

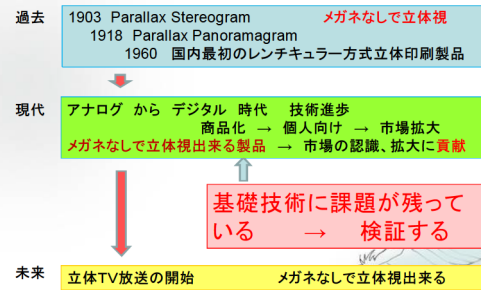
3D映像

レンチキュラー方式3Dディスプレイにおける レンチキュラー板の最適厚さを検証する — 逆使用の場合 —

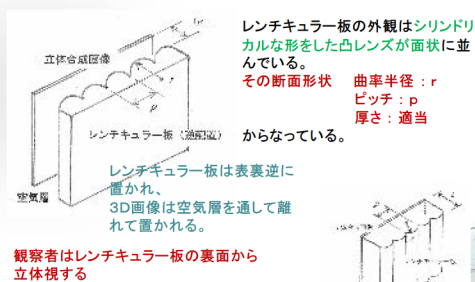
元日本工業大学、元凸版印刷株式会社
山田 千彦



はじめに



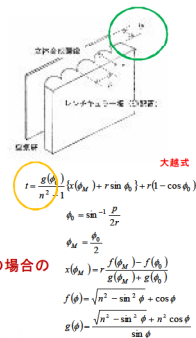
レンチキュラー板の形状 — 逆使用の場合 —



逆使用の場合の計算式

$$t_F = \frac{t}{n}$$

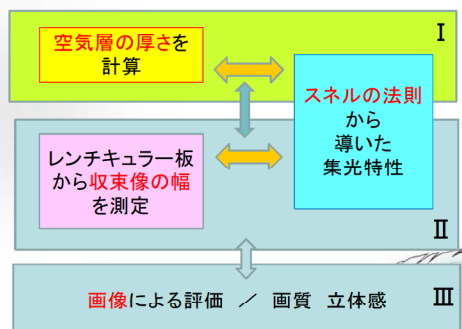
t_F : 逆使用の場合の空気層の幅
 t : 通常使用の場合の最適厚さ
 p : ピッチ
 r : 曲率半径
 n : 屈折率
 $2\phi_0$: 開口角



通常使用の場合の
計算式

$$t = \frac{n}{n-1} r$$

検証



スネルの法則と集光特性

$$n \sin \phi_1 = \sin \phi_2$$

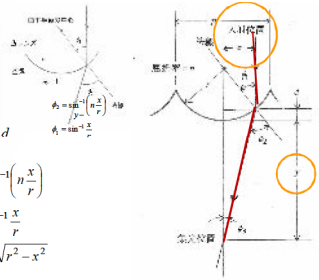
レンズの裏面
から入射

$$y = \frac{x}{\tan(\phi_2 - \phi_1)} - d$$

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left(n \frac{x}{r} \right)$$

$$\phi_1 = \sin^{-1} \frac{x}{r}$$

$$d = r - \sqrt{r^2 - x^2}$$



永田真一:「図解レンズが分かる本」(株)日本実業出版社 pp.46 (2004)

検証(Ⅰ)

空気層の厚さを
計算スネルの法則
から導いた
集光特性

計算式における
空気層の厚さを計算する上の共通なデータ
 $r=2.00$ mm
 $p=0.0000 \sim 4.0000$ mm
 $n=1.50$

基礎の基礎

一般式

$$\text{通常使用: } t = \frac{n}{n-1} r$$

$$\text{逆使用: } t_F = \frac{t}{n}$$

これらの式は、
スネルの法則において、
入射位置: x を限りなくゼロに近づけた時
満足する。

ところが、入射位置: x が大きくなると
球面収差により
収束像の幅が最小となる位置
がレンズ方向に移動する。

最適厚さ

開口角が大きくなると、
最適厚さは小さくなる。

検証(Ⅰ)／具体的な計算
一般式

逆使用

$$t_F(\text{一般式}) = \frac{t(\text{一般式})}{n} = \frac{6.00}{1.50} = 4.00 = 2r$$

通常使用

$$t(\text{一般式}) = \frac{n}{n-1} r = \frac{1.50}{1/50-1} \times 2 = 6.00 = 3r$$

検証(Ⅰ)／具体的な計算
大越式

$$t_F(\text{大越式}) = \frac{t(\text{大越式})}{n}$$

逆使用

$$t = \frac{r(f_0)}{n^2 - 1}$$

$$f_0 = \sin^{-1} \frac{p}{2r}$$

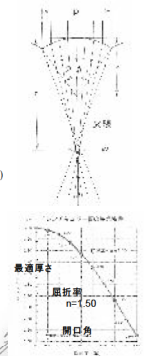
$$\phi_M = \frac{\phi_0}{2}$$

$$x(\phi_M) = r \frac{f(\phi_M) - f(\phi_0)}{g(\phi_M) + g(\phi_0)}$$

$$f(\phi) = \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \cos \phi$$

$$g(\phi) = \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + n^2 \cos \phi$$

