

円周から形を作る

日本数学会市民講演会
2006年3月25日
東京大学 坪井 尊

標題にある市民講演会を行いました。数学通信の記事として、講演会で資料として配ったものを少しだけ修正して掲載していただけることになりました。市民講演会に参加した気分で読んでいただければ幸いです。このときの講演のビデオは、数学会のウェブページ <http://www.math.or.jp/videos/> からリンクされています。

この講演を始めるにあたって、初めてコンパスで円を描いたときのことを思い出していただきたい。昔懐かしい黒板のコンパスを持っていないのが残念である。

1. コンパスで円を描く

講演では、KSEG というソフトウェアでたくさんの円を書いてみた。KSEG についての情報は次のページにある。

<http://geom.math.metro-u.ac.jp/wiki/index.php?KSEG>

私が今回の講演をすることを知った東京大学の麻生和彦さんに勧められたもので、使ってみると少なくとも前半の目的にはぴったりだったということがわかった。

さて、円を書いたコンパスで円を分割すると円は6個に分かれる。このことから、

・グロタンディエク(1928ー)

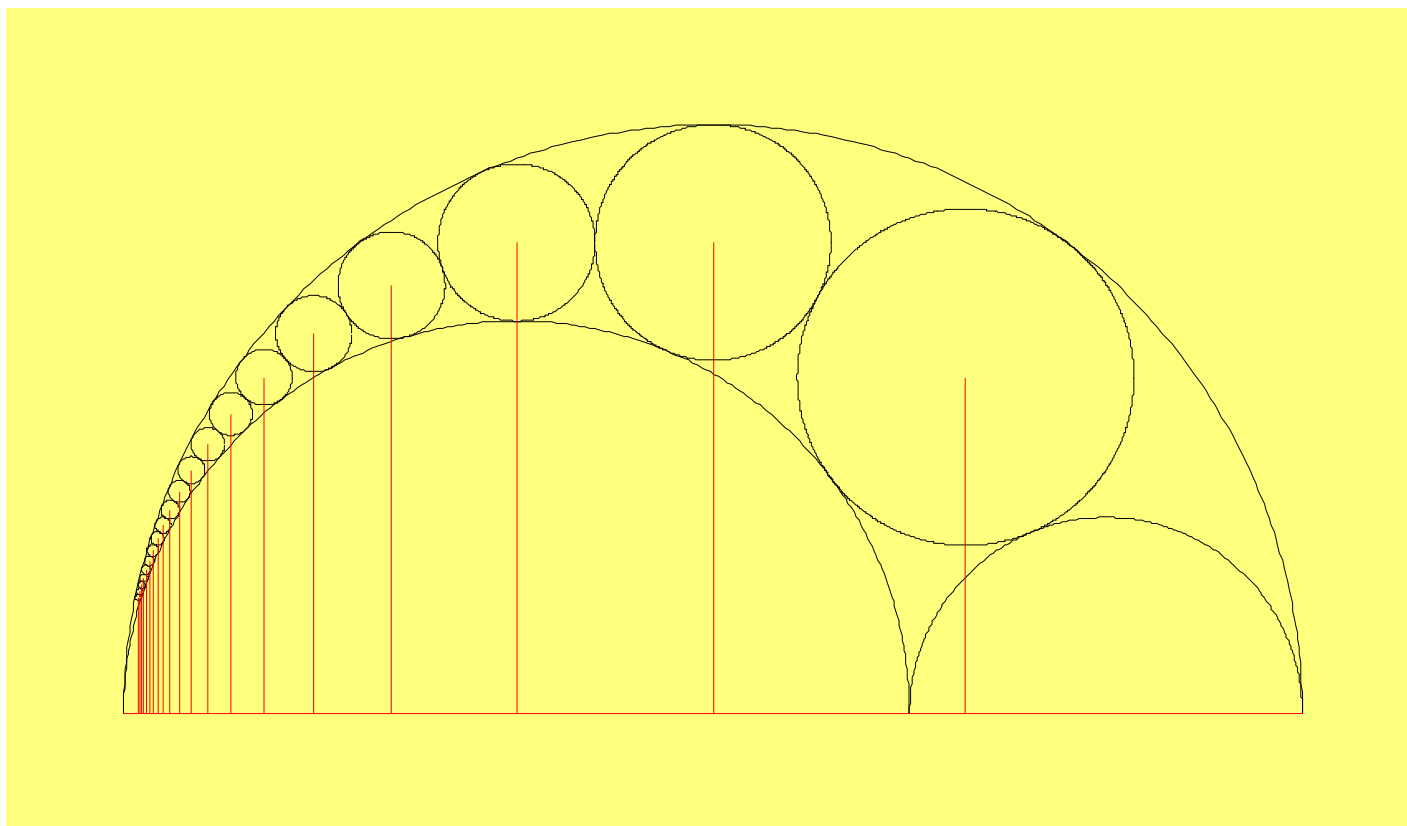
は、円周率は3であると思ったとの逸話がある。

同じ大きさの円による平面のパッキングを作図することができるが、さらにその隙間に、円を埋め込むことも考えられる。このような隙間に円を埋め込む問題は、古くから考えられていた。何人かの名前を挙げよう。

・アポロニウス(262BCー190BC)

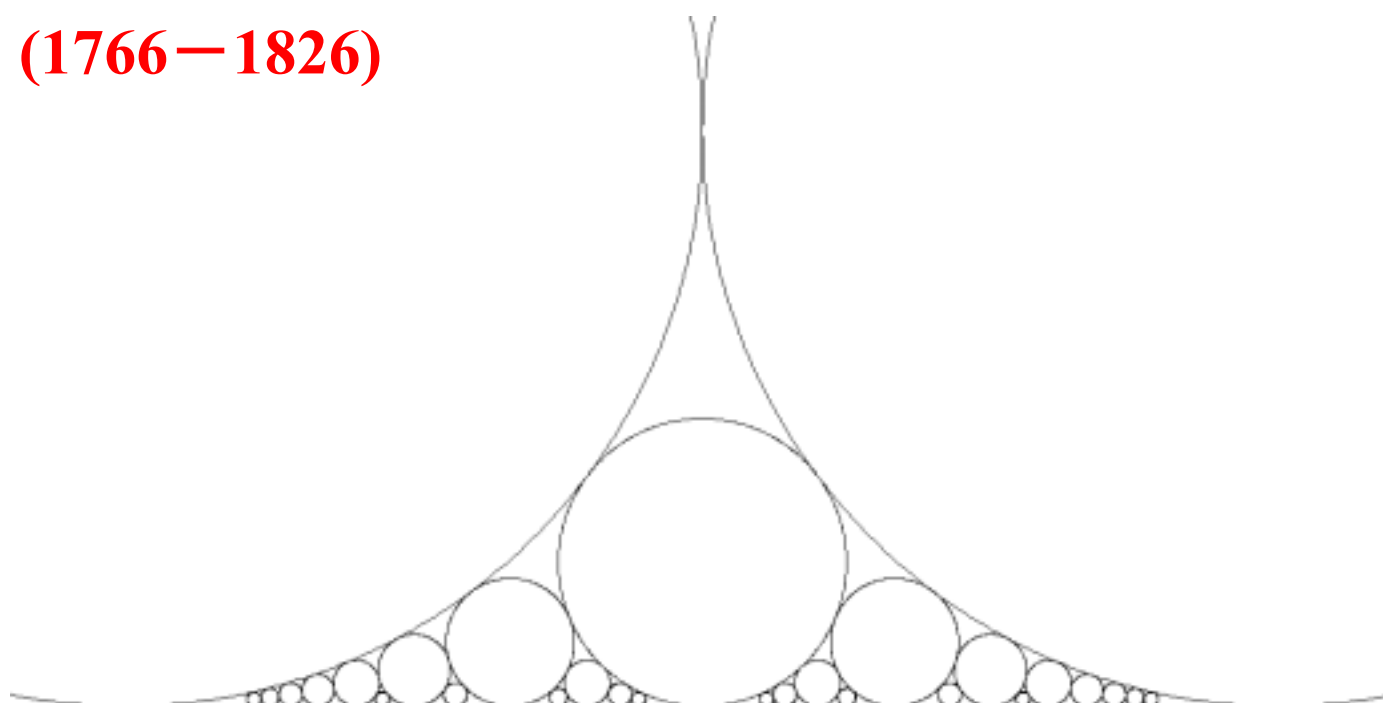
- ・アポロニウスの円（2点からの距離の比が一定の点の軌跡）が良く知られている。
- ・3つの円に接する円を描く問題を考えている。
(・講演では触れないが円錐曲線論が有名である)。

