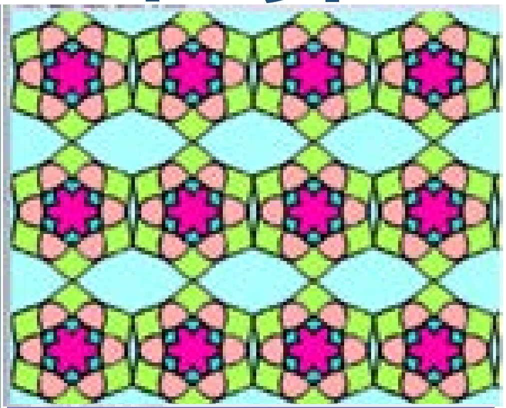
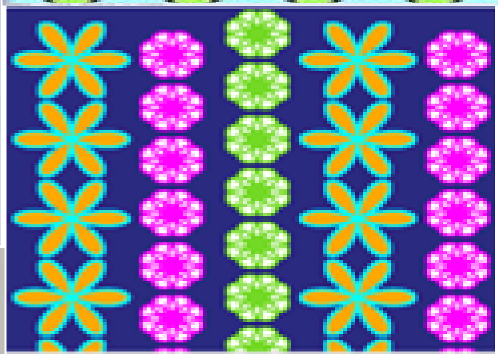
湾曲化の世界

大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎
数理科学研究部
２年　武地瑠紀　木山実優
阪根千晶　中橋万里乃

☆ 目 次 ☆

1. 湾曲化

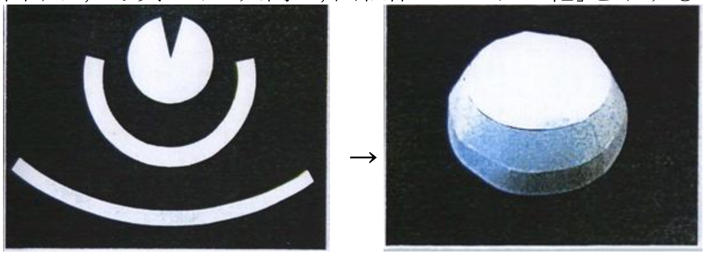
日常生活では,物を引き伸ばしたり 押し潰したり 或いは円形に曲げたり(即ち,湾曲化したり)といったことを結構よく行い,前者２つについては 学校の授業においてそれ等を数理的に扱ったりもします。しかし「湾曲化」という行為(事象)は,あまり数理の対象とはされていないのではないでしょうか?! 少なくとも,私たちにとっては「湾曲化」を数学やコンピュータと関連付けて扱ったのは今回が初めてでした。

“日常生活における「湾曲化」”の目的や効果は色々であり,それ等のうちの幾つかはコンピュータを使って行うとより効果が得られる物であったり,また世の中には“数学やコンピュータを使っての「湾曲化」でしか達成できない何か”も存在しているのでは?!と私たちは考えました。

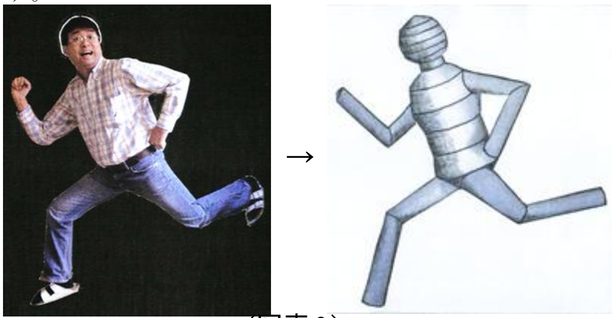
『「湾曲化」という事象を数学化しコンピュータ化することで問題解決を行う』…これが私たちの今回のテーマであり,実際には“「湾曲化」を使ってのモノ創り”を試みました。

2－1. 人形の制作

長方形の帯を巧く湾曲化したもの(扇形)を幾つもつなぎ合わせると,球や壺のような所謂“回転体”を作ることができます。<写真1>に一例を示します。このことを基に,動物を回転体にモデル化し それを制作するにはどのような扇形がどれだけ必要かを計算し,それ等(扇形)を作画して切りつなぎ 対象とした動物の人形を作ることを試みました。因みに,<写真2>は「人間の,回転体へのモデル化」を示すものです。



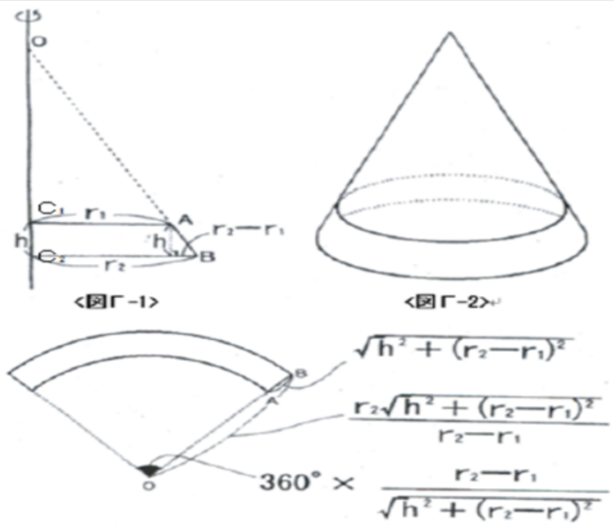
〈写真1〉



〈写真2〉

以下に,展開図(扇形)の解析を示します。

公式☆



<図Γ-1>　<図Γ-2>　<図Γ-3>

<図Γ-1>の線分ABを軸の周りに360°回転させて得られる円錐台を<図Γ-2>の下部とするとき,これを展開して得られる扇形の各部分の大きさは,<図Γ-3>に示される値(式)となる.