$p=0$ の時 $2\phi_0=0$ $p=2r$ の時 $2\phi_0=180$ 度となる

検証(Ⅰ)／具体的な計算
スネルの法則

開口角

空気層の厚さ

開口角により
空気層の厚さは変化する
開口角を20度単位で
計算を進める

 $r = 2.0$ mm

$2\phi_0$	p	t	倍率 r
0	0.0000	6.00	3.00
20	0.02940	5.97	2.98
40	0.10881	5.88	2.94
60	0.20000	5.73	2.87
80	0.30712	5.53	2.77
100	0.40642	5.29	2.66
120	0.48611	5.02	2.51
140	0.55888	4.72	2.38
160	0.62892	4.41	2.20
180	0.00000	4.00	2.00

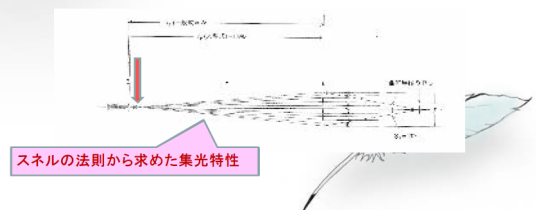
検証(Ⅰ)／具体的な計算／スネルの法則
開口角=20度の場合

ϕ	$\sin \phi$	$\cos \phi$
0	0.00000	1.00000
10	0.17365	0.98481
20	0.34202	0.93969
30	0.50000	0.86603
40	0.64279	0.76604
50	0.76604	0.64279
60	0.86603	0.50000
70	0.93969	0.34202
80	0.98481	0.17365
90	1.00000	0.00000

$r = 2.00$
 $p = 0.6946$

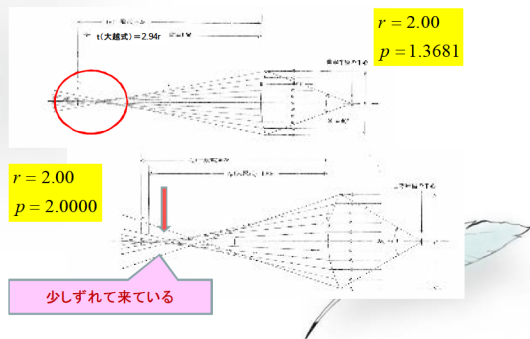
x 値を $\frac{p}{2} \times \frac{10}{10}$ から $\frac{1}{10}$ 単位で

$\frac{p}{2} \times \frac{1}{10}$ まで10ポイント設定

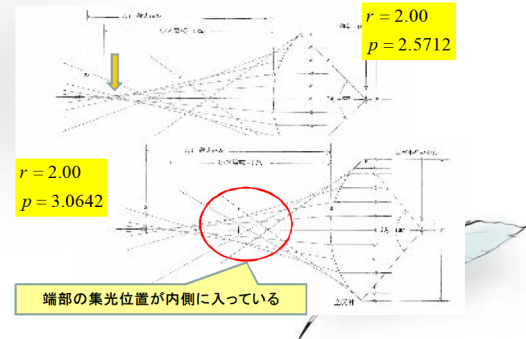


スネルの法則から求めた集光特性

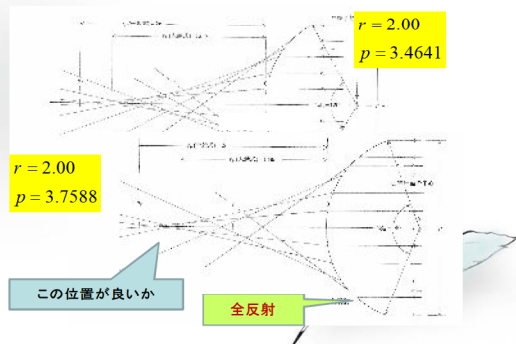
検証(Ⅰ)／具体的な計算／スネルの法則
開口角＝40度、および60度の場合



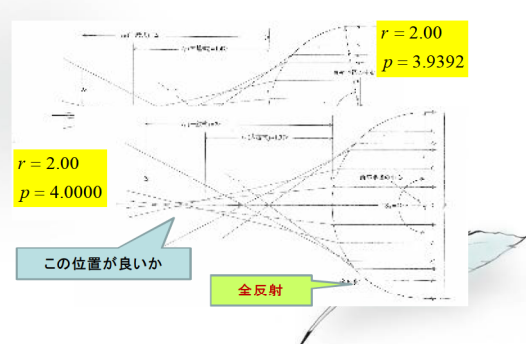
検証(Ⅰ)／具体的な計算／スネルの法則
開口角＝80度、および100度の場合



検証(Ⅰ)／具体的な計算／スネルの法則
開口角＝120度、および140度の場合



検証(Ⅰ)／具体的な計算／スネルの法則
開口角＝160度、および180度の場合



検証(Ⅱ)

レンチキュラー板
から収束像の幅
を測定

スネルの法則
から計算された
集光特性

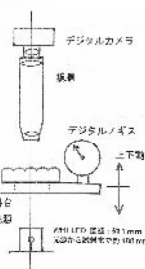
測定試料
形状の分かっているレンチキュラー板

(A) $r=0.52$	(B) $r=1.00$
$p=0.5375$	$p=1.2700$
$t=1.42$	$t=2.70$
$n=1.53$ (PVC)	$n=1.53$ (MS)