・パップス (290AD-350AD)



縦線は、半径の2倍、4倍、6倍、8倍、... となる。

・ファレイ (1766-1826)



0	1	1	2	1	3	2	3	1	4	3	5	2	5	3	4	1
1	5	4	7	3	8	5	7	2	7	5	8	3	7	4	5	1

$m_1n_2 - m_2n_1 = \pm 1, n_1 > 0, n_2 > 0$ のとき、
 $(\frac{m_1}{n_1}, \frac{1}{2n_1^2})$ を中心とする半径 $\frac{1}{2n_1^2}$ の円と、
 $(\frac{m_2}{n_2}, \frac{1}{2n_2^2})$ を中心とする半径 $\frac{1}{2n_2^2}$ の円は接する。

・デカルト(1596-1650)

デカルトの4円定理 2つずつ接する4つの円の半径について、

$$\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{r_3^2} + \frac{1}{r_4^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)^2$$

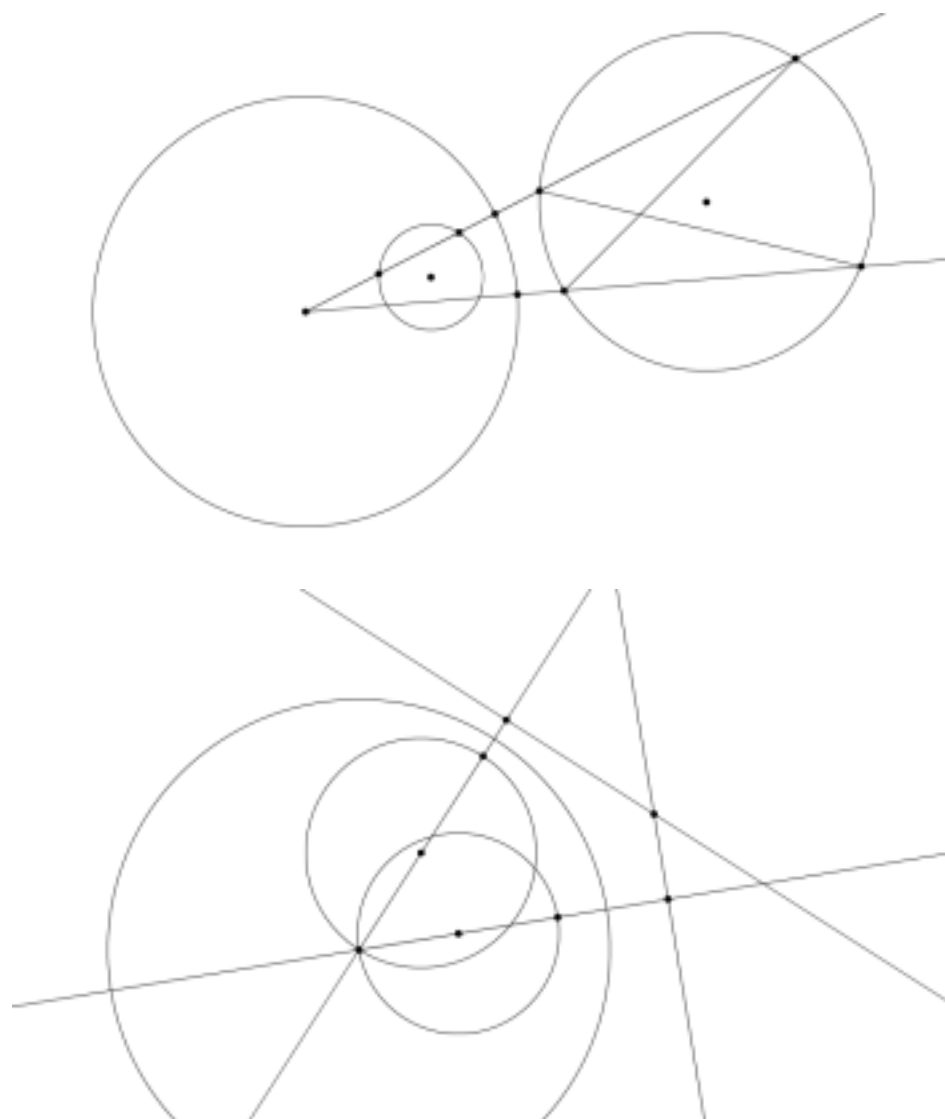
(ただし、3つの円を含む円の半径は負とする)。

さて、3つの接する円を描くには、3角形の頂点を中心として、内接円、傍接円の接点を通る円を描けばよい。KSEGを用いて、これを描いてみると感じがつかめる。

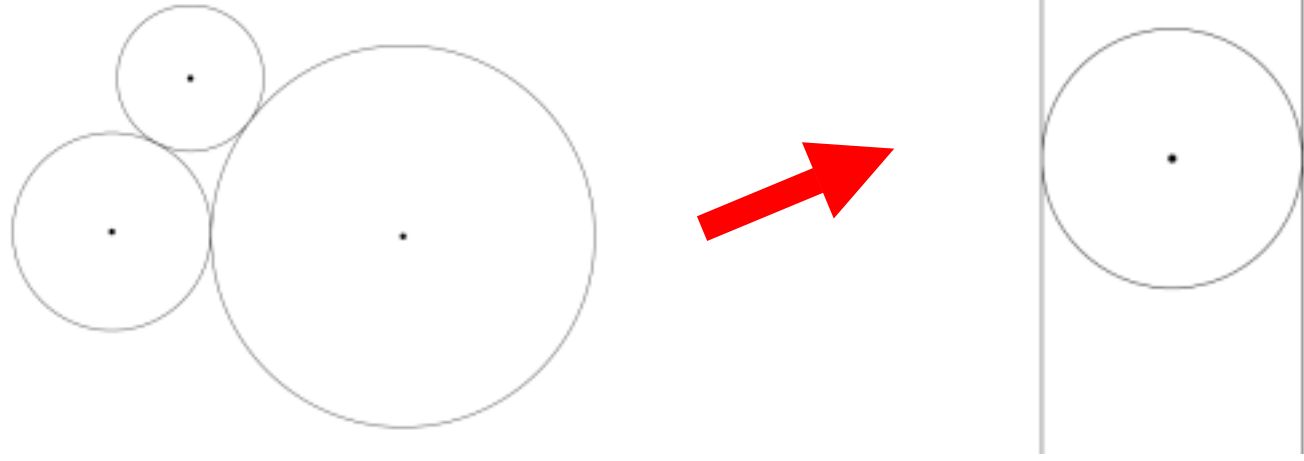
これらの3つの円に接する4つめの円を描くのが、上に述べたアポロニウスの問題であった。これを行うのに、「魔法の反転」を使うと良い。