証明) $\theta = 360^\circ \times \dfrac{r_1}{OA}$ --------①

であり,<図Γ-1>の2つの直角三角形△れ△OAC_2は相似であるから,
$OC_1:OC_2 = r_1:r_2$で,また$OC_2 = OC_1 + h$であるから,$OC_1:(OC_1+h) = r_1:r_2$ となり
これを変形してをOC_1を求めると,

$OC_1 = \dfrac{hr_1}{r_2 - r_1}$ --------②

一方,△OAC_1に三平方の定理を適用して,
$OA^2 = AC_1^2 + OC_1^2$．これに②を代入する等し，$OA^2 = r_1^2 + \dfrac{h^2 r_1^2}{(r_2 - r_1)^2} = \cdots$

$= \dfrac{r_1^2\{(r_2 - r_1)^2 + h^2\}}{(r_2 - r_1)^2}$．これより，

$OA = \dfrac{r_1\sqrt{(r_2 - r_1)^2 + h^2}}{r_2 - r_1}$ --------③

$OB = OA \times \dfrac{r_2}{r_1}$ であり,これに③を代入して

$OB = \dfrac{r_2\sqrt{(r_2 - r_1)^2 + h^2}}{r_2 - r_1}$ --------④

なお,③を①に代入して，

$\theta = 360^\circ \times \dfrac{r_2 - r_1}{\sqrt{(r_2 - r_1)^2 + h^2}}$ -----⑤

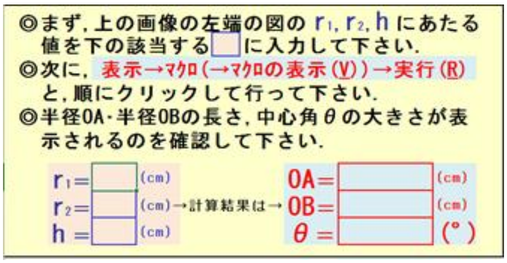
③,④,⑤は,即ち 公式☆である.

最初は「公式☆と電卓とで展開図を描き人形を作る」という方法を考えましたが,「計算はコンピュータにさせ展開図作りとその組み立ての部分を人間が行う」という方法とることにしました。

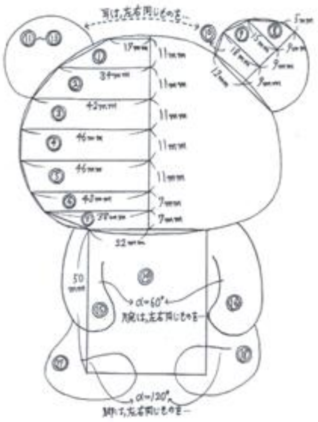
<写真 3-1>は表計算ソフトで作ったプログラム,<写真 3-2>はその実行結果です。このプログラムに計算をさせ,<図Γ-4>の設計図を基に制作した人形が<図Γ-5>です。

```
Sub 公式☆入り計算機()
r1 = Cells(19, 3): r2 = Cells(20, 3): h = Cells(21, 3)
If r1 = r2 Then Cells(19, 9) = " この場合,展開図は": Cells(20, 9) = "扇形にはなりません."
If r1 = r2 Then Cells(21, 9) = " (長方形となります.)": End
If r1 > r2 Then r = r1: r1 = r2: r2 = r
oa = r1 * Sqr((r2 - r1) ^ 2 + h ^ 2) / (r2 - r1)
ob = r2 * Sqr((r2 - r1) ^ 2 + h ^ 2) / (r2 - r1)
th = 360 * (r2 - r1) / Sqr((r2 - r1) ^ 2 + h ^ 2)
Cells(19, 9) = oa: Cells(20, 9) = ob: Cells(21, 9) = th
End Sub
```

<写真 3-1>



<写真 3-2>



<図Γ-4>

<図Γ-5>

2-2. 文様の制作

私たちは文様を花柄にしたいと思い,湾曲化公式を作ることにしました。湾曲化公式とは,ある図形を円に沿って曲げる公式と私たちは定義しています。例えば,絶対値付きのsinカーブを湾曲化公式で曲げると花を作ることができるのであり,3つの湾曲化公式を考えました。

湾曲化公式1

$$x'=y\times\cos\left(\frac{180^\circ\times x}{L}-90^\circ\right) \qquad y'=-y\times\sin\left(\frac{180^\circ\times x}{L}-90^\circ\right)$$

