

レンチキュラー方式3Dディスプレイ 観察位置における画質を検証する

Verify the Picture Quality in Viewing Position in Lenticular Method 3D Display

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

レンチキュラー方式3Dディスプレイ（L3D）の代表は「ステレオ印刷」製品である。ステレオ印刷は多像式であり、観察者はどこから観ても立体視できる。事実、市場にある製品を手にとって観たり、壁面に固定していろいろなところから観て、確かにどこからでも立体視できる。観察者は本当にどこから観ても立体視できるのであろうか、検証する。

1. はじめに

市場にある製品を立体視している状況を図1に示す。製品は、円筒状凸レンズが面状に配列されたレンチキュラー板が使われており、レンチキュラー板の裏面に立体合成された印刷画像が接着されている。そして、観察者は正面からL3D製品を観ている。

従来、集光特性の測定、等を検証するときの条件は、観察者が正面から見ているということであり、光がレンチキュラー面の正面から入射する事とみている。

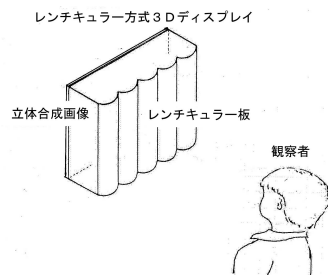


図1. 立体視

しかし、観察者はどこから観ても立体視していることから、上下左右から見ると言うことは、上下左右から光が入射した場合にどのような集光特性を示し、その時の画質（立体感を含めて）はどうなるのか、を検証していく事になる。



図2. 画質評価に使われる
ステレオ印刷製品

2. 評価試料

試料をここに示す。

レンチキュラー形状：

$r=0.52$ $p=0.4375$ $t=1.46$ mm

材料：塩化ビニール樹脂 $n=1.53$

製品サイズ：265×340mm

であり、画質評価に使われるステレオ印刷製品を図2に示す。

3. 集光特性の測定

集光特性を測定するための測定治具を図3、および図4に示し、測定中の図を図5に示す。

図3は収束幅を測定するための点光源であり、光源の穴の直径は約1.5mm程度である。

図4は収束幅を測定する測定治具（自作）である。光源側に試料台がある。試料台は上下左右に首を振れる構造になっている。また、首振角度を表示するための分度器が固定されている。

試料となるレンチキュラー板は、試料台の手前の中央に、レンズ面を光源側にして固定する。

治具の手前には、収束幅測定用ルーペがあり、その後ろに収束画像を記録するためのデジタルカメラが固定されている。また、収束位置を測定するためのデジタルノギス（スケール）が取り付けられている。

図5に収束幅を測定している図を示す。測定治具は作業台の前後両端に固定する。奥の端部には点光源を固定し、手前の端部には測定治具を固定する。点光源と測定治具間の距離は約1,100mmである。

集光特性の基本となるレンチキュラー板の正面に入射する光の収束幅は、左右上下とも角度を0度として測定する。

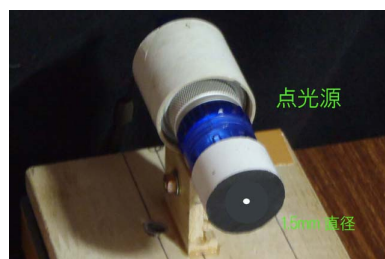


図3. 点光源



図4. 収束幅測定治具



図5. 収束幅測定



図6. 画質評価

4. 画質の測定

画質測定時の状況を図6に示す。デジタルカメラを三脚に固定する。L3D製品は壁面に固定する。

床面には、左方向に0度、10度、20度、30度、40度の表示がある。三脚の位置からL3D

製品を観るときの角度が表示されている。

壁面には、上方向に 0 度、10 度、20 度、30 度、40 度の表示がある。三脚の位置から L3D 製品を観るときの角度である。

上下左右とも 0 度の時、測定者は L3D 製品を正面から観たときの画像を撮影することになる。そして、最大値として、左から右へ 40 度、下から上へ 40 度の斜め位置からの撮影することが出来る。

また、本稿の様な報告書で立体感（奥行き再現性）を表現するのは大変難しい。そこで、続けて 2 眼式ステレオカメラを使用して同じ上下左右の位置からステレオ撮影を行う。

5. 観察位置を上下左右に移動した場合の集光特性

5-1. 球面収差

中央に存在する正立体視領域を主ローブと呼び、その両側に多く存在する正立体視領域を副ローブと呼んでいる。

観察者が横に移動して立体視する場合、画像の画質上で問題になるのが「球面収差」である。

そこで観察者が主ローブ、および副ローブにおいて立体視している場合の焦点位置の移動に伴う収束幅の計算（作図）、および実測を行った。

(1) 集光特性を作図

横に移動する角度は、正面の 0 度、および 5 度～40 度であり、図 7 に示す。

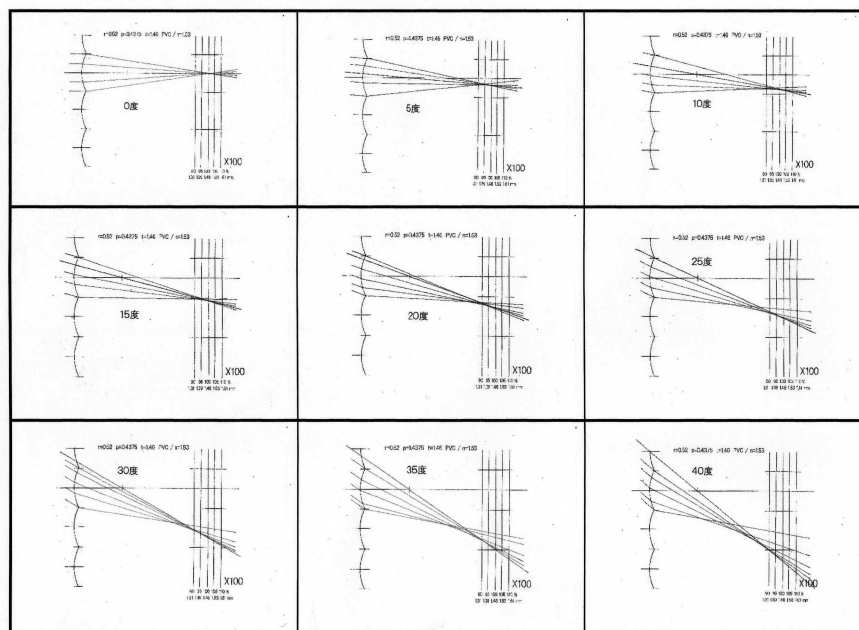


図 7 左右の斜め入射光における焦点位置、および収束幅のグラフ（入射角＝ 0 度 ～ 40 度）

(2) 収束幅の測定

図 7 からレンチキュラー板裏面に位置する点の収束幅を求めると表 1 の様になる。

表1 入射角度における
焦点位置、および収束幅
左右（球面収差）

入射角 度	焦点 mm	収束幅 μm
0	1.46	10
5	1.39	17
10	1.39	28
15	1.35	40
20	1.31	60
25	1.25	80
30	1.20	110
35	1.13	161
40	1.03	250

表2における焦点位置とは、収束幅の最も細い位置
のレンズ表面からの距離であり、収束幅とはレンチキ
ュラー板裏面における収束幅を示している。

表2 入射角度における焦点位置、および収束幅
上下（楕円形）

L形状:	r	p	t	PVC	
	0.52	0.4375	1.46	1.53	

仰角 θ	長径	短径	相当 r	t		収束幅 μm
	a	b		大越式	実測値	
0	円形		0.52	1.46		10
10	0.53	0.52	0.51	1.43	1.31	16
15	0.54	0.52	0.50	1.40	1.24	19
20	0.55	0.52	0.49	1.36	1.17	23
25	0.57	0.52	0.47	1.31	1.10	27
30	0.60	0.52	0.45	1.25	1.02	32
35	0.63	0.52	0.43	1.17	0.95	40
40	0.68	0.52	0.40	1.07	0.88	49