検証(Ⅱ)／収束像の幅を測定



被測定
レンチキュラー板

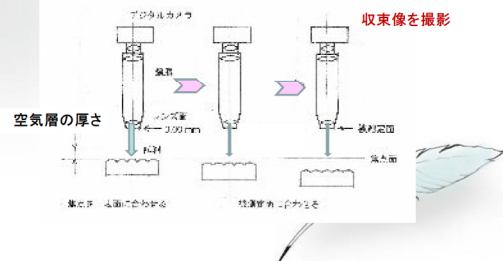


測定手順

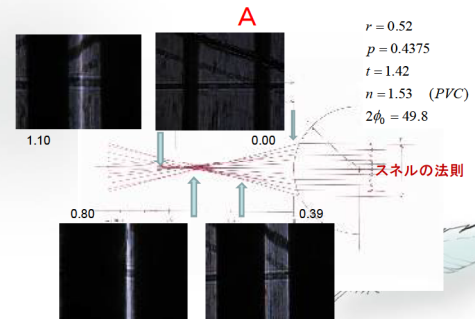
- ①試料の表面にピンを合わせ、Z軸を0.00mmにリセットする
- ②試料台を所定の距離下へ動かす
- ③その時の収束像をデジカメで撮影する
- ④撮影画像をプリントする
- ⑤プリント画像から収束像の幅を測定する

検証(Ⅱ)／収束像の幅を測定する方法

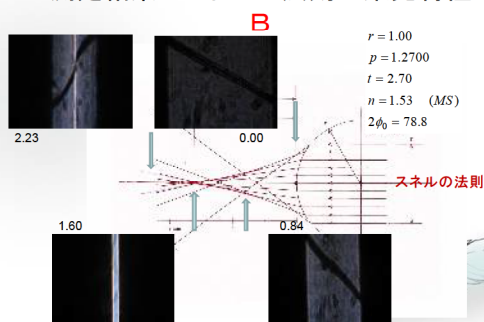
1. 試料の表面に焦点を合わせ、デジタルメーターを 0.00 mm にリセットする
2. 試料を下に動かして、収束像の幅が最も細くなった位置を求める
その位置の数値が **空気層の厚さ** となる。
3. 任意の位置の数値は **空気層内の任意の位置** となる。



検証(Ⅱ) 測定結果とスネルの法則の集光特性



検証(Ⅱ) 測定結果とスネルの法則の集光特性



検証(Ⅲ)

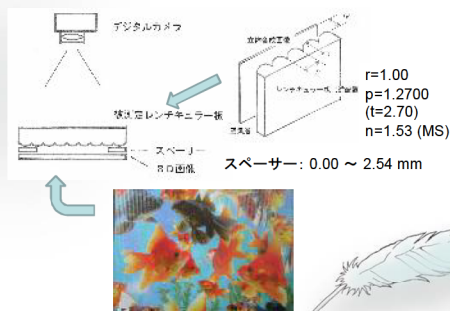
3D画像を撮影

一般式、および大越式から計算された**空気層の厚さ**の前後で画質を評価する

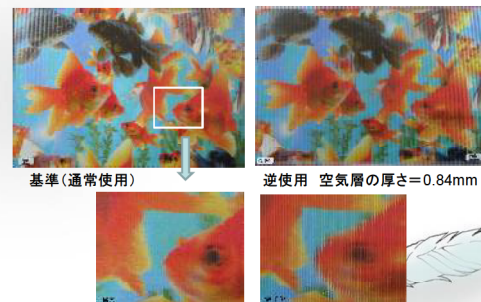
空気層の厚さを計算

レンチキュラー板 $r=1.00$
 $p=1.2700$
 $(t=2.68)$
 $n=1.53$ (MS)
 画像 金魚 (アロンズ(株)より提供) A4判

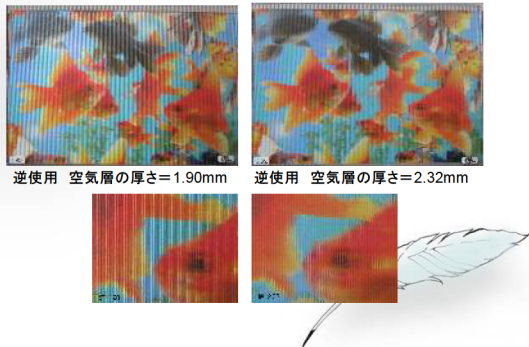
検証(Ⅲ) 3D画像の撮影



検証(Ⅲ) 3D画像 (1/3)

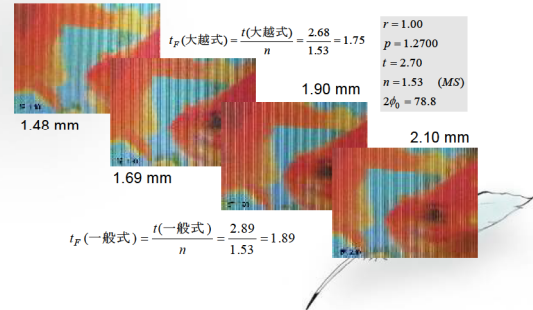


検証(Ⅲ) 3D画像 (2/3)



検証(Ⅲ) 3D画像 (3/3)