但し,L は湾曲化させたい図形の横幅の半分

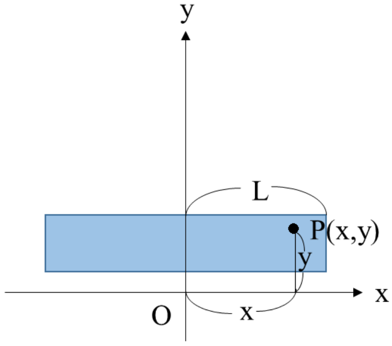
説明)

今,湾曲化により<図 1-1>の点 P(x,y)が<図 1-2>の点 P' (x',y')に移ったとする。

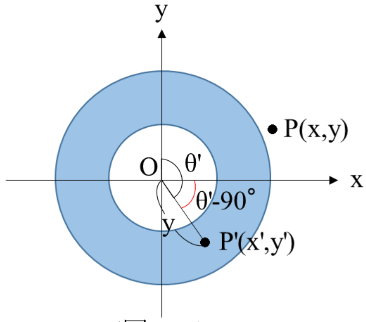
$$\begin{cases} x'=y\times\cos(\theta'-90^\circ) \\ y'=-y\times\sin(\theta'-90^\circ) \end{cases} \quad ...①$$

$$\theta'=\frac{180^\circ\times x}{L} \quad ...②$$

①に②を代入し,湾曲化公式1が得られる。



<図 1-1>



<図 1-2>

湾曲化公式$\boxed{2}$

$$x'=y\cos(450°-360°\times\frac{x}{L}) \qquad y'=y\sin(450°-360°\times\frac{x}{L})$$

但し,L は湾曲化させたい図形の横幅

証明)

今, 湾曲化により<図 2−1>の点 P(x,y)が<図 2−2>の点 P' (x',y')に移ったとする。

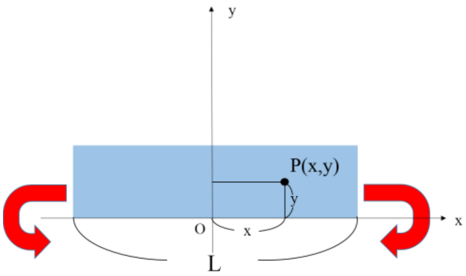
$x'=y\cos\theta'$ …① $\qquad$ $y'=y\sin\theta'$ …②

$\theta'=360°-\theta+90° =450°-\theta$ …③

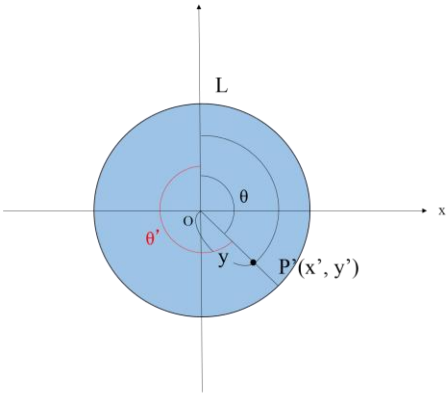
$\theta=360°\times\frac{x}{L}$

これを③に代入すると $450°-360°\times\frac{x}{L}$ …③'

①'を①,②に代入することで$\boxed{2}$が得られる。



<図 2−1>



<図 2−2>

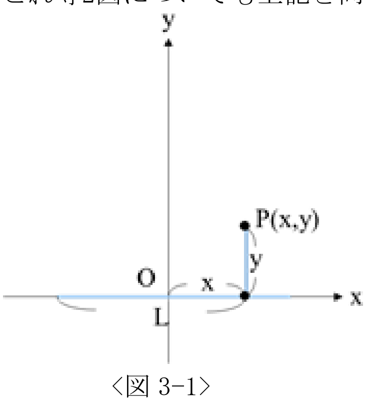
湾曲化公式$\boxed{3}$

$$x'=\{(y-3)+\frac{L}{2\pi}\}\cos(360°\times\frac{x}{L}-90°) \qquad y'=-\{(y-3)+\frac{L}{2\pi})\}\sin(360°\times\frac{x}{L}-90°)$$

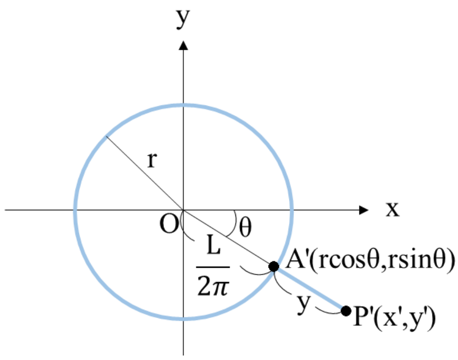
但し,L は湾曲化させたい図形の横幅

証明)

今, 湾曲化により<図 3−1>の点 P(x,y)が<図 3−2>の点 P' (x',y')に移ったとする。
これ等2図についても上記と同様の解析を行い,$\boxed{3}$を得る。