収束幅はレンチキュラー板の裏側(t=1.46mm)における値

5-2. 非球面化

ステレオ印刷製品を見上げて（あるいは、見下げて）見る
場合、シリンドリカルな凸レンズは「楕円形」（非球面）とな
ると考えられる。図8に円形が楕円形となる幾何学的関係を
示している。

この時、仰角が変わると短径の値が一定で、長径の値が変化
することになる。

レンチキュラー板のレンズ面に入射する光の仰角を変えた
時の焦点位置、および収束幅を計算し、その結果を表2に示
し、そのグラフを図9に示す。

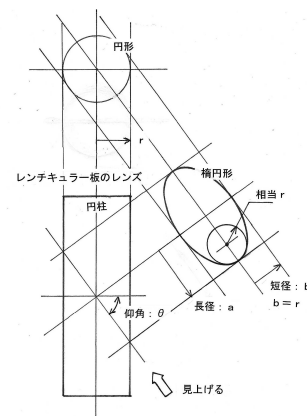


図8 見上げた場合の
幾何学的関係

5-3. 球面収差、および非球面化の複合特性

観察者は、主ローブの中心から正面の3D画像を観た時、最良の3D画像を観ることが出来
る。しかし、観察者は左右の方向から主ローブだけでなく、副ローブの3D画像を観ていたり、
上にある3D画像を下から見上げて観る事もある。さらに、斜め上にある3D画像を斜め下の
位置から観ることもある。その時の画質はどの様に劣化してしまうのか。

すなわち、観察位置が変わることにより、球面収差や、非球面化、およびその両方が立体視
にどの様に影響するかを検証する。

(1) 集光特性（収束像）による評価

筆者としても初めての測定、および評価になることから、図3、および図4に示す治具を
使って、図5に示す方法で集光特性（収束幅）を測定する。

この測定で注意することは、

収束幅とは、レンチキュラー板裏面における収束幅
である。なぜなら、その位置に3D画像があるからである。

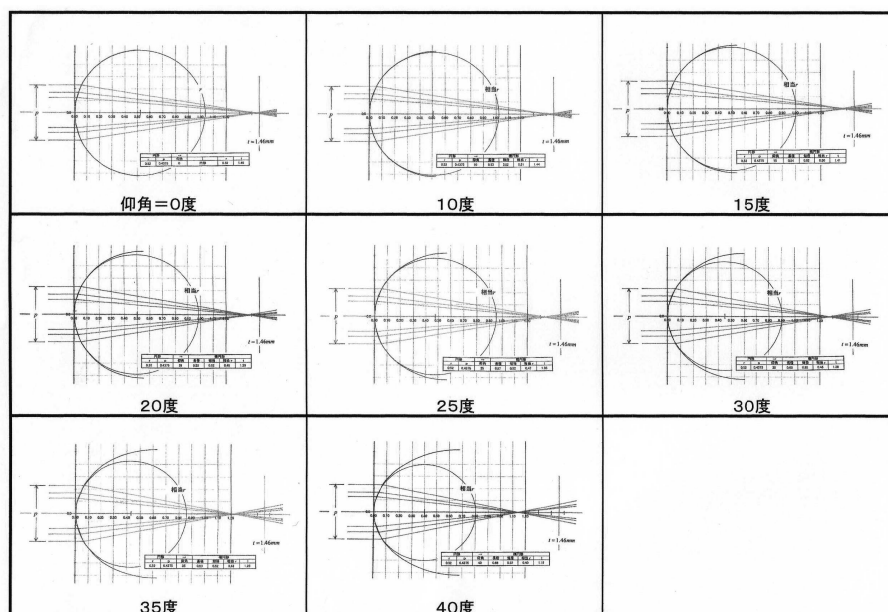


図9 上下方向から入射した光の焦点位置、および収束幅のグラフ（迎角=0度～40度）

試料

試料は第2章に示すレンチキュラー板の裏面に拡散シート、および当て板(PC板)を密着させている。

収束像の撮影

試料台に試料となるレンチキュラー板を固定する。レンズ面は向こう側とする。撮影手順は、

- ① 左右上下とも 0 度にして、カメラはレンチキュラー板の裏面（拡散面）にピントを合わせ、正面の収束像（1 枚目）を撮影する。
- ② 上下の角度を 0 度のまま、左右を 10 度にセットし、2 枚目の撮影を行う。
- ③ 同様に、左右の角度を 20 度～40 度まで 10 度間隔で収束像を撮影する。
- ④ 次に上下の角度を 10 度にセットして、左右の角度を 0 度～40 度まで 10 度間隔で収束像を撮影する。
- ⑤ 同様に、上下の角度を 20 度～40 度まで 10 度間隔で収束像を撮影する。

そして、撮影する全画像数は $5 \times 5 = 25$ 枚となる。

一覧表に仕上げる

撮影した 25 枚の写真を一覧表にして、写真を縦横に並べてみると、集光特性の違いが一目瞭然でわかる。一覧表の台紙を表 3 に示す。

正面から撮影した写真を 0/0 と表示し、左から右方向に 40 度、下から上方向に 40 度の位置から撮影した写真を 40/40 と表示する。

表 3 一覧表

下から上方向を見上げる角度	40	40/0	40/10	40/20	40/30	40/40
	30	30/0	30/10	30/20	30/30	30/40
	20	20/0	20/10	20/20	20/30	20/40
	10	10/0	10/10	10/20	10/30	10/40
	0	0/0	0/10	0/20	0/30	0/40
		0	10	20	30	40
左から右方向を覗いている角度						

収束像の一覧

0/0～40/40 までの全 25 枚の写真を図 10 に示す。

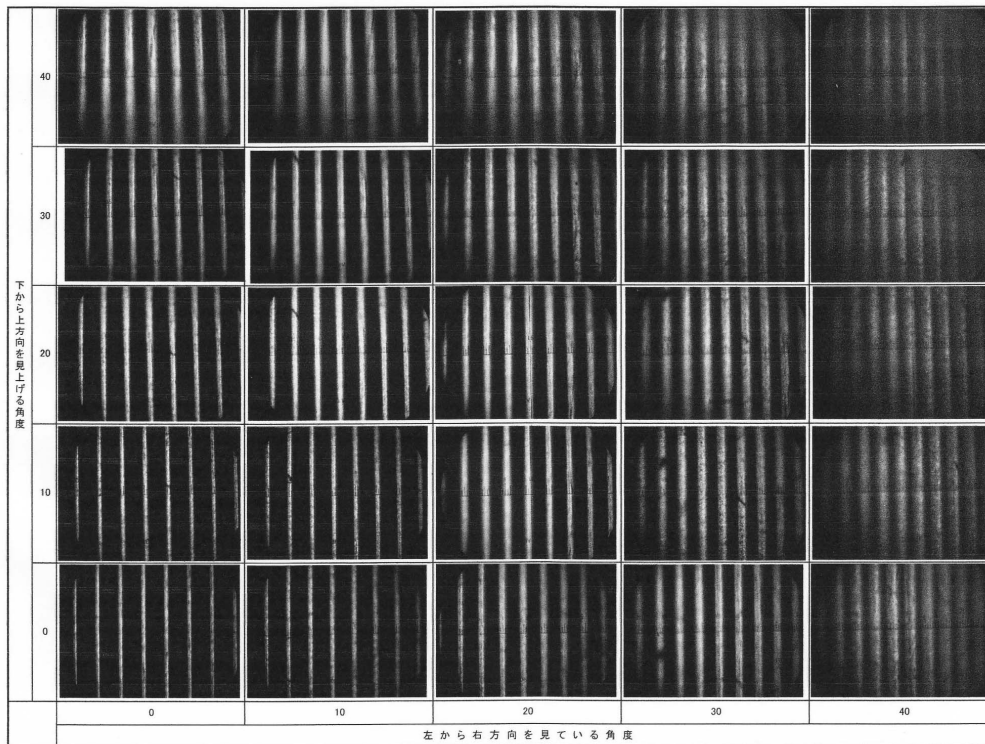


図 10 収束像 全 25 点

6. 画質、および立体感の評価用 3D 画像の撮影

撮影環境

画質を評価するために図 6 に示す撮影方法を行う。図 6 にある様に、筆者の室内に撮影場所を設定する。

床面には横軸となる、正面を意味する 0 度、左方向へ少しずつ角度をつけて 10 度、20 度、30 度、40 度の位置を表示する。

被写体は筆者所有のステレオ印刷製品（図 1 に示す）を壁面に固定する。

この被写体は正面（迎角=0 度）から上に向かって、10 度、20 度、30 度、40 度の位置に移動し、固定できる。

撮影手順

- ① 正面（0 度）の被写体を撮影。続けて床面の左方向にある 10 度の位置から撮影、さら 20 度、30 度、40 度の位置から順に撮影する。
- ② 被写体を仰角=10 度の位置に移動して固定する。そして同様に、正面（0 度）の位置で撮影、さらに左方向に移動して、10 度～40 度まで順次撮影する。
- ③ 同様に、仰角を 20 度～40 度まで順次撮影を続ける。