空気層の厚さ: 計算結果の前後における画質の評価



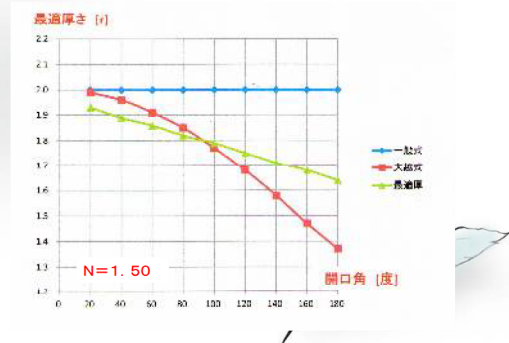
考察と結論

スネルの法則: 開口角(小)→大越式の計算値よりやや薄目が良い
 開口角(大)→大越式の計算値よりやや厚めが良い
 端部で内部反射が起こっている
 上記、大小の境界は 80~100° 付近

空中像の幅: スネルの法則の包絡線とほぼ同じ
 端部からの集光線は無視される?

画像: 先ず、次のことが言える **通常使用>逆使用**
 空気層の厚さが大越式の計算結果より前後にずれた場合、
 ・一般の写真のようなボケは見られない (一般の写真と異なる)
 ・縦のスジっぽい画像となっている
 立体感の空気層の厚さにほぼ比例している

結論/開口角と最適厚さ(逆)



3D映像

レンチキュラー方式3Dディスプレイにおける
 レンチキュラー板の最適厚さを検証する
 — 逆使用の場合 —

ありがとうございました



レンチキュラー方式3Dディスプレイにおける レンチキュラー板の最適厚さを検証する

－ 逆使用の場合 －

Verify the Optimum Thickness of Lenticular Plate
in Lenticular Method 3D Display

－ In the Case of Reverse Use －

山田 千彦

元日本工業大学, 元凸版印刷 (株)

〒120-0014 東京都足立区西綾瀬 4-13-17

E-mail : c-yamada@jcom.zaq.ne.jp

1960 年に某印刷会社からメガネなしで立体視出来る「レンチキュラー方式の立体印刷製品」が日本で初めて商品化されている。今、それから 50 年以上が経ち、技術進歩がアナログ時代からデジタル時代が変わっている。しかし、基礎的な技術でありながら不明確のまま商品化が進んでいる。それらの中からの、レンチキュラー板の「凸レンズとしての集光特性・第2弾」として検証する。

1. はじめに

日本国内において、1960 年代から印刷企業を中心にメガネなしで立体視できる「レンチキュラー方式印刷タイプ 3D ディスプレイ (通称: ステレオ印刷)」が市場に流れる様になり、当時としては珍しさが伴って多くの商品化が進められている。しかしその多くは宣伝用であり、個人向けの商品は少なかった。

当時ステレオ印刷を手にするると誰もが驚き、興味を示していたが、お金を出して購入する人はほとんどいなかった。

あれから 50 年以上が経ち、市場における栄枯盛衰の中、脈々と製品化が続いており、個人向けの製品も大きく伸びてきている。

1990 年代に入り、立体映画、あるいは臨場感通信、等に多くの論文が出る様になり、メガネなしで立体視できる産業用 3D ディスプレイが市場に出る様になってきた。

今、地上デジタル放送が実用に入り、次は立体TV放送の実用化と言われている。当然メガネなしで立体視できる方式になるである

うと言われている。

そのような流れの中で、2 眼式のメガネをかけて立体視する方法ではあるが、2005 年頃から立体映画がフルタイムで上映される様になっている。また、2010 年は家庭用立体TV元年と言われ、多くの家電メーカーから立体TVが販売される様になってきた。

そして、2011 年 10 月には「メガネなしで立体視出来る多像式の家庭用立体TV」までも発売されている。

益々発展を続けていく 3D ディスプレイ市場を拡大させていく上で、ステレオ印刷製品が何らかの形で貢献していると判断している。

しかしながら、基礎的な技術でありながら不明確のまま商品化が進んでいる点がある。

それらの中にある、レンチキュラー板の「凸レンズとしての集光特性・第2弾」を本稿で検証する。

レンチキュラー板は、通常レンズ面を表にして使用するが、用途によっては逆（レンズ面が内側）に使用することが出来る。

前稿では「通常使用の場合」について検証しているが、本稿では「逆使用の場合」について検証する。

2. レンチキュラー形状

レンチキュラー板の外観を図 01 に示す。通常使用の場合と違う点は、レンチキュラー板の表裏を入れ替えて使用する事である。

このとき、レンズ面が内側に入り、画像との間に空気層が必要になる。画像面はレンチキュラー板の焦点面に位置している。

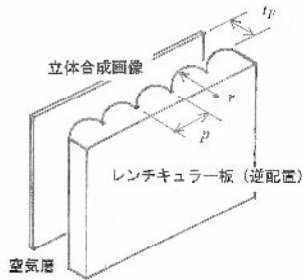


図 01 レンチキュラー板の逆使用

3. 最適な厚さを求める計算式

図 01 における空気層の厚さ： t_F は次式、

$$t_F = \frac{t}{n} \quad (01)$$

で表わされる。このとき、 t は通常使用における最適厚さを求める 2 つの式である一般式^[1]、および故・大越式^[2]で計算された値である。

通常使用における 2 つ式 については
<付録>を参照

4. スネルの法則^[3]