半径が r の円についての反転とは、
円の中心からの半直線上の点を、
同じ半直線上の距離の積が r^2 と
なる点に写すものである。

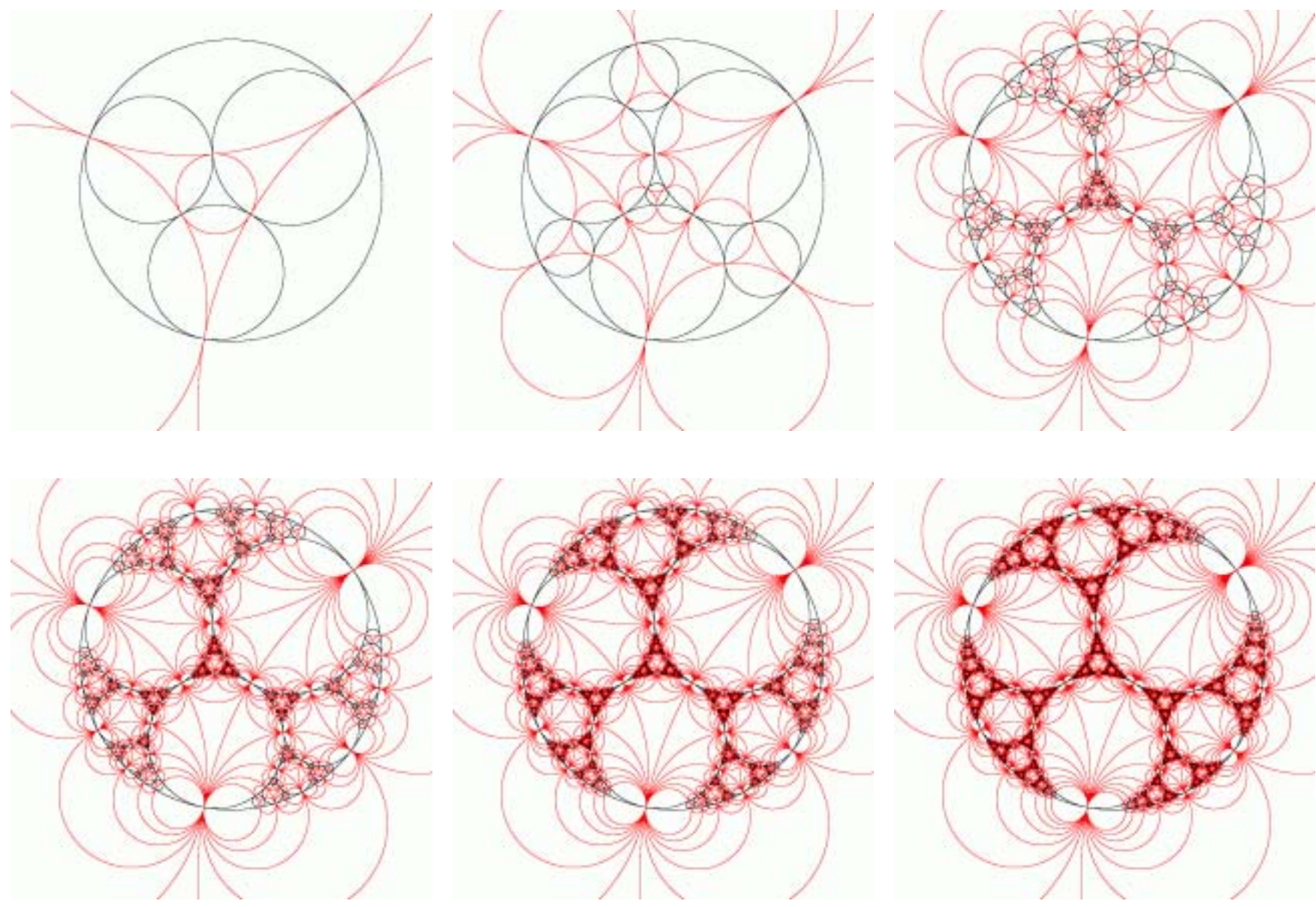
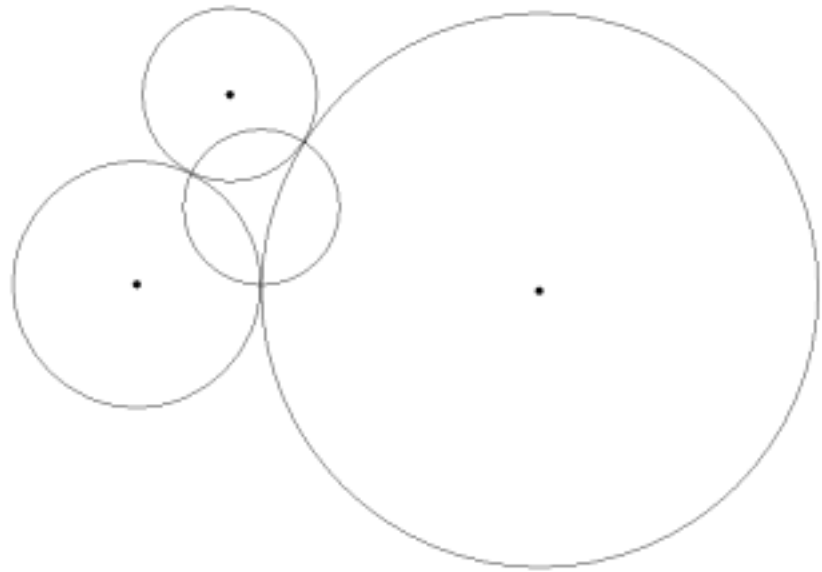
方冪の定理から、反転は「円または直線」を「円または直線」に写す。また、角度を保つ。この様子も、KSEGで確かめられる。



魔法の反転を使って接点を無限遠点にもっていけば、4つ目の接する円は容易に描ける。

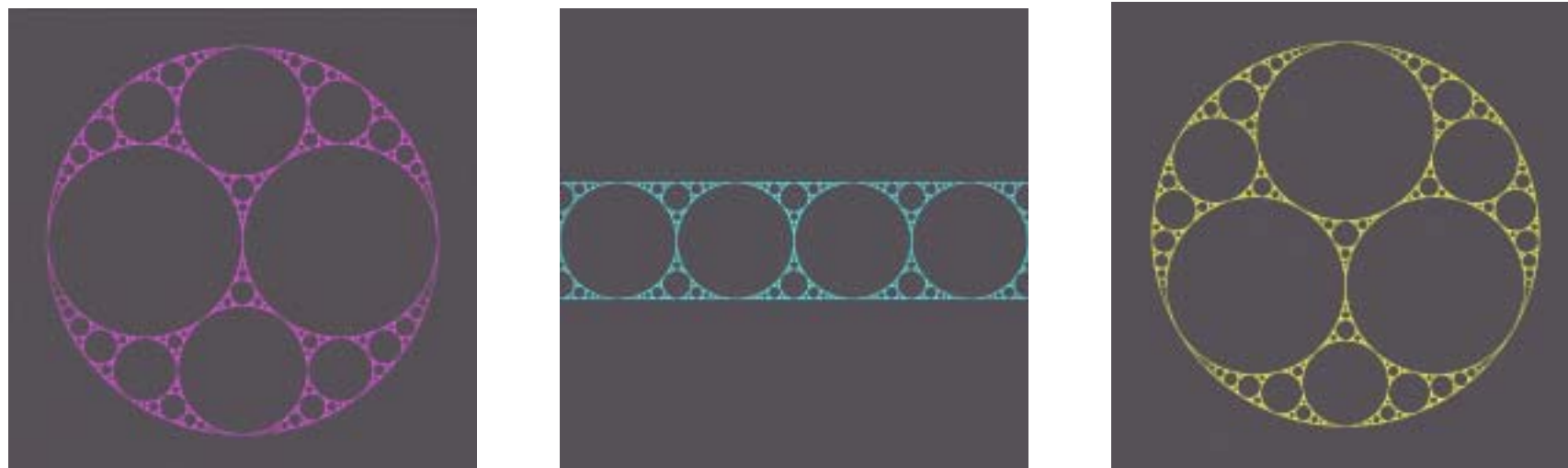


4つ目の接する円の増殖させることもできる。つまり、右の図のような3つの円の3つの接点を通る円についての反転で、3つの円に接する2つの円同士は写り合う。これを使って、増殖させる。下の図を参照されたい。