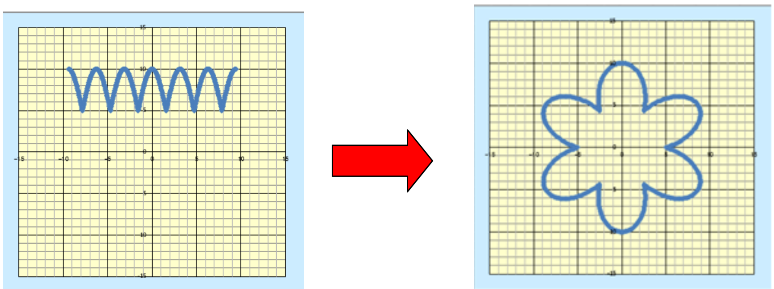


<図 3−1>



<図 3−2>

<図 4>は, 公式$\boxed{1}$, $\boxed{2}$, $\boxed{3}$により曲線$\begin{cases} x=t \\ y=5|\cos t|+5 \end{cases}$を湾曲化したところを示すものです。湾曲化は, 表計算ソフトで下欄のようなプログラムを作り行いました。



〈図 4〉

```
Sub 媒介変数表示で図を描く()
n = 2: d = 3.14159 / 180
For m = 3 To 1082: For l = 1 To 3: Cells(m, l) = "": Next l: Next m

For t = -540 * d To 540 * d Step 2 * d

   x = t
   y = 5 * Abs(Cos(t)) + 5
   x1 = y * Cos(450 * d - 360 * d * x / (3.14 * 6))
   y1 = y * Sin(450 * d - 360 * d * x / (3.14 * 6))

n = n + 1: Cells(n, 1) = t / d: Cells(n, 2) = x1: Cells(n, 3) = y1
Next t

End Sub
```

〈公式$\boxed{1}$を用いたプログラム〉

```
Sub 媒介変数表示で図を描く()
n = 2: d = 3.14159 / 180
For m = 3 To 1082: For l = 1 To 3: Cells(m, l) = "": Next l: Next m

For t = -540 * d To 540 * d Step 2 * d

   x = t
   y = 5 * Abs(cos(t)) + 5
   x1 = ((y - 3) + 3.14 * 6 / (2 * 3.14)) * cos(360 * d * x / (3.14 * 6) - 90 * d)
   y1 = -((y - 3) + 3.14 * 6 / (2 * 3.14)) * sin(360 * d * x / (3.14 * 6) - 90 * d)


n = n + 1: Cells(n, 1) = t / d: Cells(n, 2) = x1: Cells(n, 3) = y1
Next t

End Sub
```

〈公式$\boxed{2}$を用いたプログラム〉

```
Sub 媒介変数表示で図を描く()
n = 2: d = 3.14159 / 180
For m = 3 To 1082: For l = 1 To 3: Cells(m, l) = "": Next l: Next m

For t = -540 * d To 540 * d Step 2 * d

   x = t
   y = 5 * Abs(Cos(t)) + 5
   x1 = y * Cos(180 * d * x / (3.14 * 3) - 90 * d)
   y1 = y * Sin(180 * d * x / (3.14 * 3) - 90 * d)

n = n + 1: Cells(n, 1) = t / d: Cells(n, 2) = x1: Cells(n, 3) = y1
Next t

End Sub
```

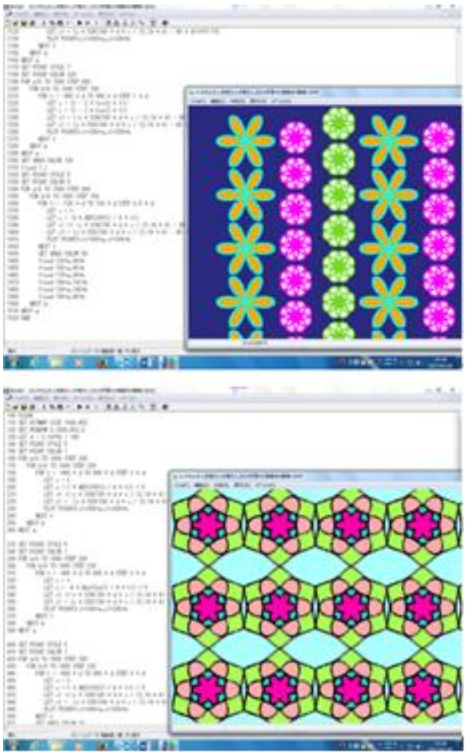
〈公式$\boxed{3}$を用いたプログラム〉

2 - 3. 文様入りの壺の制作

2-1,2-2章で扱った内容を踏まえ,文様の付いた壺を制作しました。
作り方は以下の通りです。

① 十進BASIC言語と前章(第2-2章)の湾曲化公式($\boxed{1}$,$\boxed{2}$,$\boxed{3}$のいずれか)とを使って,千代紙を制作。
② 前々章(第2-1章)の公式☆を使って,壺の展開図を千代紙に描く。
③ 展開図を組み立て,文様入り壺の完成。