撮影する全画像数は $5 \times 5 = 25$ 枚となる。

デジタルカメラ

OLYMPUS TG-610 最望遠で撮影 (4288×3216 pixel)

さらに、ステレオ撮影を行うと、評価時に画質だけでなく、立体視による評価もできる。そのため、2眼式ステレオ・デジタルカメラを用いて同じ位置からステレオ撮影を行う。

ステレオ・デジタルカメラ

富士フィルム社製 FINEPIX REAL 3D W1 (3,648×2,736 pixel)

眼間距離＝ 77 mm

撮影された画像の処理



図 11 撮影された画像の拡大図
正面・中央

撮影された画像の中で、評価に使われる部分を図 11 に示す。

一覧表に仕上げる

前章同様に表 3 に示す一覧表にまとめる。

画像の一覧

収束像と同様に、0/0～40/40 までの全 25 枚の写真を図 12 に示す

7. 総合評価

7-1. 収束幅による評価

観察者が左右の方向から立体視している場合は、

光学的には「球面収差」により集光特性は悪くなっている。

正面 (0/0) から観ているときの収束幅は約 10 μ m である。この値は量産されている試料のレンチキュラー板としては標準値であり、シャープで立体感の良い画像を観ることが出来る。

左右斜め (0/10→0/40) から観た場合は、球面収差により収束幅が約 30→250 μ m に広がっており、画像がボケて立体視しにくい画像となっているはずである。しかし、斜め方向から観ても画像はそれなりにシャープに見え、立体視出来る。

観察者が上下の方向から立体視すると、非球面化による「楕円形」により画像がボケて立体視しにくい画像となるはずである。

正面 (0/0) から観ているときの収束幅は上述している様に約 10 μ m であり、シャープで立体感の良い画像を観ることが出来る。

上下斜め (10/0→40/0) から観た場合は、楕円形により収束幅が約 16→50 μ m に広がっており、画像がボケて立体視しにくい画像となっているはずである。しかし、見上げる様に観ても画像はそれなりにシャープに見え、立体視出来る。

収束幅から上記両者を比較すると、収束幅の狭い上下方向に観た方が良いことが分かる。

7-2. 目視による画質、および立体感の評価

正面から観ているときは、シャープに見え、立体感もある。しかし、上下左右の斜め方向から観ると、角度が大きくなるに従って画像のシャープさが落ちていくことが分かる。

この場合、左右方向より上下方向から観たときの方が少しシャープさが良い。この事実は、

前項に述べた収束幅の違いからも理解できる。



図 12 画像 全 25 点

上下左右の斜め方向から観たときの収束幅は通常のカメラの世界から見ると、画像がボケボケになっていると想像できる。当然、立体視できなくなっているはずである。しかし、上下左右の斜め方向から観ても、画質はそれ程に悪くならず、また、立体感についても同様である。

7-3. サンプリング効果

この点をどう理解したら良いかを考えると「サンプリング効果」がある。過去の文献では、現・東京大学名誉教授である濱崎譲二氏（当時・東京大学生産技術研究所教授）が 1988 年に発表された文献^[1]が見つかっている。

筆者の理解しているサンプリング効果とは、ディスプレイ全体のシャープさ（解像力）を表現する方法である。

音の世界で、20 kHz を再現するためには、2 倍の周波数である 40 kHz でサンプリングすれば良い、と言われている。同じ考えを画像に展開すると、本文中に良く出てくる $p=0.4375$ mm のレンチキュラー板を使った 3D ディスプレイにおける横の「解像力」は、

$$\text{横の解像力} = 3\text{D ディスプレイの横幅} / p/2 \quad \text{本} \quad (01)$$

と表現することが出来る。

3D ディスプレイの横幅内に 1920 本のレンチキュラー板があった場合、その 3D ディスプレイの解像力は HDTV 相当である、と言われている。生活環境の中では、HDTV、NTSC という表現によって、そのディスプレイにおける画像のシャープさが想像できる。

7-4. 立体画像による評価

(1). 2眼式ステレオビュー

ところで、前節で画質を比較評価することは出来る。しかし、立体感については比較評価することは出来ない。本稿の様な紙面で立体感を表示出来る様にすることは困難である。本稿では、立体視する手段として2眼のステレオカメラで試料を「ステレオ撮影」している。その2眼ステレオ画像を「2眼式ステレオビュー」で立体視できる形態にすることにより、観察者はステレオビューを通して立体視することができる。そして、上下左右のいろいろな位置から観たとき、立体感がどう変化するか、を評価する時に使うことができる。

本稿の中で立体視に必要な2眼ステレオ画像を提示するには多くのページを要し、ステレオビューを添付せねばならないことから、これら両者を省略する。

2眼式ステレオビュー

市販のステレオビューを図13に示す。このビューは市販の一つであり、

TAKARA TOMY 社製 3D ShotCam Viewer
である。

立体視できる画像サイズは、

画像サイズ：(横)45×(縦)35 mm

画像間隔：55 mm

プリントサイズ：(横)140×(縦)38 mm

である。

上記ステレオビューを用いて「筆者による立体視の評価」を行うと、どの角度から見ても立体視できる事であるが、

- ・上下左右のどの角度から見ても、広い範囲で立体視できる。
- ・上下方向からの画像は、画質、立体感共に良い。
- ・左右方向からの画像は、画質、立体感とも上下方向より劣るが、立体視できる。

(2). 客観的評価（視差の測定）

誌面では抽象的な曖昧な評価となる。そこで、客観的評価として、左右の画像の持っている視差を測定する。

ここでは、両極端に位置する 0/0、および 40/40 の2枚の画像を用いて視差を測定してみる。両者とも、

- ① 左の画像は白紙にカラープリントする
- ② 右の画像は黒白反転して OHP フィルムにプリントする

そして、左の画像の上に右画像を重ねて載せ、視差を測定する。視差を測定しているときの図を図14に示す。

測定結果

0/0 画像：画像がシャープであり、その視差は約 6 mm である。



図13 ステレオビューによる立体視

40/40 画像：シャープさが少し落ちており、その視差は約 3 mm である。

すなわち、両者とも立体視できる。しかし、40/40 画像においては、シャープさが少し落ち、さらに立体感も落ちていることがわかる。

7. おわりに

L3D 製品は何処から観ても立体視できる、と思っている。本稿では、本当に何処から観ても立体視できるのか？ また、その時の画像はどう見えるのか？ を検証してみた。

結果を一言で言うと、「L3D 製品は何処から観ても立体視できる」という事が確認できた。

当然、正面から観た時、画質、および立体感とも最も良い。そして、上下左右の斜めから観た時、光学的に収束幅が悪くなっても、画質、および立体感の劣化はそれ程酷くなく、観るに堪える画像であった。

筆者が L3D (ステレオ印刷) 製品の生産に関与するようになってから、すでに 40 年近くなっている。近年、いろいろな方々と技術的な話をして気づいたことは、光学製品でありながら、この技術の基礎の基礎について不明確な点が多かったことであった。そこで、3 回にわたって基礎技術を発表させていただいた。