レンズにおけるスネルの法則を図 02 に示し、スネルの法則を式(02)で示す。

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (02)$$

ここで n_1 は入射側の媒質の屈折率であり、無色透明な樹脂が多い。 ϕ_1 は入射角である。

n_2 は出射側の媒質の屈折率であり、空気層となるので $n_2 = 1$ となる。そして、 ϕ_2 は出射角である。

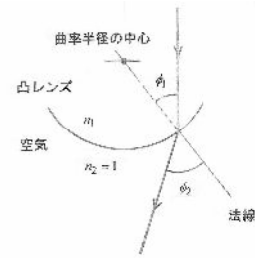


図 02 レンズにおけるスネルの法則

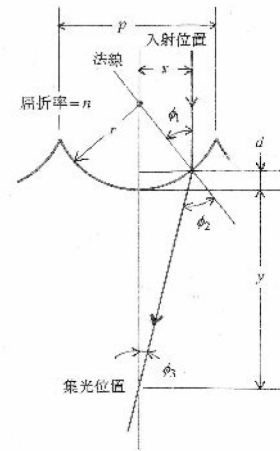


図 03 入射光の幾何学的屈折図

そこで、具体的に樹脂の中を通過してレンズの出射面に入射した光の屈折式を求めるための幾何学的関係を図 03 に示す。そして、出射光の光軸上に到達する点までの距離（集光位置）は式(03)で計算する。

4.1. 具体的な計算

「逆使用」の「通常使用」と異なる点について、まず述べる。

入射光の入射角を少しずつ大きくして行き、出射角が $\phi_2 = 90^\circ$ となる入射角を臨界角： ϕ_c と呼び、入射角が臨界角^[4]以上の場合には光の出射はないことである。

$$\begin{aligned}
d &= r - \sqrt{r^2 - x^2} \\
n \sin \phi_1 &= \sin \phi_2 \\
\sin \phi_1 &= \frac{x}{r} \\
\phi_1 &= \sin^{-1} \frac{x}{r} \\
\sin \phi_2 &= n \frac{x}{r} \\
\phi_2 &= \sin^{-1} \left(n \frac{x}{r} \right) \\
\phi_3 &= \phi_2 - \phi_1 \\
\tan \phi_3 &= \frac{x}{d + y} \\
y &= \frac{x}{\tan \phi_3} - d
\end{aligned} \tag{03}$$

臨界角： ϕ_C は次式で表すことが出来、

$$\phi_C = \sin^{-1} \frac{1}{n} \tag{04}$$

屈折率： $n=1.50$ の場合、

$$\phi_C = 41.81^\circ$$

となる。

本稿では、式(01) から得られる2つの値、すなわち t_F (一般式)、および t_F (大越式) から得られた値とスネルの法則から得られた値との比較を行い、従来の式(01)から得られた値を使用している事に間違いがなかったか？を検証していくことになる。

通常使用における最適厚さ： t (大越式) は開口角により計算結果が異なってくることから、本稿でも開口角 20° 間隔で集光位置(単位： r) を計算し、図 04 に示す。

はじめに、開口角： $2\phi_0 = 20^\circ$ における集光特性を計算する。この時のピッチは、

$$p = 0.6946 \text{ mm}$$

であるが、入射位置： x を、

$$x = \frac{p}{2} \times \left(\frac{10}{10} \sim \frac{1}{10} \right)$$

となる 10 点の入射位置で計算を進め、その結果を表 01 に示す。

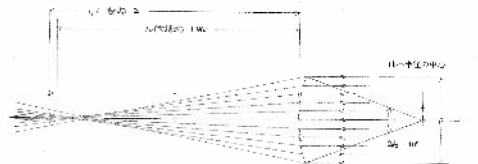
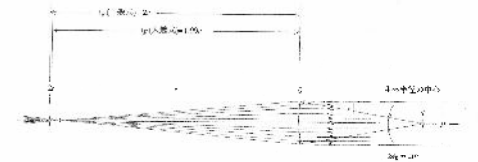
以下、同様に開口角を 40° から 180° まで計算を進める。その計算結果はここでは省略するが、計算結果の全グラフを図 04 に

示している。

ここで三者を比較出来るように、グラフの中に、式(01)から計算された t_F (一般式)、および t_F (大越式) の答えも併せて表示している。

表 01 入射光の幾何学屈折図から計算した集光特性
(開口角=20 度の場合)

x	スネルの公式
0.3473	3.8625
0.3126	3.8889
0.2778	3.9125
0.2431	3.9331
0.2084	3.9510
0.1737	3.9660
0.1389	3.9783
0.1042	3.9878
0.0695	3.9946
0.0347	3.9987



