	1.0036
3	88.4	174.0	3.8	22.547	23.030	0.9986
2	95.72	148.6	2.9	22.522	23.400	0.9975
1	105.10	130.25	2.2	22.525	23.775	0.9977
0	105.10	104.6	1.9	22.578	24.146	1.0
-1	105.10	87.17	1.7	22.639	24.525	1.0027
-2	105.10	74.71	1.4	22.694	24.908	1.0052
-3	131.11	74.71	1.1	22.733	25.291	1.0069
-4	131.11	65.37	1.0	22.804	25.677	1.0100
-5	174.59	65.37	0.9	22.863	26.065	1.0126
-6	174.59	58.11	0.9	22.941	26.456	1.0161
-7	262.0	58.11	0.8	23.004	26.851	1.0189
-8	262.0	52.29	0.8	23.083	27.249	1.0224
-9	262.0	47.54	0.8	23.164	27.648	1.0259
-10	262.0	43.55	0.8	23.245	28.053	1.0295

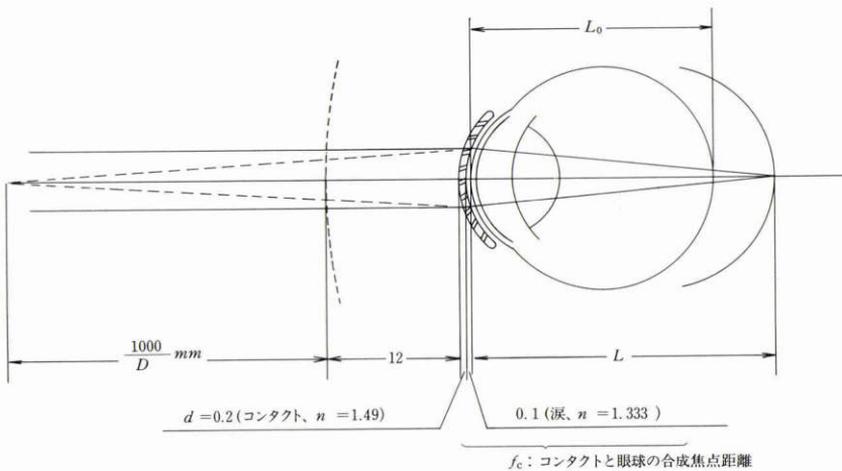


図7 有水晶体眼コンタクトレンズ装用時プログラムの説明図 ( $L_0$ : 正視眼眼軸長,  $L$ : 屈折異常眼眼軸長,  $D$ : 眼屈折率異常度)

表7 有水晶体眼コンタクトレンズ着用時の倍率

D	R <sub>1</sub> (mm)	R <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	fc (mm)	L (mm)	$M_c = \frac{fc}{22.704}$
10	6.595	7.6	0.2	19.374	20.503	0.8534
9	6.707			19.698	20.857	0.8676
8	6.820			20.023	21.213	0.8819
7	6.933			20.351	21.572	0.8963
6	7.047			20.680	21.933	0.9109
5	7.162			21.012	22.296	0.9255
4	7.278			21.346	22.662	0.9402
3	7.395			21.682	23.030	0.9550
2	7.512			22.020	23.400	0.9699
1	7.631			22.360	23.773	0.9849
0	7.750			22.704	24.149	1
-1	7.870			23.049	24.527	1.0152
-2	7.992			23.397	24.908	1.0305
-3	8.113			23.747	25.291	1.0459
-4	8.236			24.099	25.677	1.0615
-5	8.360			24.453	26.065	1.0771
-6	8.485			24.811	26.457	1.0928
-7	8.611			25.171	26.851	1.1087
-8	8.737			25.533	27.247	1.1246
-9	8.865			25.898	27.647	1.1407
-10	8.993			26.265	28.049	1.1569

る計算を行なった。

#### 1) 眼鏡

有水晶体眼に眼鏡を装着した場合のプログラムの説明は図6に示した。無水晶体眼のときは眼鏡・角膜間距離が10mmであったが、この場合は12mmと説定した<sup>6)</sup>。

表6に実際の眼鏡光学値(東京光学製)と倍率値を示してある。

#### 2) コンタクトレンズ

有水晶体眼にコンタクトレンズを装着したときのプログラムと計算値は図7と表7に示した。

以上有水晶体眼に眼鏡とコンタクトレンズを装着した場合の倍率を図8に表わした。

片眼にだけ白内障手術を行なった場合、術前の各眼の屈折異常度と術後の倍率の差は、図5と図8を対照して知ることができる。

術前の両眼がほぼ同じ屈折異常度であるなら、正視

眼の場合、つまり前述の4項で得られた結果と大差ないと考えてよいということになる。

## IV 考 按

人工無水晶体眼に眼鏡, コンタクトレンズ, 人工水晶体を装着した場合の倍率は、予想通りこの順に正常眼との差が大きい結果であった。

そしてこの倍率差は軸性遠視がある場合より、軸性近視がある方が高い傾向がみられた。

また片眼手術の際には、両眼の軸性屈折異常度がほぼ同じ場合、同様のことがいえるという結果が得られた。

網膜像の像形成に関しては、倍率計算だけでは論ずるわけにはいかない。これには各種収差をしらべあげるとか、空間周波数特性を計算するとか、あるいはスポットダイアグラムを作製するなどの方法が考えられる。これらに関しては今回の研究内容には含まれない。