ご参考になれば、幸いである。

今後も不明確な点に気づいたときは、続けて検証していきたい、と考えている。



図 14 プリント画像上で視差を測定

本文では表示が不十分なため、DVD-ROM 内に元データを収録してある。ご利用ください。

—— 付録 ——

左右方向から L3D 製品を観た時の球面収差 (図 7)

上下方向から L3D 製品を観た時の楕円形の集光特性 (図 9)

上下左右から L3D 製品を観た時の収束幅の測定 (図 10)

上下左右から L3D 製品 (百合の花) を観た時の画質の測定 (図 12)

画像「2眼 3D」(0/0~40/40 全 25 枚のステレオ画像)

レンチキュラー方式3Dディスプレイ
観察位置における画質を検証する

元日本工業大学、元凸版印刷株式会社

山田 千彦



はじめに

過去

1903 Parallax Stereogram **メガネなしで立体視**
1918 Parallax Panoramagram
1960 国内最初のレンチキュラー方式立体印刷製品



現代

アナログ から デジタル 時代 技術進歩
商品化 → 個人向け → 市場拡大
メガネなしで立体視出来る製品 → 市場の認識、拡大に**貢献**



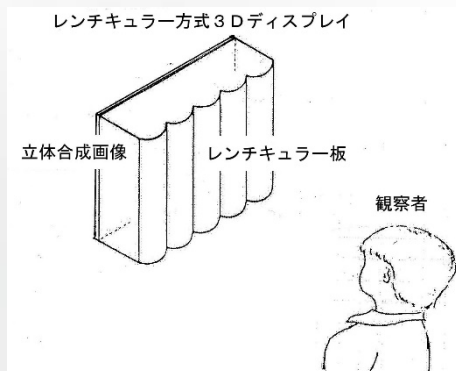
基礎技術に課題が残っている → **検証する**



未来

立体TV放送の開始 メガネなしで立体視出来る

立体視している状況



観察者はいろいろな角度から
L3D製品を観て
立体視している

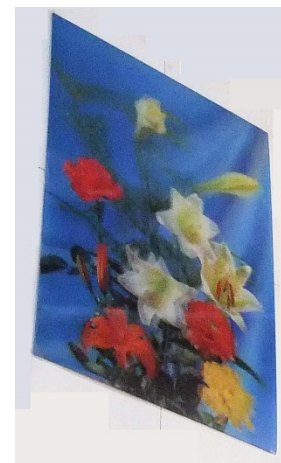
正面



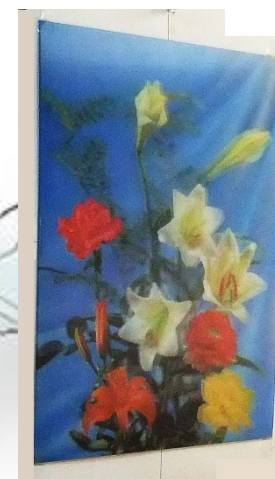
上下



上下左右



左右



観る位置による画質の劣化



楕円形

球面収差＋楕円形



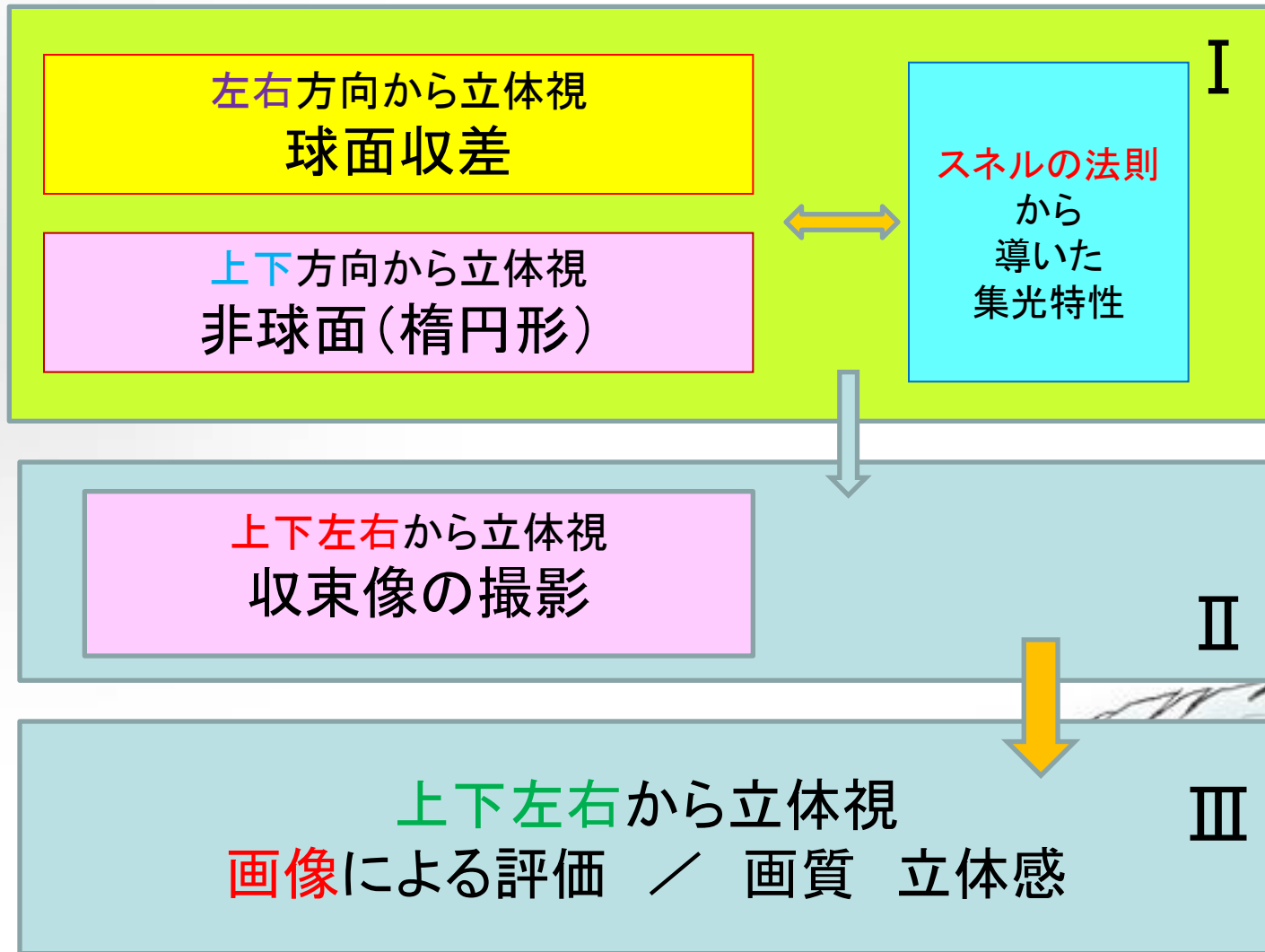
正面



球面収差



検証



スネルの法則と集光特性

円形

円形の方程式: $x^2 + y^2 = r^2$

レンズ表面から光軸と交差するまでの距離: $f_0 = (r - x_0) + f$

$$f = y_0 \tan \theta_f$$

$$\theta_f = 90 - (\theta_i - \theta_o) \quad \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_0}{x_0} \right)$$

$$\theta_o = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_i}{n} \right)$$