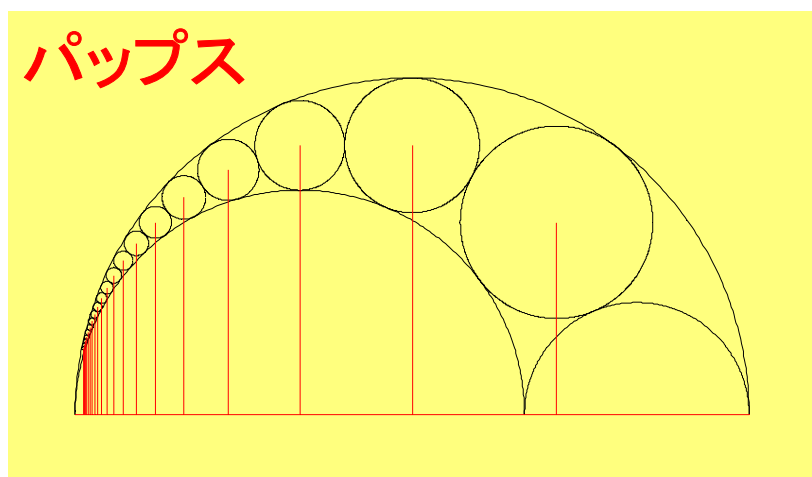
2. アポロニアン・ガasket

こうして得られる図形をアポロニアン・ガasketと呼ぶことにする。

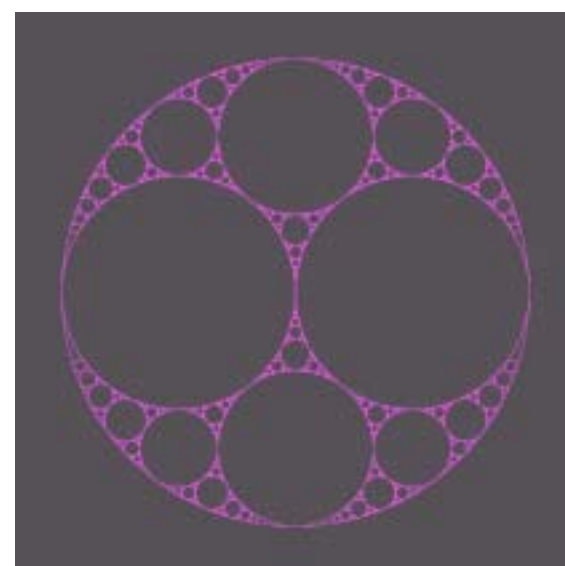


注意。パップス、ファレイの図形は、アポロニアン・ガasketの部分である。

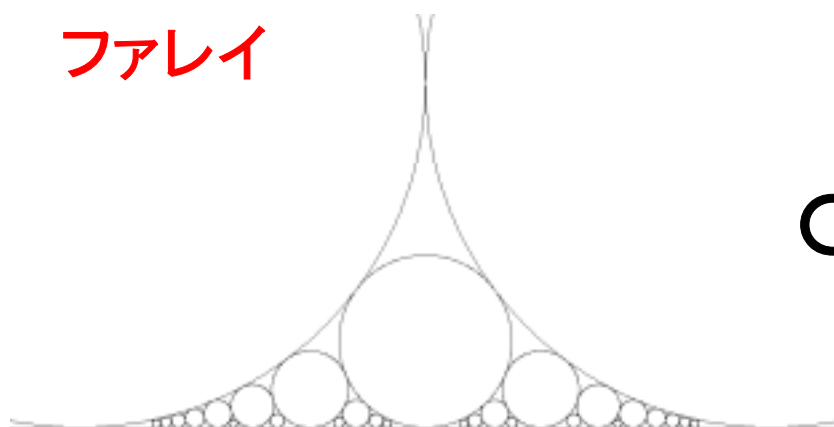
パップス



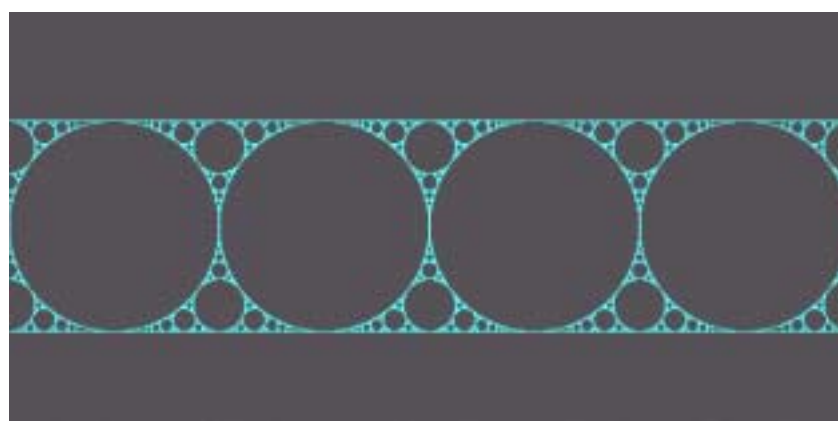
⊂



ファレイ



⊂



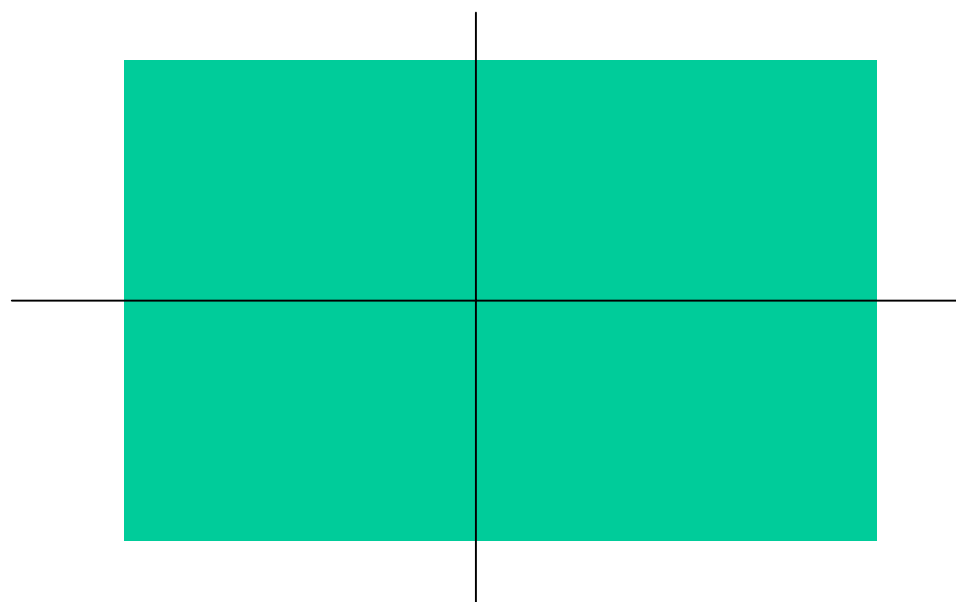
・ **アポロニアン・ガasketの描き方** 2つずつ接する3つの円に対し、3つの円に接する円を次々に描き加えていく。