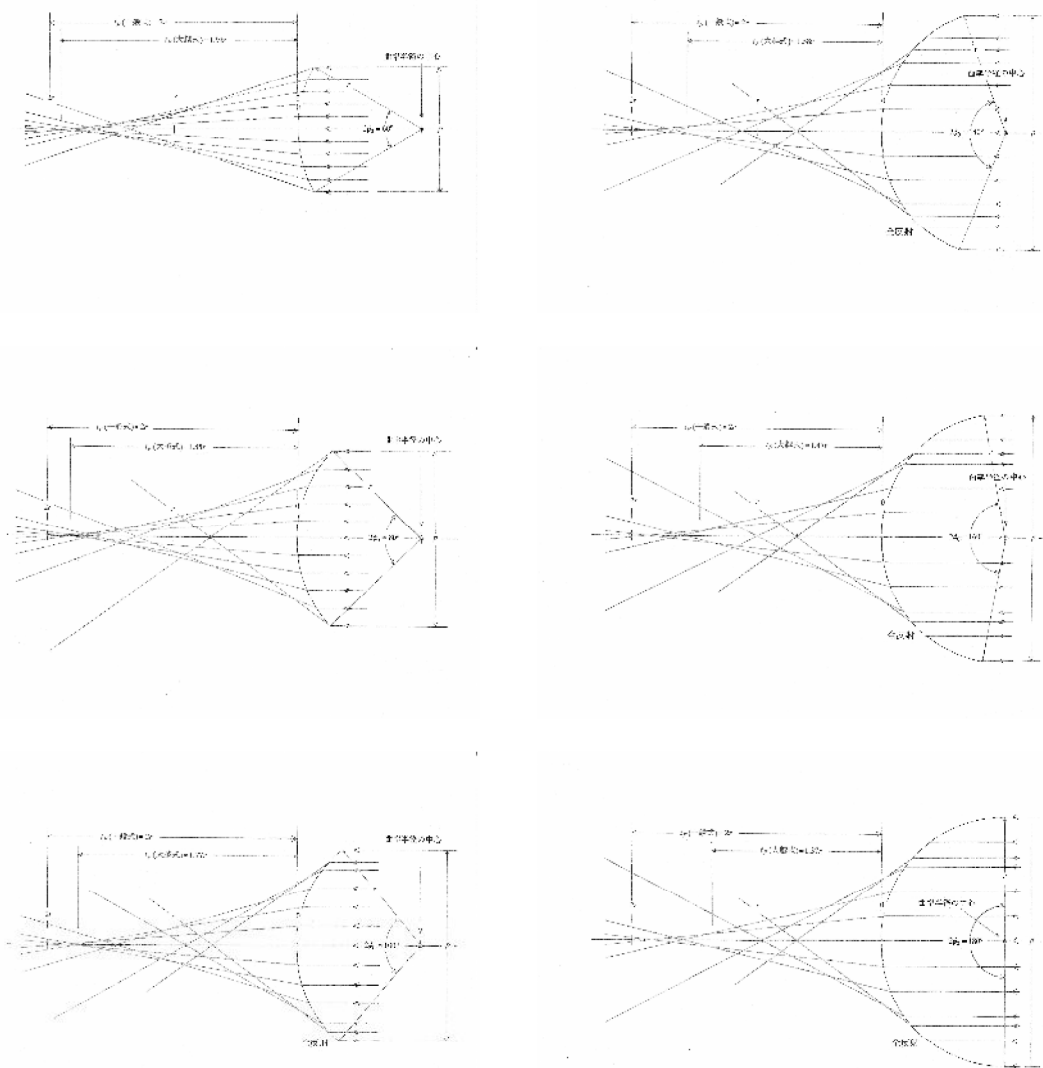


図 04 集光特性、三者の比較

まず、図 04 から分かることは、開口角が 80° を超えると、臨界角を超える入射角が存在するようになり、集光特性に影響することである。

5. 収束像の幅の測定

図 04 から最適厚さを求めるのが困難にな

ることから、検証のための資料として、収束像の幅を測定する。

被測定試料となるレンチキュラー板の裏面に入射した光の出射光における収束像の幅を測定する。



図 05 測定用顕微鏡

5.1. 測定治具

測定用顕微鏡を図 05 に示す。この顕微鏡は市販品であるが、レンチキュラー板の形状測定、および集光特性が出来るように筆者が改造している。

顕微鏡は市販のカートン社製の CBMT-15 を使用している。改造点は、

- ① XY ステージの X 軸にデジタルノギスを取り付けてレンチキュラー形状におけるピッチを測定する
- ② 鏡胴の上下動をデジタルノギスで測定し、収束位置を求める
- ③ 下からの光源に自作の点光源（未図示）を取り付けて収束像の幅を測定する。

さらに、デジタルカメラにより観察画像を撮ることが出来る。

5.2. 測定方法

測定方法の概要を図 06 に示し、測定手順を述べる。

- ① 試料台にレンチキュラー板のレンズ面を上にして載せる
- ② レンズ面にピントを合わせる
- ③ Z 軸のデジタルノギスの表示を 0.00 にリセットする
- ④ 試料台を所定の量、下に動かす
- ⑤ その位置の空中像を収束像としてデジタルカメラで撮影する
- ⑥ 撮影画像をプリントする
- ⑦ プリント画像から収束像の幅を計算して求める