レンチキュラー形状: $r = 0.52$ 、 $p = 0.4375$ 、 $t = 1.46$

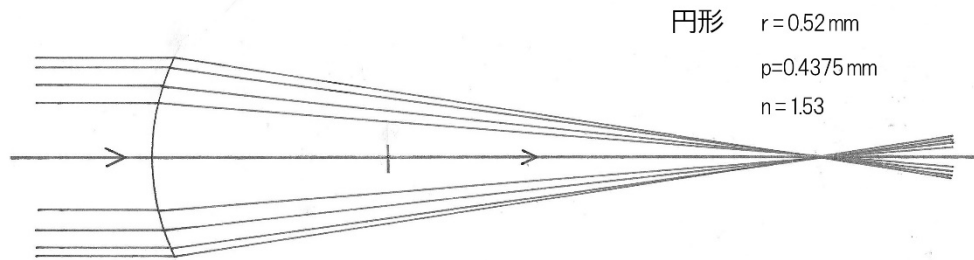
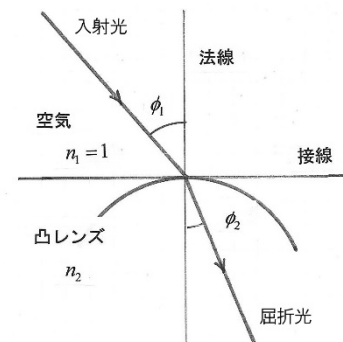
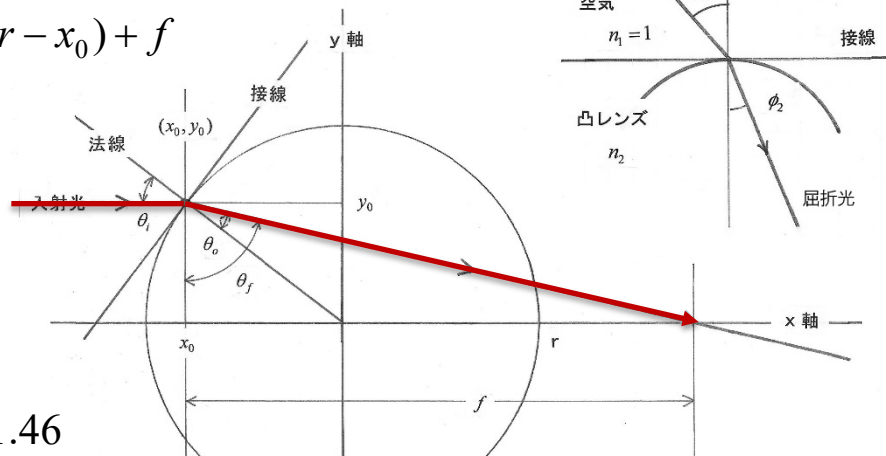
$n = 1.53$ 材料: 塩化ビニール樹脂

法線の方程式: $y = Ax + B$

$$A = - \left(\frac{1}{\begin{pmatrix} -x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}} \right)$$

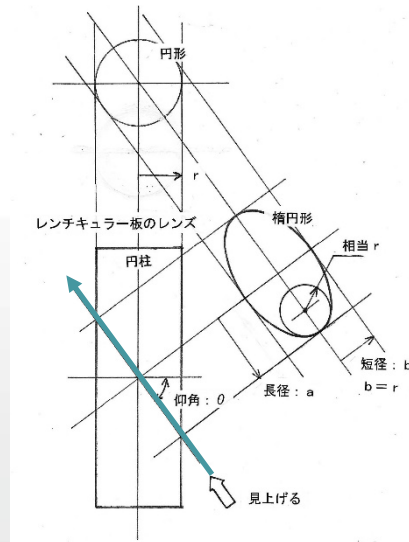
$$B = Ax_0 + y_0$$

スネルの法則: $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$



スネルの法則と集光特性

楕円形



スネルの法則: $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$

楕円形の方程式: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

レンズ表面から光軸
と交差するまでの距離: $f_0 = f + (a - x_0)$

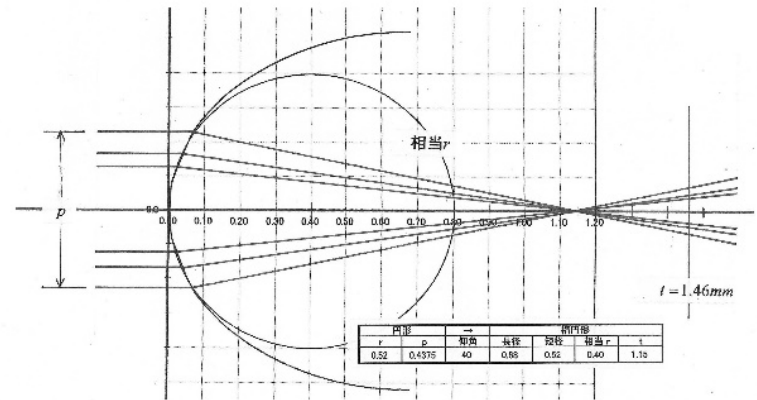
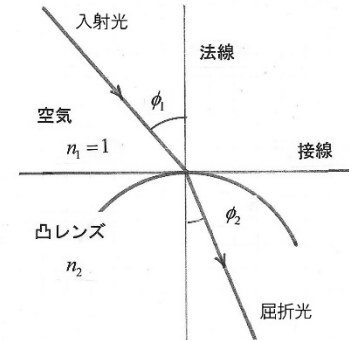
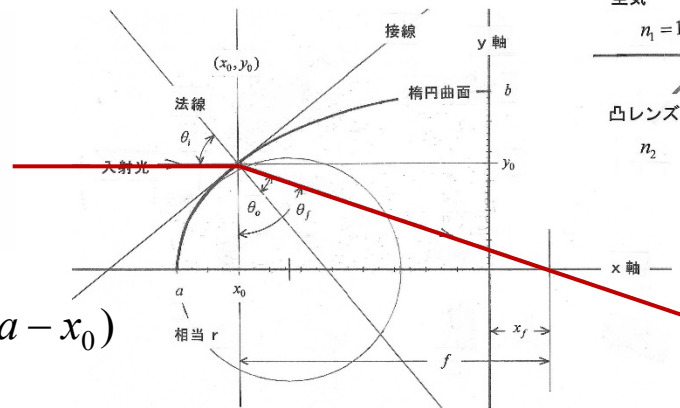
$$f = y_0 \tan \theta_f$$

$$\theta_f = 90 - (\theta_i - \theta_o) \quad \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_0 + B}{x_0} \right)$$

$$\theta_o = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_i}{n} \right)$$

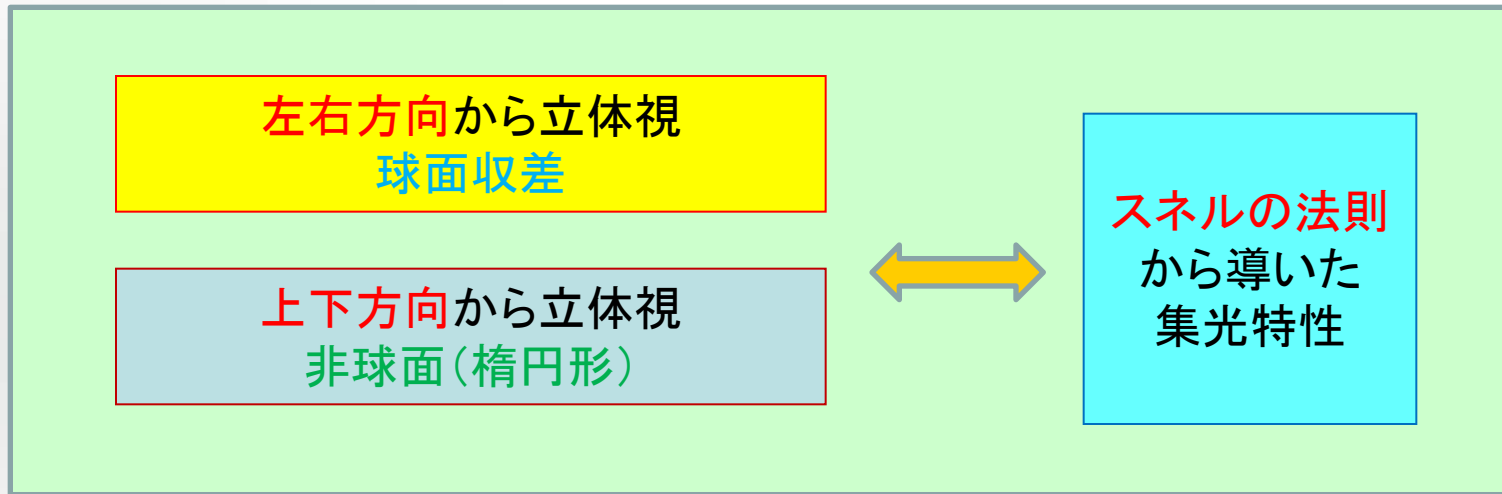
法線の方程式

$$y = Ax - B \quad A = \left(-\frac{1}{\left(-\frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{b^2}{a^2} \right)} \right) \quad B = Ax_0 - y_0$$