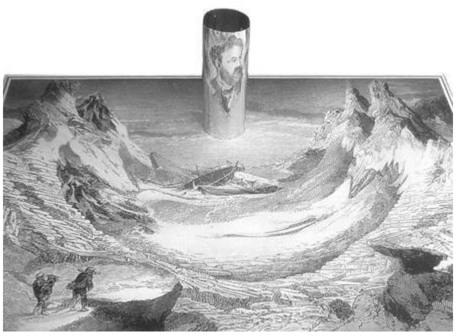
結果は次の通りです。



〈①の結果〉

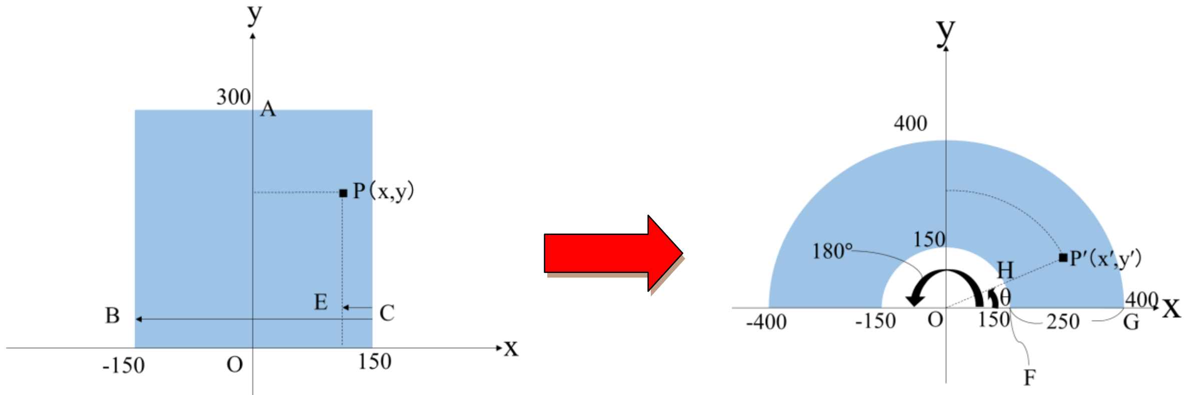
〈③の結果〉

3 - 1. 円柱鏡式歪み絵の制作(その1)



騙し絵の中には,上の写真のように「歪んだ絵の上に円柱鏡を置くと,そこに原画が写し出されるタイプのもの」があります。私たちは,このタイプの騙し絵を「円柱鏡式歪み絵」と呼ぶことにし,これをコンピュータを使って製作してみました。まず,変換式を作りました。次の通りです。

湾曲化公式



左図の長方形をx軸方向に引き伸ばし,半円形に湾曲化したものを右図とする。
湾曲化した後P(x,y)がP′(x′,y′)に変換されたとすると,

$x' = OP'\cos\theta$…①　$y' = OP'\sin\theta$…②と表せる

$OP' = OH + HP' = 150 + HP'$…

また,OA：y＝FG：xより

$300 : y = 250 : HP'$

$250y = 300HP'$

$HP' = \frac{5}{6}y$…④

さらに,180°：θ＝CB：CE＝300：(150-x)

$\theta = \frac{150-x}{300} \times 180° = \frac{3}{5}(150-x)°$…⑤

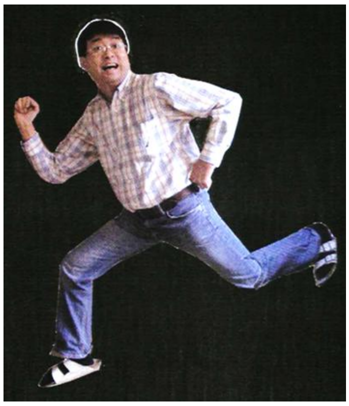
③に④を代入して,$OP' = 150 + \frac{5}{6}y$…⑥

$$
* \begin{cases} x' = \left(150 + \frac{5}{6}y\right)\cos\frac{3}{5}(150-x)° \\ y' = \left(150 + \frac{5}{6}y\right)\sin\frac{3}{5}(150-x)° \end{cases}
$$

次に、得られた変換式＊と十進BASIC言語とで,円柱鏡式歪み絵を出力してみました。プログラムと出力結果は,次の通りです。

```
1010 CLEAR
1020 DIM c$(0 TO 5)
1030 DIM cc(0 TO 5)
1040 LET d=3.14159/180
1050 gload"F:大石先生.bmp"
1060 SET BITMAP SIZE 800,400
1070 SET WINDOW -400,400,0,400
1080 INPUT hidari
1090 INPUT migi
1100 INPUT ue
1110 INPUT shita
1120 FOR y=0 TO 300 STEP 0.2
1130    FOR x=-150 TO 150 STEP 0.2
1140       SET COLOR MODE "NATIVE"
1150       LET xx=x*(migi-hidari)/300+(hidari+migi)/2
1160       LET yy=y*(ue-shita)/300+shita
1170       ASK PIXEL VALUE(xx,yy) c
1180       LET c1=c+16^6
1190       LET c1$=BSTR$(c1,16)
1200       LET b5$=mid$(c1$,2,1)
1210       LET b4$=mid$(c1$,3,1)
1220       LET g3$=mid$(c1$,4,1)
1230       LET g2$=mid$(c1$,5,1)
1240       LET r1$=mid$(c1$,6,1)
1250       LET r0$=mid$(c1$,7,1)
1260       LET c$(5)=b5$
1270       LET c$(4)=b4$
1280       LET c$(3)=g3$
1290       LET c$(2)=g2$
1300       LET c$(1)=r1$
1310       LET c$(0)=r0$
1320       FOR m=5 TO 0 STEP -1
1330          IF c$(m)="A" THEN LET c$(m)="10"
1340          IF c$(m)="B" THEN LET c$(m)="11"
1350          IF c$(m)="C" THEN LET c$(m)="12"
1360          IF c$(m)="D" THEN LET c$(m)="13"
1370          IF c$(m)="E" THEN LET c$(m)="14"
1380          IF c$(m)="F" THEN LET c$(m)="15"
1390       NEXT m
1400       FOR n=5 TO 0 STEP -1
1410          LET cc(n)=VAL(c$(n))
1420       NEXT n
1430       LET b=(16^1*cc(5)+16^0*cc(4))/256
1440       LET g=(16^1*cc(3)+16^0*cc(2))/256
1450       LET r=(16^1*cc(1)+16^0*cc(0))/256
1460       SET COLOR mode "REGULAR"
1470       SET COLOR MIX(255) r,g,b
1480       SET AREA COLOR 255
1490       LET x1=-(150+5/6*y)*COS(3/5*(150-x)*d)
1500       LET y1=(150+5/6*y)*SIN(3/5*(150-x)*d)
1510       DRAW disk WITH SCALE(1)*SHIFT(x1,y1)
1520    NEXT x
1530 NEXT y
1540 END
```