・ **注意** 最初の3つの円を定めると後の描き方は一意的に定まっている。さらに、最初の3つの円を取り替えても似たような図形となる。その理由は、「最初の3つの円」同士は、「**反転と相似変換**」で写すと重なり合うからである。

・オイラー(1707–1783)

・ガウス(1777–1855)

を持ち出すまでもないが、複素数 $z = x + y\sqrt{-1}$ で書くと
平面上の点は1つの複素数で表される座標を持つ。複素数平面上で、



相似変換は $z \mapsto az + b$

実軸についての鏡映は

$$z \mapsto \bar{z} = x - y\sqrt{-1}$$

単位円についての

反転は

$$z \mapsto \frac{1}{\bar{z}}$$

これらを順に行って得られる
向きを保つ写像は1次分数変換

$$z \mapsto \frac{az + b}{cz + d} \quad (ad - bc \neq 0)$$

となるが、これは、

2 × 2 複素正則行列

$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ のなす群

$GL(2; \mathbf{C})$ による変換

である。

ここまでの議論をまとめると、2つのアポロニアン・ガセットは1次分数変換で写りあう（等角同値、共形同値という）。その意味でアポロニアン・ガセットは一意的な図形である。

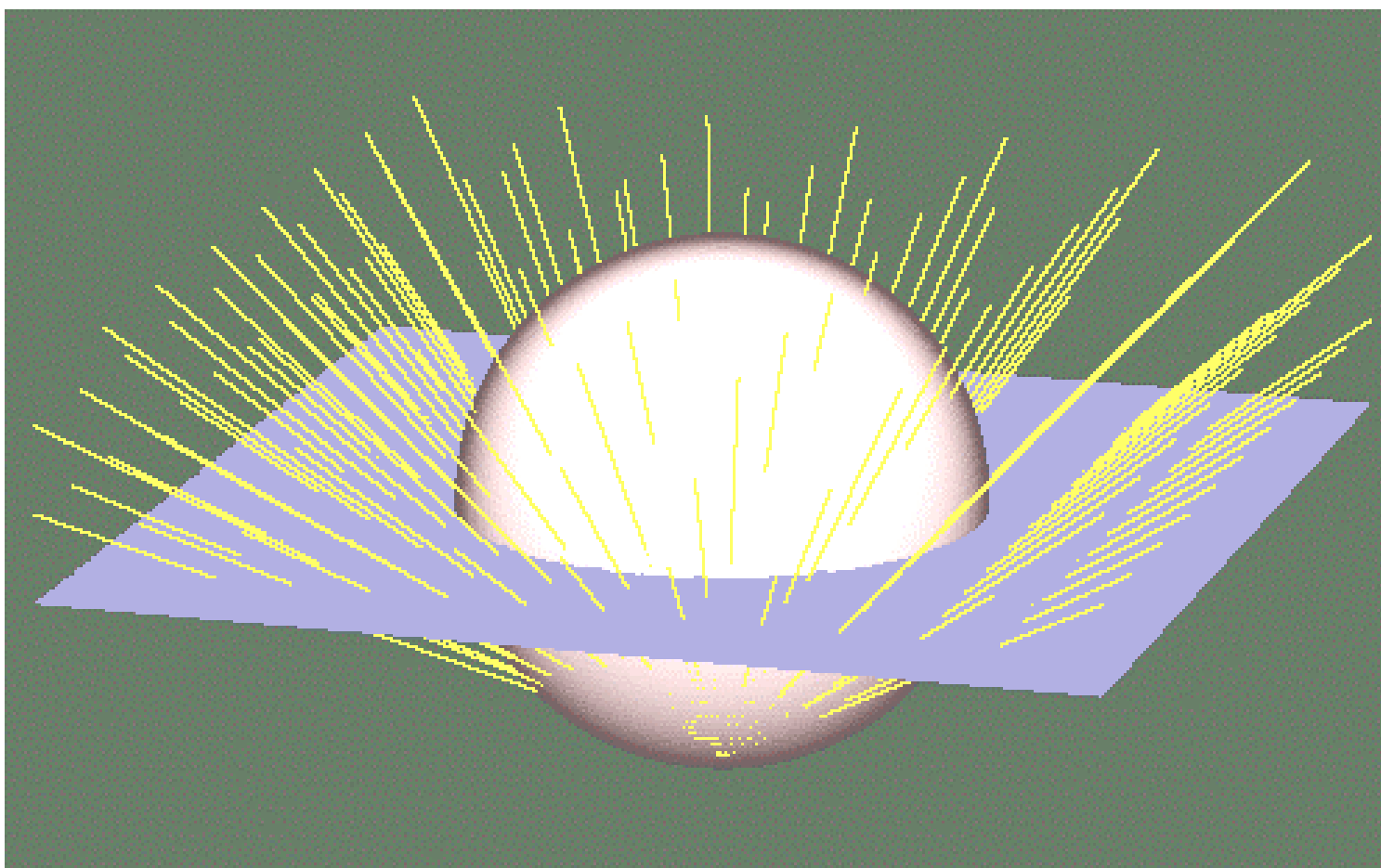
さらに、1つのアポロニアン・ガセット G から G 自身への1次分数変換を考えると、これは「2つずつ接する3つの円（順序付き）」により一意的に定まる。「2つずつ接する3つの円（順序付き）」は、自然数と同じ個数しかないことがわかっているので、群 K は可算個の元からなる。

・クライン (1849–1925)