検証(Ⅰ)

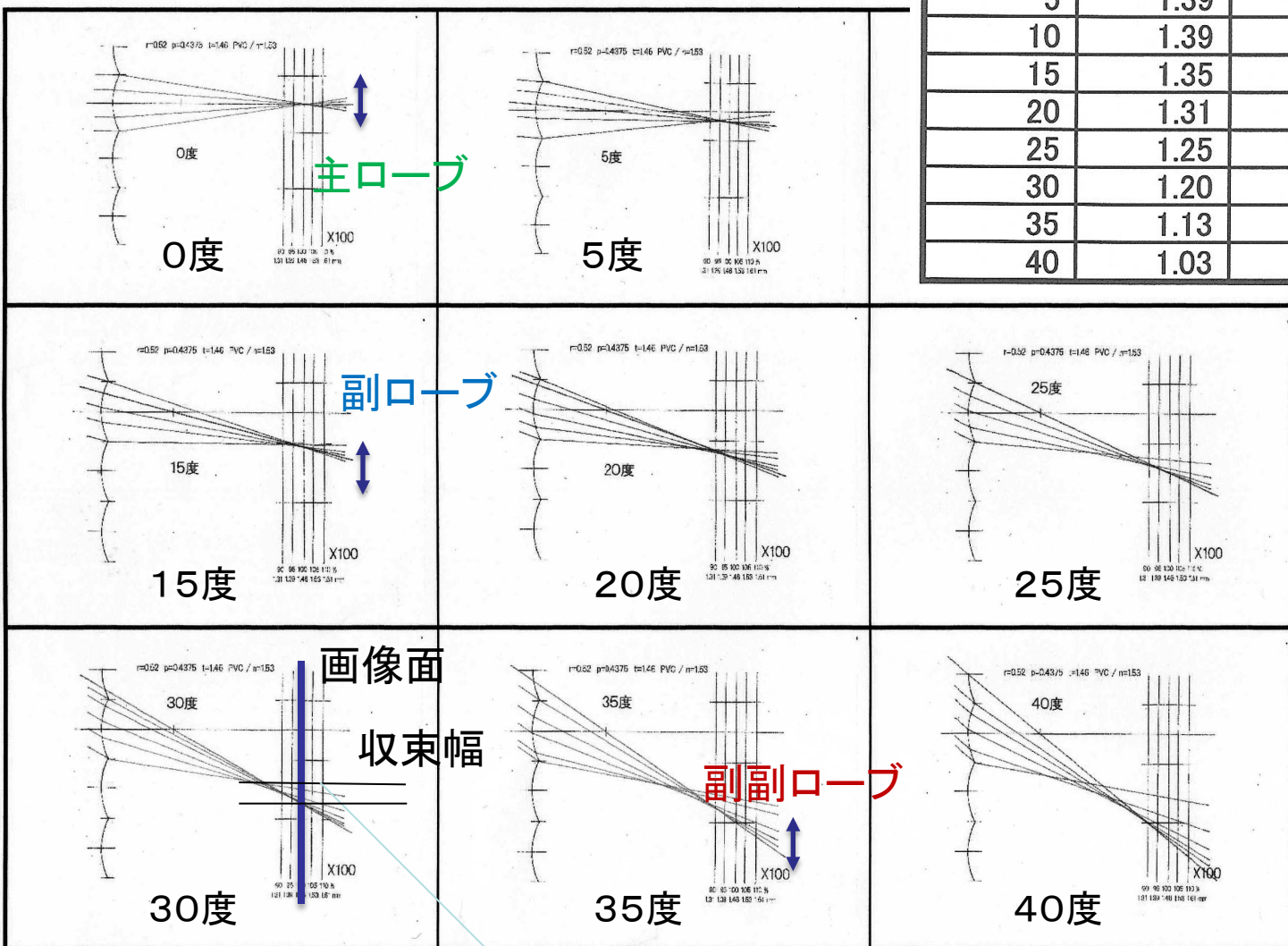
収束像の幅を計算



試料
レンチキュラー形状: $r = 0.52$ 、 $p = 0.4375$ 、 $t = 1.46$ mm
L3D製品: 百合の花 (265 × 340 mm)

左右方向から立体視 球面収差

入射角度	焦点 mm	収束幅 μ m
0	1.46	10
5	1.39	17
10	1.39	28
15	1.35	40
20	1.31	60
25	1.25	80
30	1.20	110
35	1.13	161
40	1.03	250



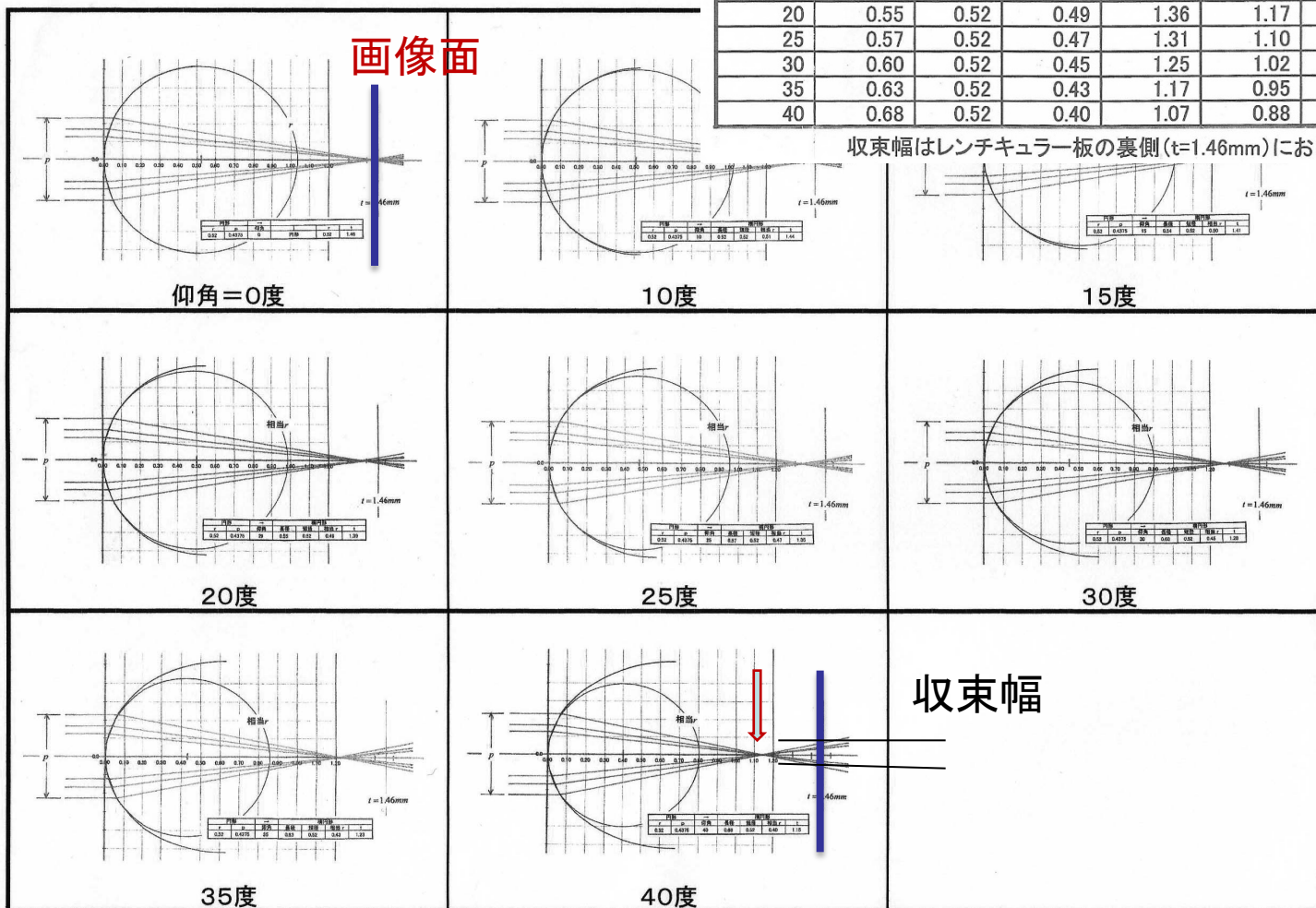
上下方向から立体視 楕円形

L形状:	r	p	t
	0.52	0.4375	1.46

PVC
1.53

仰角 θ	長径 a	短径 b	相当 r	t		収束幅 μm
				大越式	実測値	
0	円	形	0.52	1.46		10
10	0.53	0.52	0.51	1.43	1.31	16
15	0.54	0.52	0.50	1.40	1.24	19
20	0.55	0.52	0.49	1.36	1.17	23
25	0.57	0.52	0.47	1.31	1.10	27
30	0.60	0.52	0.45	1.25	1.02	32
35	0.63	0.52	0.43	1.17	0.95	40
40	0.68	0.52	0.40	1.07	0.88	49