〈プログラム[制作者：中橋万里乃]〉



〈原画［大石先生]〉

〈プログラムの実行結果〉→

３−２．有用な変換式

前章(第3-1章)までの研究で気付いた事を書いておきます。

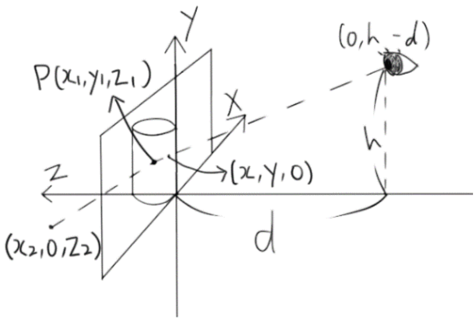
$$
\begin{cases}
x' = (y\text{の1次式})\cos[x\text{の1次式}] \\
y' = (y\text{の1次式})\sin[x\text{の1次式}]
\end{cases}
$$

結局のところ,モノを円に沿って湾曲化させる変換を実現する式は上記の2式であり,(……)[……]内の1次式の係数・定数項の値を上手く調整すれば,それが実現されるのだということに気付きました。

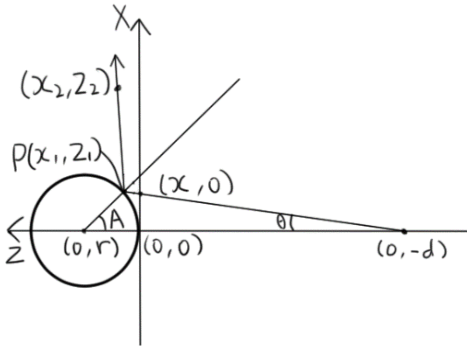
３−３．円柱鏡式歪み絵の制作（その２）

ここでは,「光の反射においては,入射角と反射角の大きさが等しい」という性質を使って湾曲化を行ってみたいと思います。

この解析では空間ベクトルを用いる為,円柱鏡と視点の座標を設定する。円柱鏡は,片方の底面がxz平面に重なり,その中心をz軸が通り,側面がy軸に接しているものとし,円柱鏡上の全ての点においてy≧0,z≧0とする。視点の座標はx=0,y≧0,z≦0とし,(0,h,−d)と表す。視点から出た光がxy平面と交わる点を(x,y,0),円柱鏡に当たる点をP(x1,y1,z1)とし,Pで反射してxz平面と交わる点をQ(x2,0,z2)とする。(図1)



(図1)



(図2)

ここからはy座標を無視し,xz平面における座標を考える。円柱鏡の半径をrとする。また,原点,底面の中心,点Pからなる角度を弧度法を用いてAとし,点P,視点,原点からなる角度を弧度法を用いてθとする。(図2)

A≧0, θ≧0として,三角関数を用いてθをAで表すと,

$$\cos\theta = \frac{r - r\cos A + d}{\sqrt{r^2\sin^2\theta + (r - r\cos A + d)^2}} \qquad \sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} \qquad \tan\theta = -\frac{\cos\theta\cos 2A - \sin\theta\sin 2A}{\sin\theta\cos 2A + \sin 2A\cos\theta}$$

となる。

これらの式によって,

$$\mathrm{x} = \frac{d\sin\theta}{\cos\theta},\quad x_1 = r\sin A,\quad z_1 = r - r\cos A,\quad \mathrm{y} = \mathrm{h} - \frac{d(h - y_1)}{(d + z_1)}$$

$$x_2 = x_1 + \frac{y_1(d + z_1)}{(h - y_1)\sqrt{1 + \tan^2\theta}\cos\theta},\quad z_2 = (x_2 - x_1)\tan\theta + z_1$$