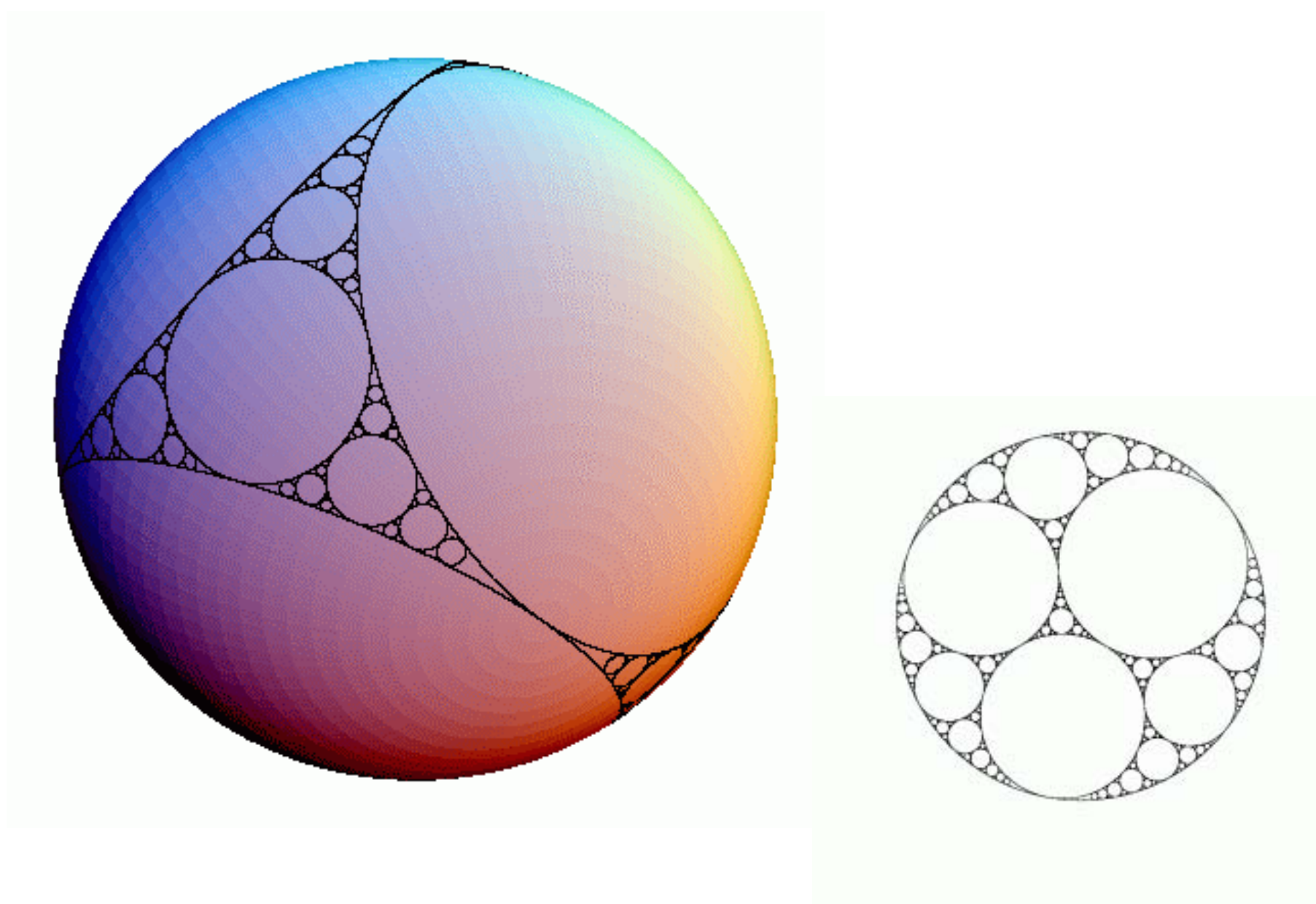
は、このような1次分数変換のなす群の研究を行った。

3. ステレオグラフィック射影と双曲幾何

アポロニアン・ガスケットは球面上で考える方が良い。
平面と球面の間には、ステレオグラフィック射影がある。



ステレオグラフィック射影は3次元空間の球面についての魔法の反転であり、平面上の「円または直線」を球面上の円に写す（等角図法）。ステレオグラフィック射影により、右下の平面上の図は左下の球面上の図のようになる。



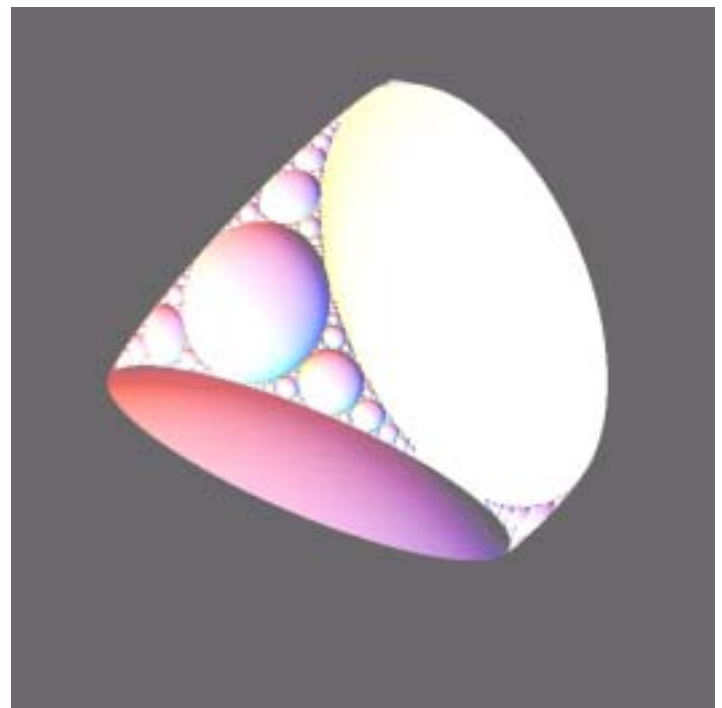
・セール (1926ー) の理論により、

アポロニアン・ガスケット G をそれ自身に写す
1次分数変換の群 K の構造もわかり、
 $A_4 *_{\mathbb{Z}_3} D_6$ のように書かれる。 A_4 は4次の交代群、
 $D_6 \cong S_3$ は位数6の2面体群、 $*_{\mathbb{Z}_3}$ は、
それぞれに含まれる3次の巡回群を同一視する
ことを示す融合積の記号である。

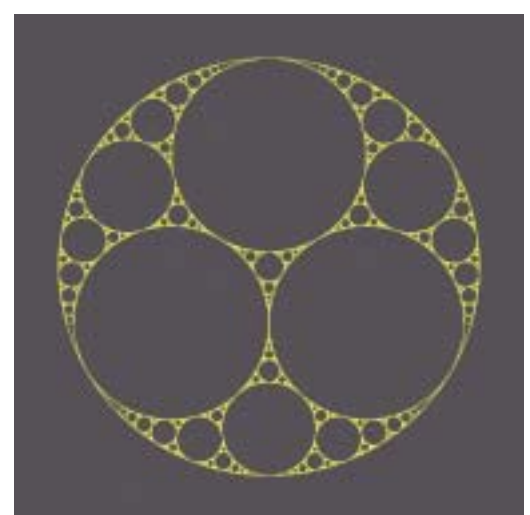
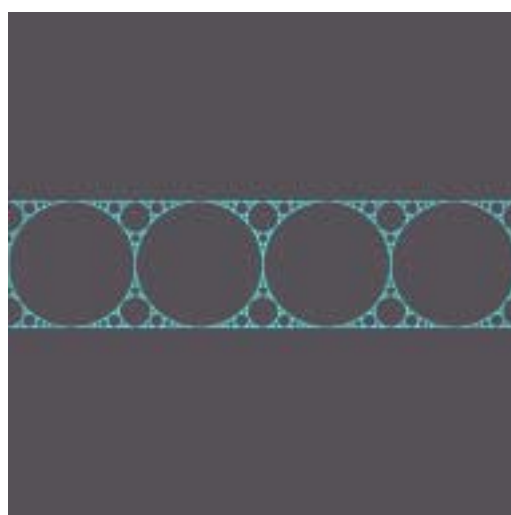
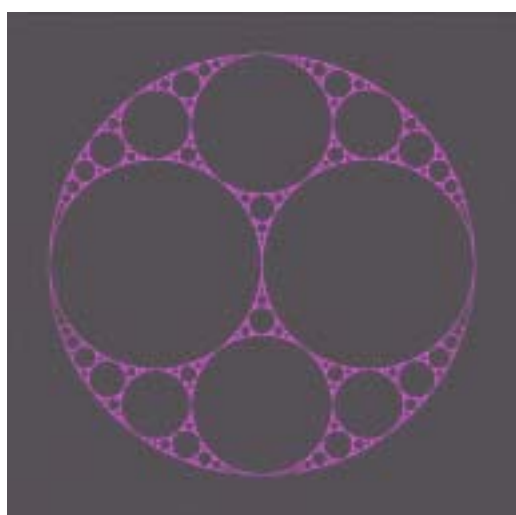
これを示すために、球面に囲まれる球体を考える。球体は、ポアンカレの計量を与えると双曲空間 H になる。1次分数変換は、 H に等長変換として作用すること、群 K による球体の商空間の形がわかることからクライン群 K の構造がわかる。双曲空間の研究について次の名前を挙げておこう。

- ・ロバチェフスキ (1792ー1856)
- ・ポアンカレ (1854ー1912)
- ・サーストン (1946ー)