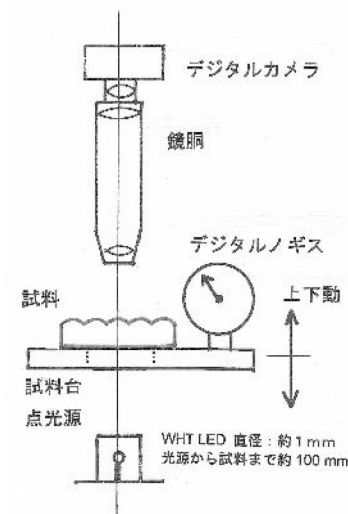


図 06 収束像の幅の測定、概要図

5.3. 被測定試料

形状の分かっている 2 点のレンチキュラー板を試料として測定する。

試料 A の形状は、

$$r = 0.52$$

$$p = 0.4375$$

$$t = 1.42$$

$$n = 1.53 \quad (\text{PVC})$$

$$2\phi_0 = 49.8$$

試料Bの形状は、

$$r = 1.00$$

$$p = 1.2700$$

$$t = 2.70$$

$$n = 1.53 \quad (MS)$$

$$2\phi_0 = 78.8$$

である。

5.4.測定結果

測定結果を図 07 に示す。図の中で、収束線はスネルの法則から計算で求めた線であり、包絡線は本項で測定した結果であり、図 06 ではこの2つのデータを重ねて表示している。

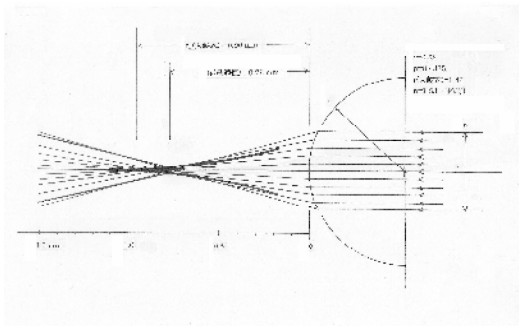


図 07 収束像、測定結果

試料Aの開口角は約 50°であり、出射光はほぼ一点に向かって集光している。

試料Bは開口角が約 80°と角度が大きく、ピッチの両端付近になると出射角度が大きくなり、ほぼ一点に集光しなくなっている。

しかし、収束像の幅(空中像)の測定では、

両者ともその包絡線はほぼ同じパターンとなっている。

6. 3D画像の画質による検証

更なる検証のためのデータとして、実際に3D画像を撮影し、画質による評価を行う。

撮影方法を図 08 に示す。印刷された3D画像の上の両端にスペーサーを置き、その上に試料となる被測定レンチキュラー板を裏面で配置する。

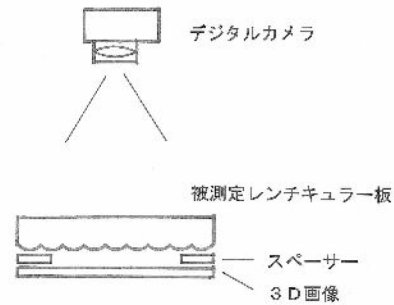


図 08 撮影方法

そして、撮影する。

6.1. 被測定試料

前章で用いた試料Bを使用する。この試料における空気層の最適厚さは式(01)から、

$$\begin{aligned} t_F(\text{一般式}) &= \frac{t(\text{一般式})}{n} \\ &= \frac{2.89}{1.53} = 1.89 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_F(\text{大越式}) &= \frac{t(\text{大越式})}{n} \\ &= \frac{2.68}{1.53} = 1.75 \end{aligned}$$

である。

6.2. 撮影方法

次の手順で撮影を行う。

- ① スペーサーの厚さを 0 mm として、3D画像の上に試料Bを載せて撮影する。

- ② 3D画像の両端に約0.2 mmの厚さのスペーサーを配置し、その上に試料Bを載せて撮影する。
- ③ スペーサーの厚さを約0.2 mm増加して、②の撮影を行う。
- ④ 約10回程度繰り返して、撮影を終了する。
- ⑤ 撮影された画像をプリントし、それぞれの画質を評価する。

6.3. 撮影結果（画質の評価）

撮影された画像の中から4点を選択して、図09に示す。

この時、画質の評価内容には下記の2点が必要になる。

- ① 画像としての画質
- ② 立体感（奥行き再現性）



図09 撮影された画像

画質は写真として、画像がシャープか、ぼけているか、しか分からない。

同時に、その画像の立体感の再現性がどうか、評価すべきである。しかし、上記で撮影された画像で立体視することは出来ない。

そこで、立体感の評価は、別途、撮影時と同じ構成、

試料B + スペーサー + 3D画像
で筆者が目視で評価する。

- ① 逆使用の画像を比較評価するための基準は「正常使用」の時の画像である。
 - ・浮き、沈み共にシャープな画像である。
 - ・個々の画像間の奥行き感が明確に分かり、立体感も良い。
- ② 逆使用、スペーサー0.84 mm である。フォーカス点の約半分である。

- ・普通の写真の様なボケはない。
縦スジが目立つ画像である。
 - ・浮き沈みは分かるが、全体に不明確である。
- ③ 逆使用、スペーサー1.90 mm である。
ほぼフォーカス点である。
- ・スジっぽさが残っている。
 - ・当然、立体感が良い。
- ④ 逆使用、スペーサー2.32 mm である。
フォーカス点よりかなり遠い。
- ・通常のボケはないが、かなり縦スジが目立つ。
 - ・前後感が不明確。商品にならない。