と表せるようになり,これによってAとy_1を定めるとx,y,x_2,z_2の値が導けるようになる。これらの式から導かれた値を用いて,プログラム上で全ての(x,y)の色指標を対応した(x_2,z_2)に描き換えてアナモルフォーシスを作る。また,x≦0にする場合,A,y_1の値はそのままにして,

$$\mathrm{x} = -\frac{\mathrm{d}\sin\theta}{\cos\theta},\quad x_1 = -r\sin A,\quad x_2 = x_1 - \frac{y_1(d + z_1)}{\sqrt{1 + \tan^2\theta}(h - y_1)\cos\theta},\quad z_2 = (x_1 - x_2)\tan\theta + z_1$$

とすることで,同じA,y_1の場合x≧0の点とz軸で対称な点になる。

以下は,プログラムです.

```
 1000 OPTION ARITHMETIC NATIVE
 1010 CLEAR
 1020 DIM c$(0 TO 5)
 1030 DIM cc(0 TO 5)
 1040 DIM x2(4000000)
 1050 DIM z2(4000000)
 1060 DIM r(4000000)
 1070 DIM g(4000000)
 1080 DIM b(4000000)
 1090 gload"F:まり男.bmp"
 1100 SET WINDOW -
500,500,0,652
 1110 LET dd=3.14159/180
 1120 LET d=4950
 1130 LET h=3300
 1140 LET rr=330
 1150 LET nn=0
 1160 FOR A=0.01*dd TO 90*dd
STEP 0.1*dd
 1170    LET CO=(rr-
rr*COS(A)+d)/SQR(rr^2*(SIN(A))
^2+(rr-rr*COS(A)+d)^2)
 1180    LET SI=SQR(1-CO^2)
 1190    IF
(INT(10000*SI+0.5))/10000>=rr/
(rr+d) THEN GOTO 1640
 1200    LET TA=-(CO*COS(2*A)-
SIN(2*A)*SI)/(SI*COS(2*A)+SIN(
2*A)*CO)
 1210    LET x=d*SI/CO
 1220    IF x>500 THEN GOTO
1640
 1230    LET x1=rr*SIN(A)
 1240    LET z1=rr-rr*COS(A)
 1250    FOR y1=0 TO 652 STEP
1
 1260       LET y=h-(d*(h-
y1)/(d+z1))
 1270       IF y>=652 THEN
GOTO 1620
 1280       LET nn=nn+1
 1290       SET COLOR MODE
"NATIVE"
 1300       ASK PIXEL
VALUE(x,y) c
 1310       LET c1=c+16^6
 1320       LET
c1$=BSTR$(c1,16)
 1330       LET
b5$=mid$(c1$,2,1)
 1340       LET
b4$=mid$(c1$,3,1)
 1350       LET
g3$=mid$(c1$,4,1)
 1360       LET
g2$=mid$(c1$,5,1)
 1370       LET
r1$=mid$(c1$,6,1)
 1380       LET
r0$=mid$(c1$,7,1)
 1390       LET c$(5)=b5$
 1400       LET c$(4)=b4$
 1410       LET c$(3)=g3$
 1420       LET c$(2)=g2$
 1430       LET c$(1)=r1$
 1440       LET c$(0)=r0$
 1450       FOR m=5 TO 0 STEP
-1
 1460          IF c$(m)="A"
THEN LET c$(m)="10"
 1470          IF c$(m)="B"
THEN LET c$(m)="11"
 1480          IF c$(m)="C"
THEN LET c$(m)="12"
 1490          IF c$(m)="D"
THEN LET c$(m)="13"
 1500          IF c$(m)="E"
THEN LET c$(m)="14"
 1510          IF c$(m)="F"
THEN LET c$(m)="15"
 1520       NEXT m
 1530       FOR n=5 TO 0 STEP
-1
 1540          LET
cc(n)=VAL(c$(n))
 1550       NEXT n
 1560       LET b(nn)=
 (16^1*cc(5)+16^0*cc(4))/256
 1570       LET g(nn)=
 (16^1*cc(3)+16^0*cc(2))/256
 1580       LET r(nn)=
 (16^1*cc(1)+16^0*cc(0))/256
 1590       SET COLOR mode
"REGULAR"
 1600       LET
x2(nn)=x1+((d+z1)/CO*y1/(h-
y1))/SQR(1+TA^2)
 1610       LET
z2(nn)=TA*(x2(nn)-x1)+z1
 1620    NEXT y1
 1630 NEXT A
 1640 FOR A=0.01*dd TO 90*dd
STEP 0.1*dd
 1650    LET CO=(rr-
rr*COS(A)+d)/SQR(rr^2*(SIN(A))
^2+(rr-rr*COS(A)+d)^2)
 1660    LET SI=SQR(1-CO^2)
 1670    IF
(INT(10000*SI+0.5))/10000>=rr/
(rr+d) THEN GOTO 2120
 1680    LET TA=-(CO*COS(2*A)-
SIN(2*A)*SI)/(SI*COS(2*A)+SIN(
2*A)*CO)
 1690    LET x=-d*SI/CO
 1700    IF x<-500 THEN GOTO
2120
 1710    LET x1=-rr*SIN(A)
 1720    LET z1=rr-rr*COS(A)
 1730    FOR y1=0 TO 652 STEP
1
 1740       LET y=h-(d*(h-
y1)/(d+z1))
 1750       IF y>=652 THEN
GOTO 2100
 1760       LET nn=nn+1
 1770       SET COLOR MODE
"NATIVE"
 1780       ASK PIXEL
VALUE(x,y) c
 1790       LET c1=c+16^6
 1800       LET
c1$=BSTR$(c1,16)
 1810       LET
b5$=mid$(c1$,2,1)
 1820       LET
b4$=mid$(c1$,3,1)
 1830       LET
g3$=mid$(c1$,4,1)
 1840       LET
g2$=mid$(c1$,5,1)
 1850       LET
r1$=mid$(c1$,6,1)
 1860       LET
r0$=mid$(c1$,7,1)
 1870       LET c$(5)=b5$
 1880       LET c$(4)=b4$
 1890       LET c$(3)=g3$
 1900       LET c$(2)=g2$
 1910       LET c$(1)=r1$
 1920       LET c$(0)=r0$
 1930       FOR m=5 TO 0 STEP
-1
 1940          IF c$(m)="A"
THEN LET c$(m)="10"
 1950          IF c$(m)="B"
THEN LET c$(m)="11"
 1960          IF c$(m)="C"
THEN LET c$(m)="12"
 1970          IF c$(m)="D"
THEN LET c$(m)="13"
 1980          IF c$(m)="E"
THEN LET c$(m)="14"
 1990          IF c$(m)="F"
THEN LET c$(m)="15"
 2000       NEXT m
 2010       FOR n=5 TO 0 STEP
-1
 2020          LET
cc(n)=VAL(c$(n))
 2030       NEXT n
 2040       LET b(nn)=
 (16^1*cc(5)+16^0*cc(4))/256
 2050       LET
g(nn)=(16^1*cc(3)+16^0*cc(2))/
256
 2060       LET r(nn)=
 (16^1*cc(1)+16^0*cc(0))/256
 2070       SET COLOR mode
"REGULAR"
 2080       LET x2(nn)=x1-
((d+z1)/CO*y1/(h-
y1))/SQR(1+TA^2)
 2090       LET z2(nn)=(x1-
x2(nn))*TA+z1
 2100    NEXT y1
 2110 NEXT A
 2120 CLEAR
 2130 FOR nn=1 TO 4000000 STEP
1
 2140    IF x2(nn)=0 THEN GOTO
2180
 2150    SET COLOR MIX(255)
r(nn),g(nn),b(nn)
 2160    SET AREA COLOR 255
 2170    DRAW disk WITH
SCALE(1)*SHIFT(-x2(nn)/165*32,
 (-z2(nn))/165*32+350)
 2180 NEXT nn
 2190 FOR th=0 TO 360 STEP 0.1
 2200    PLOT
POINTS:(60*COS(th*dd)) ,(60*SI
N(th*dd))+270
 2210 NEXT th
 2220 END
```