右の図は K の作用の研究で表れる凸核と呼ばれるものである。



4. 自己相似性

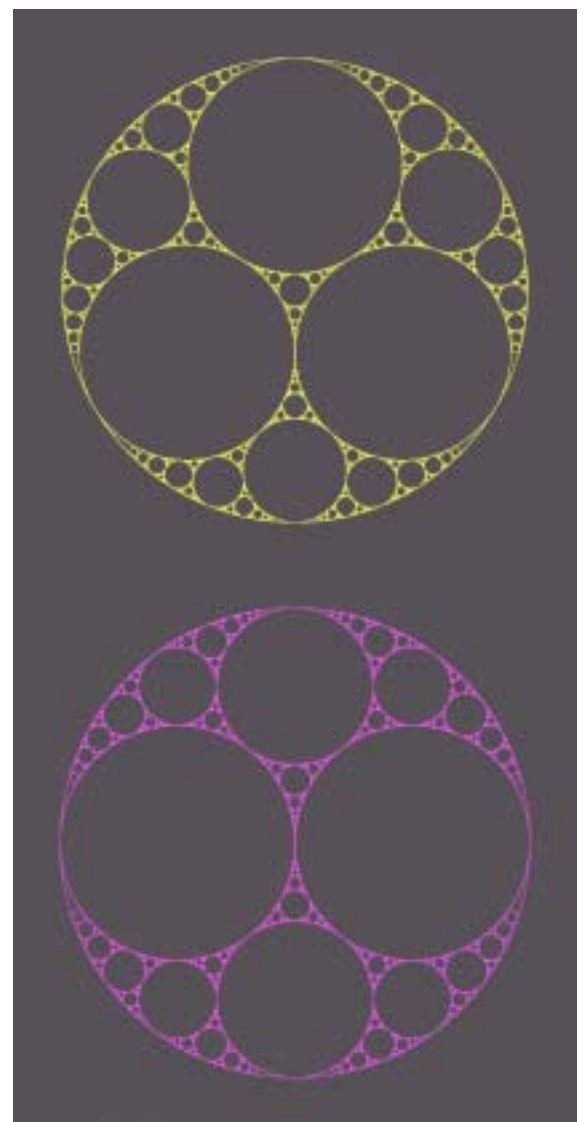
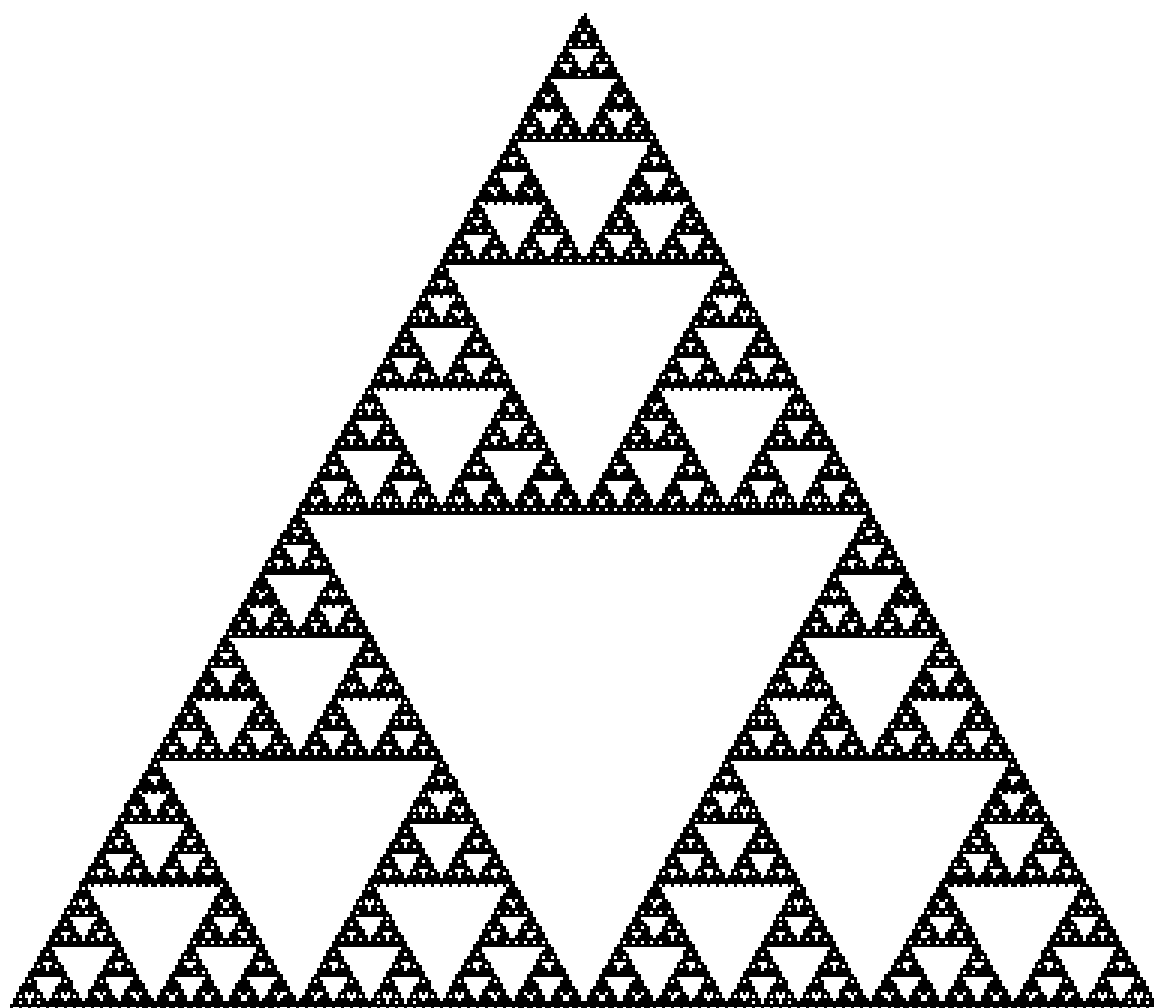


アポロニアン・ガスケットは、部分とその部分が、同じような形をしている。自己相似性を持つ図形である (群 K の作用による)。

自己相似性を持つ図形として

・シエルピンスキ (1882ー1969)

のガスケットと呼ばれる図形がある。



シエルピンスキ・ガスケットから G の一部への同相写像がある。シエルピンスキ・ガスケットを2つ合わせて、アポロニアン・ガスケットが作られる。それで G をアポロニアン・ガスケットと呼んだ。

・アポロニアン・ガスケットの描き方を復習しておこう。

2つずつ接する3つの円に対し、3つの円に接する円を次々に描き加えていく。このとき、アポロニアン・ガスケット G には操作の極限として付け加わる点も含めることにする (閉集合)。

5. アポロニアン・ガスケットの同相群

私がアポロニアン・ガスケット G に興味を持った理由を説明しよう。 G から G への1対1連続写像の全体は群をなす。これを同相群 $\text{Homeo}(G)$ と呼ぶ。

・**衝撃の事実** $\text{Homeo}_+(G) = K$ **これが、前出の可算群 K となる。**

ここで、 $+$ は向きを保つという意味で、指数2の部分群が定まる。何故これが衝撃的かということ、円周をはじめとする1次元以上の多様体、コントロール集合、メンガー一曲線などの位相的に等質な空間の同相群は非可算個 (連続濃度) の元を持つ。同相群は、いろいろな良い性質を持つ群である。 G は等質ではないが、同相群がクライン群になる自然な例があることが面白いのである。(シエルピンスキ・ガスケットの同相群は、3次の対称群 S_3 であることは良く知られていた。)

・**カントール(1845-1908)** ・**メンガー(1902-1985)**

上の事実を示すためには、アポロニアン・ガスケットの位相を調べる必要がある。

アポロニアン・ガスケットの位相的性質

- ・ 2つの点は曲線で結ぶことができる（弧状連結という）。
- ・ G 上の収束点列は G の点に収束する（閉集合であるという）。（そうなるように定義した。）
- ・ 2つの円は交わらないか高々 1 点で接する。