収束幅はレンチキュラー板の裏側 ($t=1.46mm$) における値

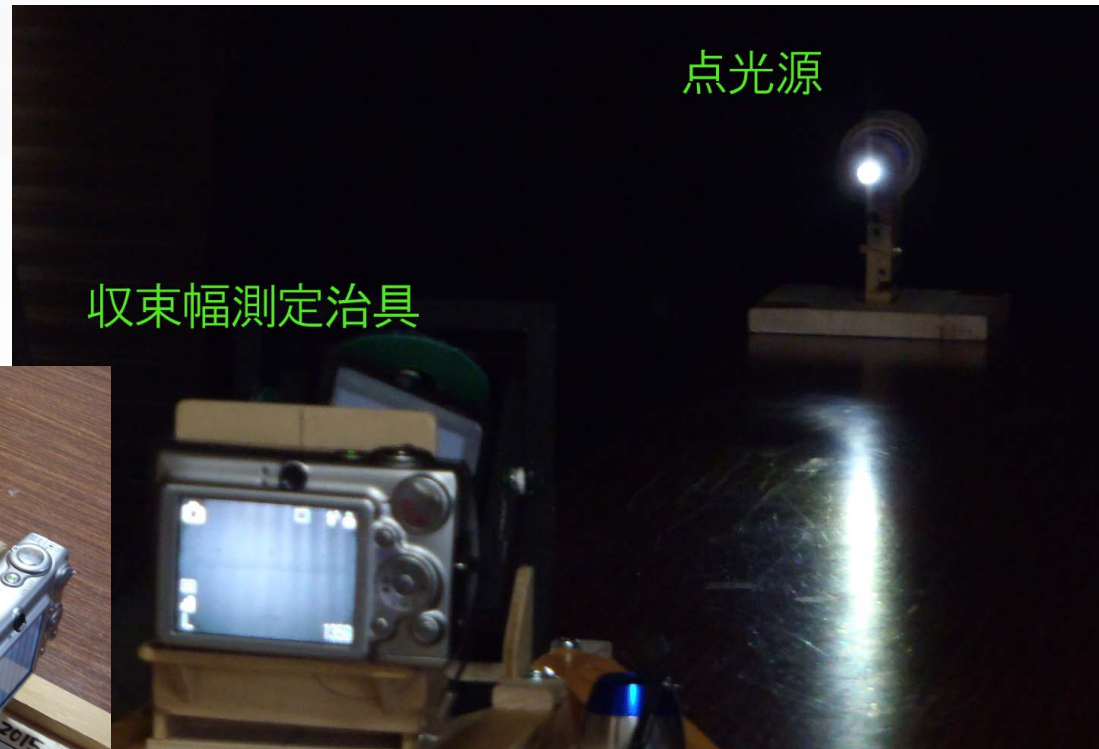


収束幅

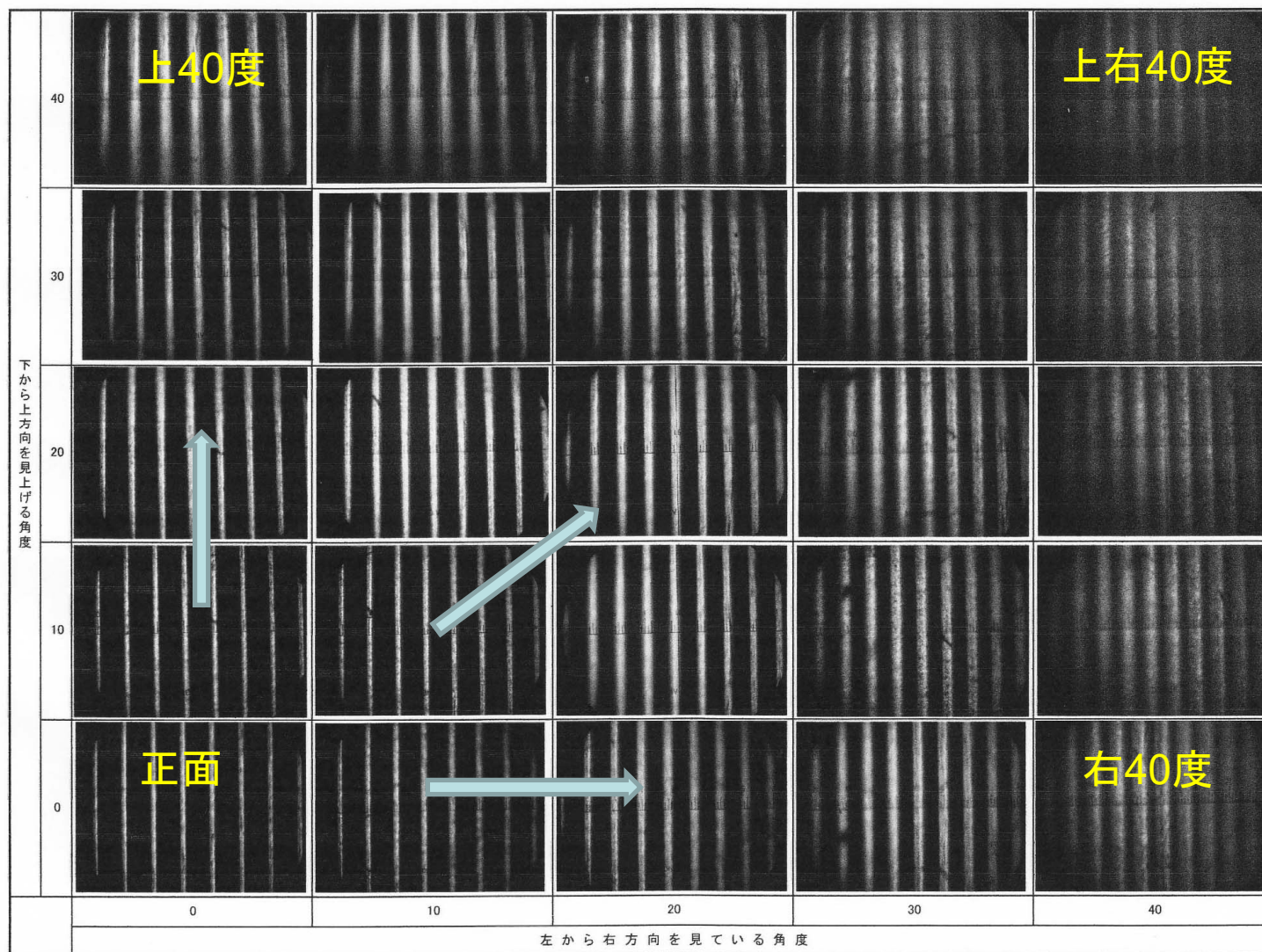
検証(Ⅱ)

収束像の幅を測定

上下左右から立体視
収束像の撮影



検証(Ⅱ)／収束像の幅



検証(Ⅲ)