<実行結果>

（実行前（原画））

（実行後（円柱鏡式歪み絵））

（実行後（円柱鏡を置くと…））

4. 最後に

今回の研究を通して，私たちは数学やコンピュータに対する見方が変わったように思います。振り返ってみると，この研究でたくさんの事を学びました。

この研究の根幹ともいえる湾曲化公式を考えだすのには，途方もなく長い時間がかかりました。私たちは今までで学校で取り扱う受験数学しか学んだことがありませんでしたから，新たに公式を考え出すことにはすごく苦労させられました。私たちが知っている数学の知識のどれを使えば良いのか，コンピュータをどのようにして使えば良いのか。今思えば，その頃が一番研究の見通しがつかず，苦しい時でした。しかし，自分たちで編み出した数式をコンピュータに入力し，湾曲化された時はすごく感動しました。図形を曲げるという，普通に見たら何てことない動作も，数学的に計算したらこんなにも難しいのだなと痛感しました。

数学は特に，数式を見ただけで「難しそう」という感想を抱いてしまい，ほとんどの人は疎遠にしてしまいがちです。私たちもこの研究を始めたときはそのように思っていました。「数式を作ろう」というコンセプトには困惑しましたし，プログラミングという言葉を聞いただけで気が遠くなったこともあります。しかし，担当の先生から基本的な操作や研究の進め方を教えていただきながら研究を進めると，メンバーの中に特に数学が得意という人がいなかったにもかかわらず，意外と今までの薄い数学の知識だけで湾曲化公式を作ることができましたし，したことのないプログラミングを使って千代紙を作ることもできたのです。」」

今，世界中でコンピュータが使われ，仕事をする上でもコンピュータは欠くことのできない存在となっています。しかし，若い世代の中にはコンピュータをうまく使いこなせないと考え，スマートフォンのアプリなどに全部頼ってしまう人が多くいます。私たちもそのような若者の一人でした。でも，実際にこの研究を通して自分でコンピュータを操り，一つのモノを完成させることの楽しさを知り，考えたことが実現する達成感を知りました。現代社会のキーともいえるコンピュータを使ったこの研究を行えた事はとても良い機会だったと思います。

【参考･引用文献】

『遊びの博物誌１』坂根厳夫，朝日文庫，1985.5.20，pp.122-123
『ANAMORPHIC ART』Jurgis Baltrusaitis，CHADWYCK-HEALEY LTD，1977.