アポロニアン・ガスケットの性質「接点」

- ・ 2つの円の接点になる点の個数は、有理数の個数に無限遠点の 1 個を加えたもので、自然数の個数と同じである。そうでない点の個数は実数の個数と同じである。
- ・ どの点に対してもその点に収束する接点の列がある。（接点の全体は稠密であるという。）
- ・ 2つの接点は有限個の円を通る曲線で結ぶことが出来る。

アポロニアン・ガスケットの性質「円」

- ・ 2つずつ接する 3つの円がある。さらにそのような 3つの円に対して、その 3つに接する円が丁度 2つある。2つの円（の接点）は、2つずつ接する 3つの円の接点について、反対側にある。
- ・ G の各点に対し、その点を通る G 上の単純閉曲線がある（単純閉曲線とは、円周の 1 対 1 連続写像による像のことである）。
- ・ G の単純閉曲線で G を分割しないものは、円である。

ここで、我々にとって重要な結果は次のものである。

・ジョルダン(1838－1922)

・ジョルダンの閉曲線定理

球面上の単純閉曲線は、球面を 2つの円板に分割する。

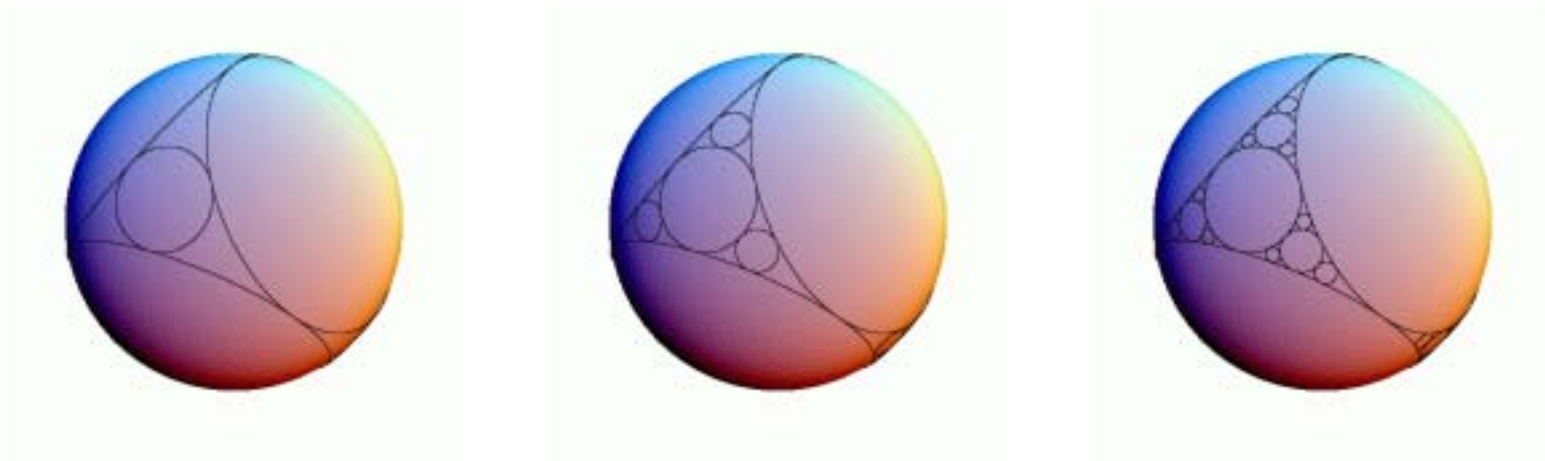
証明は、例えば、クラトフスキの教科書の 10 章を参照。河田敬義著「位相数学」共立出版、クゼ・コスニオフスキ著 加藤十吉訳「トポロジー入門」東京大学出版会にもある。

我々にとって何故重要かということ、図形 G の中で「円」を「 G 上の単純閉曲線の中で G を分割しないもの」として再定義することが出来るからである。

アポロニアン・ガスケット G は球面上の図形であるから、その上の単純閉曲線は、球面を 2つの部分に分割するが、そのとき同時に G が分割されるかどうかを考える。そうすると、 G の構成に用いられた円周だけが G を分割しないことがわかる。

アポロニアン・ガスケツトGからGへの同相写像

- ・ Gを固定して考える。GからGへの同相写像 h をとる。
- ・ Gの中に「2つずつ接する3つの円」Aをとる。 $h(A)$ も「2つずつ接する3つの円」で、その3つの接点の間の対応が定まる。
- ・ A, $h(A)$ のそれぞれに対して、3つの円に接する2つの円が定まるが、このとき新たに得られる6個の接点についての対応も定まる。
- ・ さらに、この5個の円に対して、3つの円に接する円が新たに6個あるが、そのとき新たに得られる18個の接点についての対応が定まる。
- ・ このようにして次々に接点の対応を定めることが出来る。



- ・ このようにして得られる接点の全体は、現れた円の上で稠密である。
- ・ さらに「2つの接点は有限個の円を通る曲線で結ぶことが出来る」ことから、このようにしてすべての接点を得られることが導かれる。
- ・ これらの接点の上の収束点列の収束先の全体（接点の集合の集積点全体）の集合はGであり、これで h が定まっている。
- ・ 向きを保つ場合は、3つの円を3つの円に写す1次分数変換 g と比較すると $h = g$ であることがわかる。

6. アポロニアン・ガスケツトの変形

$GL(2;C)$ は連結だから、アポロニアン・ガスケツトは変形でうつりあう。次のものが興味深い。

面対称のアポロニアン・ガスケツトが、球面上で正4面体と同じ対称性を持つアポロニアン・ガスケツトに変形し、再び面対称のアポロニアン・ガスケツトに変形していく様子を描いたもの

正三角錐の対称性をもつアポロニアン・ガスケツトから、正4面体の対称性、正3角柱の対称性を持つアポロニアン・ガスケツトへの変形の様子

7. アポロニアン・ガasketについての文献等

この2006年3月25日の日本数学会市民講演会の講演は、2004年5月10日、17日に東京大学教養学部でおこなった数理・情報一般「数学の現在・過去・未来」の講義ノートをもとにしています。

http://faculty.ms.u-tokyo.ac.jp/users/surijoho/surijoho_old.html
2004年の講義の準備には、大阪大学の大鹿健一さん、東京工業大学の小島定吉さんにお世話になりました。小島定吉研究室は

<http://www.is.titech.ac.jp/~sadayosi/lab/index-j.html>
2004年の講義を再現した記事を、日本評論社「数学の楽しみ」2005年夏号99ページ-117ページに載せました。球面の円円対応が向きを保てば1次分数変換になることなども書いています。また、アポロニアン・ガasketの変形のアニメーションの画像のコピーが掲載されています。

今回の講演準備のために歴史的なことを幾つか調べました。特に、筑波大学教育学系の磯田正美研究室のウェブページの記事を参考にしました。

<http://130.158.186.230/forAll/project/history/index.html>

また、この数学通信の記事では、ところどころに名前だけ入っていますが、講演中にはそれらの数学者の肖像をお見せしました。その多くはUniversity of St. Andrews, The MacTutor History of Mathematics archive

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/>
にあるものです。

最近、Kenneth Stephenson, Circle Packing: A mathematical tale, Notices of the AMS vol. 50, number 11(December 2003)1376-1388 という文献に気が付きました。最初の導入のあたりはこの講演と良く似ています。彼もApollonian gasketと呼んでいます。ウェブページ

<http://www.math.utk.edu/~kens/>
にNoticesの文章の他、アポロニアン・ガasketの絵もあります。

つばい たかし (東京大学大学院数理科学研究科)

<http://faculty.ms.u-tokyo.ac.jp/users/tsuboi/>