上下左右から立体視 画像による評価／画質 立体感



試料:L3D製品「百合の花」

レンチキュラー形状:

$$r = 0.52 \quad p = 0.4375 \quad t = 1.46$$

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

デジタルカメラ: Olympus TG-610
最望遠で撮影

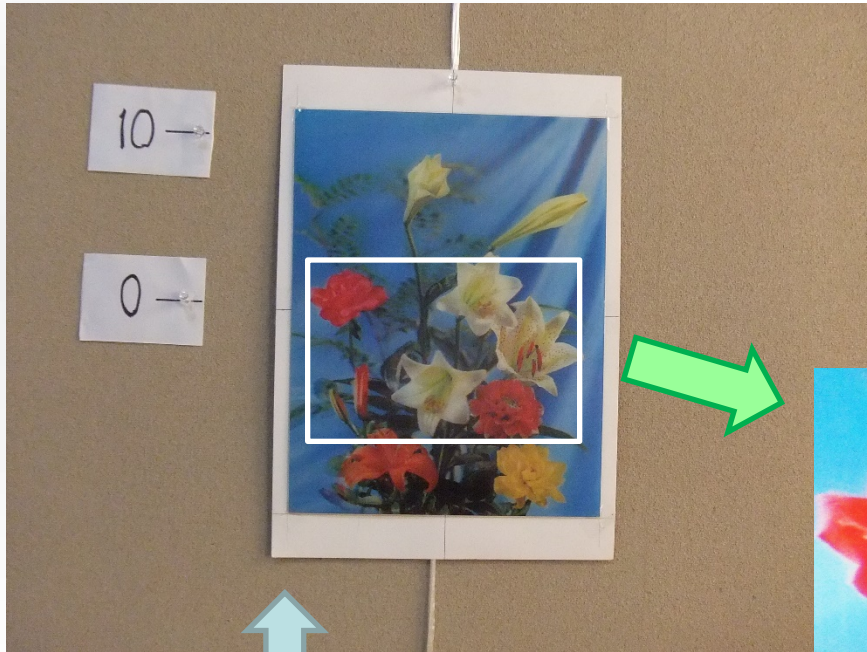
ステレオ・デジタルカメラ:

FUJIFILM FinePix Real 3D W1

眼間距離: 77mm



検証(Ⅲ)／画像による評価



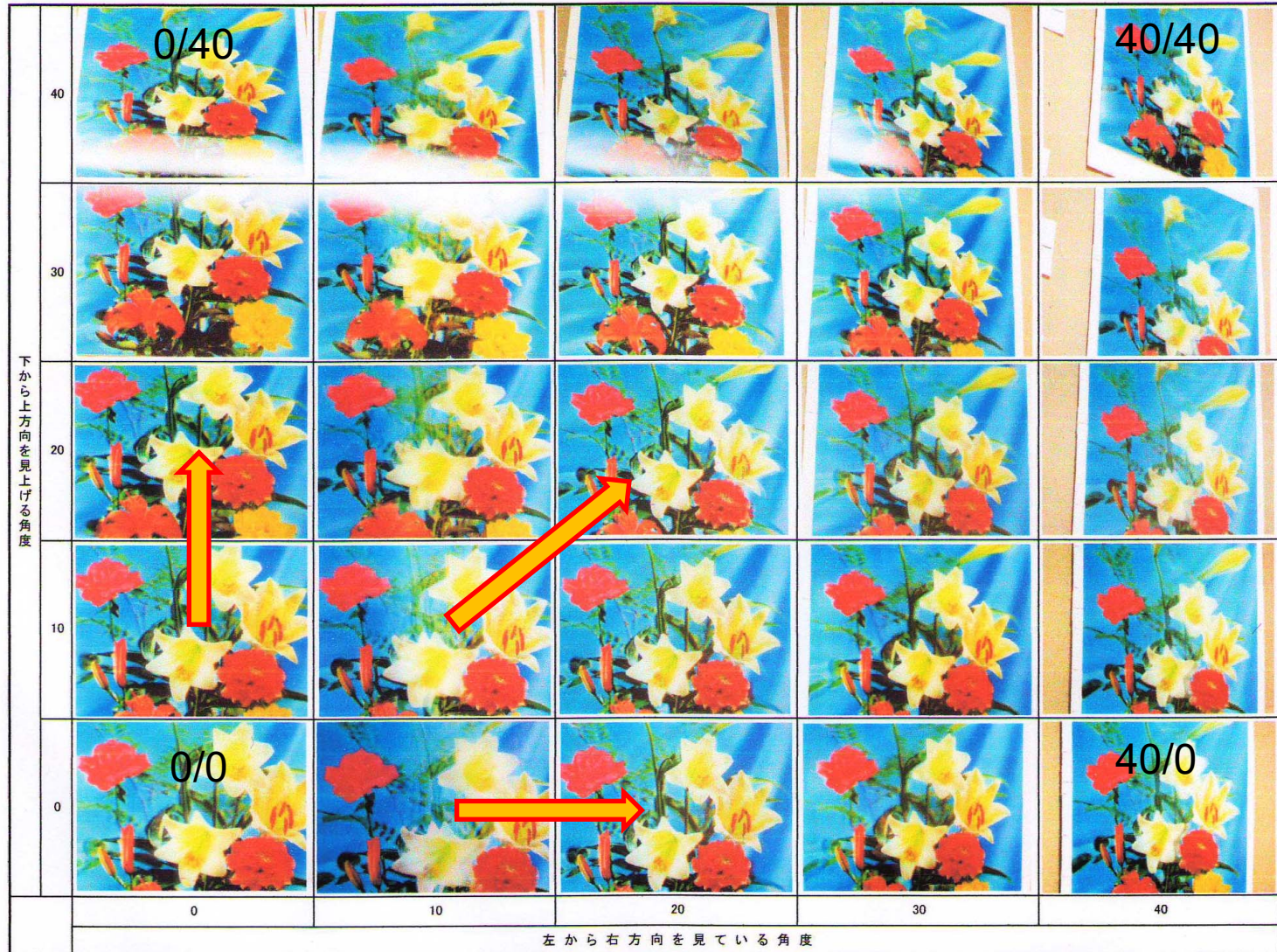
画質を評価するために、中央部を拡大している
0/0 から 40/40 まで画素数を一定にして、同じ画像を拡大



撮影された画像は壁面を含めて
広く映っている。

検証(Ⅲ)

画像による評価／L3D製品「百合の花」



検証(Ⅲ)

立体画像による評価／L3D製品「百合の花」 ステレオビューによる立体視

市販のステレオビュー:

TAKARATOMY社製
3D ShotCam Viewer



ステレオカメラで撮影した
左右2眼の画像

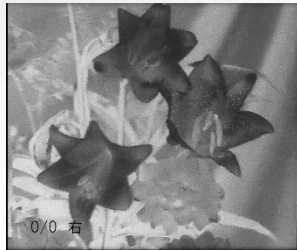
ビューに合わせてプリントされ
たステレオ画像

<付録>

検証(Ⅲ)

2眼立体画像による評価／L3D製品「百合の花」 視差の測定

左画像(カラー)



右画像(反転OHP)

視差



0/0 画像: 視差=約6mm 画質: シャープ
40/40 画像: 視差=約3mm 画質: シャープさが落ちる

考察と結論

検証(1)

スネルの法則: 収束幅を計算

左右方向から観る: 球面収差 $0 - 40^\circ$ $10 - 250 \mu\text{m}$

上下方向から観る: 楕円形 $0 - 40^\circ$ $10 - 49$

観る角度が大きくなると収束幅が非常に大きくなり、
画像がボケルと思われる。

検証(2)

収束幅を**実測**: 検証(1)を裏付けている

検証(3)

L3D製品を観て、画質、および立体感を評価

- ① 観る角度が大きくなっても画質、および立体感は存在する。
ステレオピュアで確認できる
視差をプリント画像から測定できる
- ② 観る角度が大きくなると、両者とも劣化するが、立体視できる。

サンプリング効果



レンチキュラー方式3Dディスプレイ
観察位置における画質を検証する

ありがとうございました