7. 考察と結論

第4章、第5章から分かることは、開口角が小さいとき、最適厚さは大越式で計算した厚さよりやや薄目の方が良さそうである。

開口角が大きくなるに従って最適厚さは不明確になるが、大越式で計算した値よりやや厚めが良さそうである。

筆者の独断と偏見による最適厚さを設定し、図10に示す。

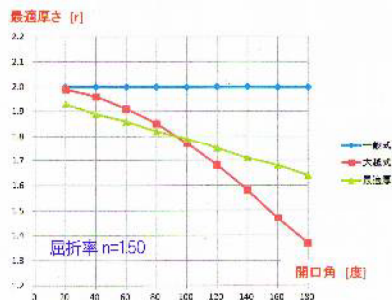


図10 最適厚さを設定

更に、第6章では、3D画像で正常使用と逆使用との比較を行った。

先ず言えることは、製品の品質は、
通常使用 > 逆使用
であることである。

ピッチ内の両端で縦にスジっぽい画像となってしまう様であるが、あえて試料の厚さをいろいろ変えて図示してみた。

図10に設定した最適厚さで実用化がお勧めとなる様だ。

5. おわりに

筆者が1970年代、ステレオ印刷製品の生産現場で参考になる文献はほとんどなく、故・大越教授からのご指導、および文献が唯一の参考書であったことを覚えている。

筆者は、それから長い年月、大越式から最適な厚さを計算している。

この事実が大きな間違いではなかったことが分かった。

しかし、レンチキュラー板を逆に使用した場合、通常使用よりやや品質は落ちるようであるが、開口角が小さい場合は、筆者が独断した最適厚さで問題にすることはないであろう、と判断される。

開口角の大きなレンチキュラー板は市場になく、評価できなかったのは残念である。

さらに、ステレオ印刷製品を生産していく中で、まだまだ不明な課題が存在している。

本稿では、画像の品質についても触れてきた。今後は、画像の品質を課題として解明していく事になるだろう。

<参考文献>

- [1] N.A.Valyus : 「STEREOSCOPY」 THE FOCUL PRESS pp.198- (1966)
- [2] 大越孝敬 : 「三次元画像工学」 産業図書 (株) pp.75 (1973)
- [3] 永田真一 : 「図解レンズがわかる本」 (株) 日本実業出版社 pp.44- (2004)
- [4] 永田真一 : 「図解レンズがわかる本」 (株) 日本実業出版社 pp.46- (2004)

<付録>

通常使用の場合のレンチキュラー板の外観を図 1 に示す。最適な厚さ： t 、および焦点距離： f は通常、

$$f = t \quad (1)$$

に作られており、レンチキュラー板の裏面に立体合成画像が密着、または接着されている。

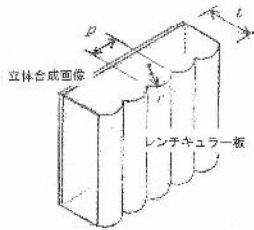


図 1 レンチキュラー形状

最適な厚さ（焦点距離）を求める計算式が 2 つ存在している。1 つは「一般式」であり、他は「大越式」である。

一般式は、

$$t = \frac{n}{n-1} r \quad (2)$$

であり、式(2)で最適な厚さ： t を計算すると、曲率半径： r 、および樹脂の屈折率： n で求めることが出来、レンチキュラー形状に関係なく 1 つの答えが得られる。

大越式は式(3)で表すことができ、故・大越孝敬教授（元・東京大学）の著書で提案されている。

最適な厚さ： t を計算するとき、レンチキュラー形状におけるレンズの開口角： $2\phi_0$ により答えが異なっており、凸レンズとしての集光特性を図 2 に示す。

開口角と最適厚さとの関係を図 3 に示す。横軸が開口角であり、縦軸が最適厚さを示している。

開口角は図 2 に示す $2\phi_0$ であるが、光軸に

対し左右対称であることから図 3 では ϕ_0 で表示している。

$$t = \frac{g(\phi_0)}{n^2 - 1} \{x(\phi_M) + r \sin \phi_0\} + r(1 - \cos \phi_0)$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{p}{2r}$$

$$\phi_M = \frac{\phi_0}{2}$$

$$x(\phi_M) = r \frac{f(\phi_M) - f(\phi_0)}{g(\phi_M) + g(\phi_0)}$$

$$f(\phi) = \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \cos \phi$$

$$g(\phi) = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + n^2 \cos \phi}{\sin \phi}$$

(3)

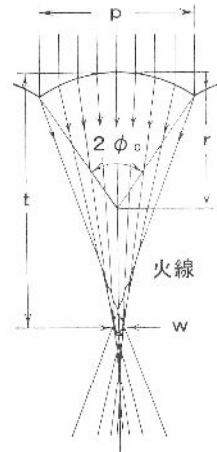


図 2 集光特性

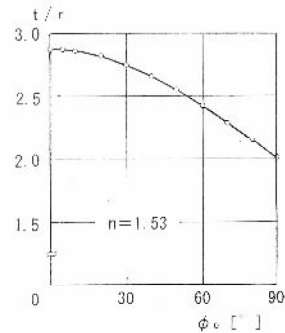


図 3 開口角と厚さ