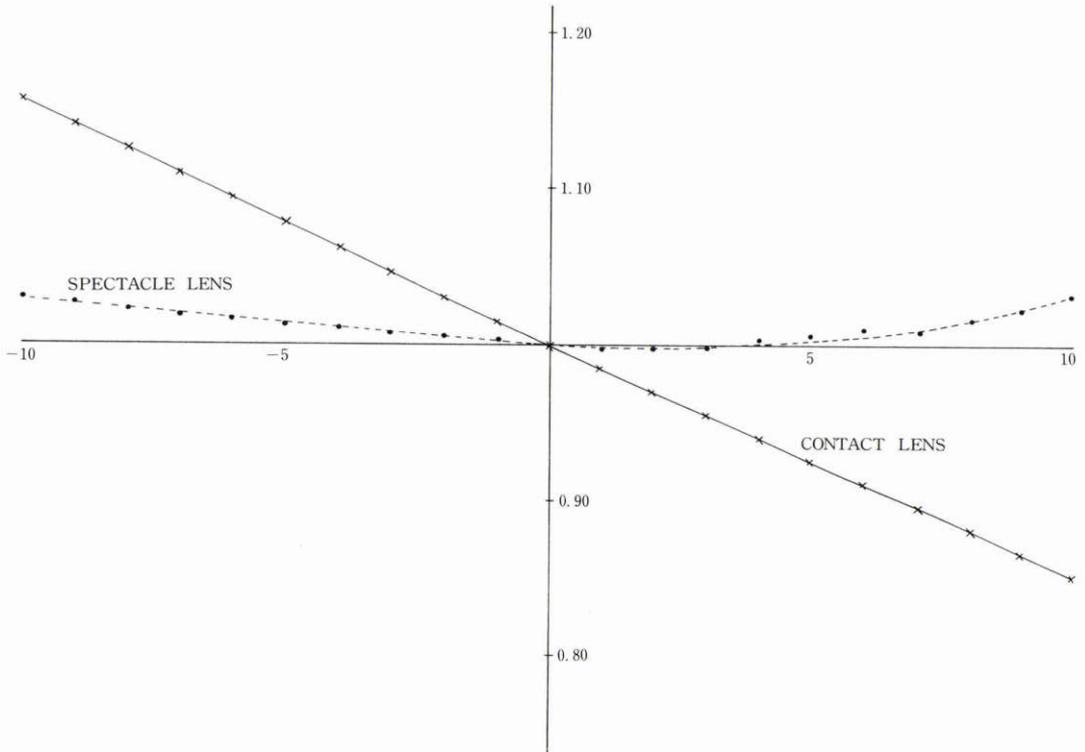


図8 有水晶体眼における眼鏡とコンタクトレンズの倍率（縦軸：倍率，横軸：眼屈折度 D）

しかし一般光学系において、像形成の差と倍率の差は極めてよく相関するものである。したがって無水晶体眼に対して、単に像形成の立場から評価するならば、人工水晶体が最も優れており、次いでコンタクトレンズ、最も劣るのは眼鏡ということになる。

以上の結果から、片眼白内障術後の眼鏡というものは、ほとんど作製不能であり、それがコンタクトレンズの出現により片眼手術がある程度可能となり、人工水晶体によりさらに両眼視における像形成が良好になったことが結論づけられる。

以上のことは全く幾何光学的立場だけから論じたものである。

## V 結 語

無水晶体眼に眼鏡，コンタクトレンズ，人工水晶体を装着したときの網膜像の倍率を計算し，次のような結果を得た。

1. 正常眼に対する倍率は，眼鏡の場合最も高く，次いでコンタクトレンズ，人工水晶体の順である。
2. この倍率曲線を見ると，遠視側より近視側に高

い。

3. 術前の眼屈折異常度が両眼ともほぼ同じなら，片眼手術後でも同様のことがいえる。
4. 像形成論的に倍率差が高いほど像形成の差は高いことから，網膜像は人工水晶体，コンタクトレンズ，眼鏡の順に正常眼に近いことになる。

## 文 献

- 1) 近藤文雄：レンズの設計技法。東京，光学工業技術研究組合，171—182，1978。
- 2) 松居吉哉：レンズ設計法。東京，共立出版，39—75，1974。
- 3) 中尾圭一：光学技術ハンドブック。東京，朝倉書店，750—751，1976。
- 4) 八百技浩，三国政吉：眼鏡とコンタクトレンズによる倍率。第67回新潟眼科集談会講演，1986。
- 5) Michaels DD: Visual Optics and Refraction, St Louis, Tronto, London, The CV Mosby Company, 224—225, 642—643, 1980.
- 6) 梶浦睦雄：臨床眼科全書2. 2. 東京，金原出版，606—607，1970。
- 7) Volk D: Clinical Ophthalmology, Philadelphia, Harper & Row, Publishers, Vol I, 50, 1985.