

論

攷

ゲーリケとボイルが制作した空気ポンプの構造

— 及び日本におけるゲーリケのポンプの複製 —

鹿児島大学生涯学習教育研究センター 松野 修

神奈川県池上第二小学校 吉川 辰司

鹿児島大学理学部学生 上園 志織

1. はじめに

オットー・フォン・ゲーリケは世界で最初に真空ポンプを開発したといわれている。ゲーリケが著した『マグデブルクの新実験』（1672年刊）には彼が最初期に制作したポンプと、1663年以降に制作した2つのポンプについて、その構造が解説されている。これとは別にカスパル・ショットの著した『水気学の器械』（1657年刊）と『新奇技術』（1664年刊）にも、ゲーリケが制作した別タイプのポンプの構造が解説されている。ところで英国のロバート・ボイルは、『水気学の器械』に紹介されたゲーリケのポンプにヒントを得て、自らも真空ポンプを制作した。ボイルはロバート・フックの協力を得て高性能なポンプの開発に独自に成功し、このポンプを使って40種類以上の実験をまとめ、1660年に『空気弾性論』として発表した。ボイルのこの著書は翻ってゲーリケに刺激を与え、ゲーリケもこれに触発されて高性能なポンプの開発に着手したのだった。ボイルはまた『空気弾性論』を発表した時点で「すでに第2世代のポンプの開発に成功した」と書いており、ボイルの第2世代のポンプを使った研究成果は1669年刊『続・空気弾性論』で発表された。これらの資料を整理すればゲーリケとボイルがどのような過程を経てポンプを改良していったのか追跡できる。

2. ゲーリケの第0型のポンプ

ゲーリケ著『マグデブルクの新実験』第3巻冒頭には、ゲーリケが最初期に制作したポンプの図が載せられていて、その構造についての説明がある。その説明を要約すれば次のとおり。

まず〈水を抜くための真鍮のポンプ、管abc〉を持ってきて樽にとりつける。このポンプは火事のとくに使うもので、ドイツでは〈真鍮の消防ポンプ〉と呼ばれていた。ポンプにはピストン棒cfとピストンgがついている。シリンダーの周りからは空気が漏れないようになっており、革で

できた2つの弁も空気がまったく残らないように仕上げてある。シリンダーの内側にある弁ddは水を内側に引き込むようになっていて、外側の弁bは水を外に逃がすようになっている。樽の下の位置aに、耳環のついた鉄環eでもってポンプをとるつける。男が3人がかりでポンプのピストンを引くと上の弁bから水が出てきて、水を抜くことができる。けれども抜いた水と入れかわりに、樽の中に空気が入り込んでしまった。そこでもっと小さな樽を持ってきて、それを大きな樽に入れることにした。2つの樽の厚板に長い管を通し、小さい樽に水をいっぱい入れてから口を塞ぎ、



図1.ゲーリケ『マグデブルクの新実験』より

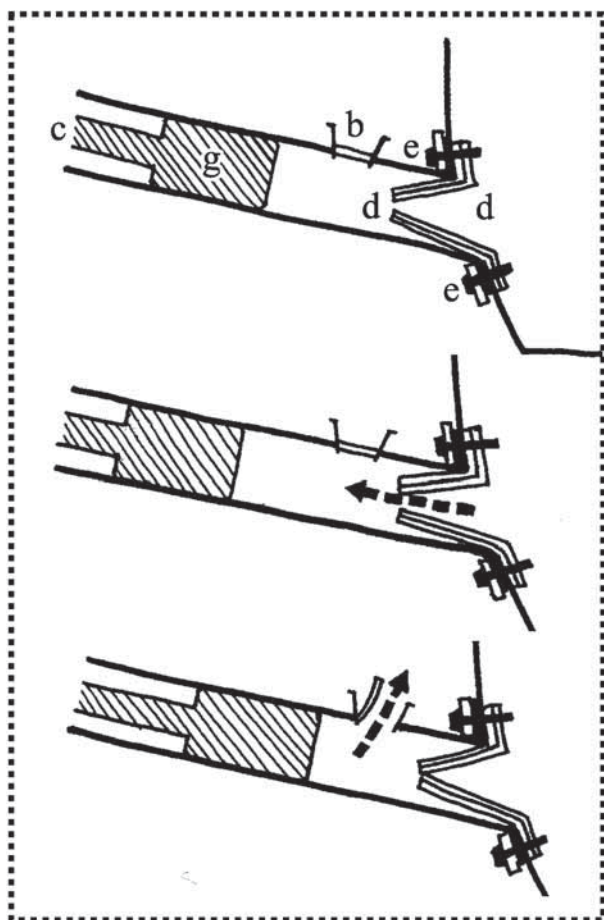


図2. ゲーリケ第0型ポンプのしくみ

そのあとで大きな樽にも水を入れた。ポンプで水を抜くとシューッと小さな音やグォーツという大きな音が聞こえてきた。それが止むとこんどは別の音が聞こえてきた。その後、小さな樽の天板をあけてみると、樽の中には水と空気が入っていた。その後の実験で、水に強い力が加わると木材をとおり抜けてしまうこと、水と木材が強くこすれあうとある種の空気ができて、それが樽の中に入りこむことがわかったので、容器を金属製の玉に換えて実験を続けた。

ゲーリケは特別なポンプを制作したのではなく、最初はありあわせの〈消火ポンプ〉に手を加えたのだった。とはいえこの時点で早くもポンプには2つの弁が備わっていた。弁の形状は著書に図示されている。この図によればシリンダーの先端には円錐型の、シリンダーの中間には円盤状の弁が置かれている。ゲーリケは密閉性を高めるために、水を張った大きな樽の中に小さな樽を入れた。そうしておいてから小さな樽の中の水を抜いた（小さな樽にも水を入れなければ、樽を水に沈められない）。〈水を使って空気の漏れを防ぐ〉というアイデアは、その後改良されるポンプ

にも継承されていく。

ゲーリケが描いた図ではポンプと樽との接合の仕方が明らかでない。特に金属球とポンプを接合している図では、まるで3本の針金で繋がられているようにすら見える。

3. ゲーリケの第1型のポンプ

ゲーリケは1654年レーゲンスブルグで開催されたドイツ帝国会議のレセプションのひとつとして、自ら開発したポンプを使って実験を披露した。特にマインツの大司教ヨハン・フィリップはゲーリケの実験に強い関心を示し、会議が終わる直前になって、ポンプを譲ってくれるようゲーリケに懇願した。ゲーリケの装置はヨハン・フィリップ侯が治めるビュルツブルクに運ばれ、この街の聖職者や大学教授が集まってゲーリケのいないところで実験を再現することになった。ビュルツブルク大学の数学教授、カスパル・ショットはこのときの実験の結果をドイツやイタリアに在住するカトリック教会の学者に伝えて彼らの意見を求めた。ショットはゲーリケが行った実験と、他の学者たちの意見をまとめて、1657年に『水気学の器械』で紹介した。ショットの『水気学の器械』はいろいろな噴水やサイフォンをたくさんの図入りで紹介した500ページ近い本で、この本の末尾約50ページ分が「マゲデブルクの新実験」と題された章にあてられている。

いっぽうゲーリケはレーゲンスブルクの会議から帰って

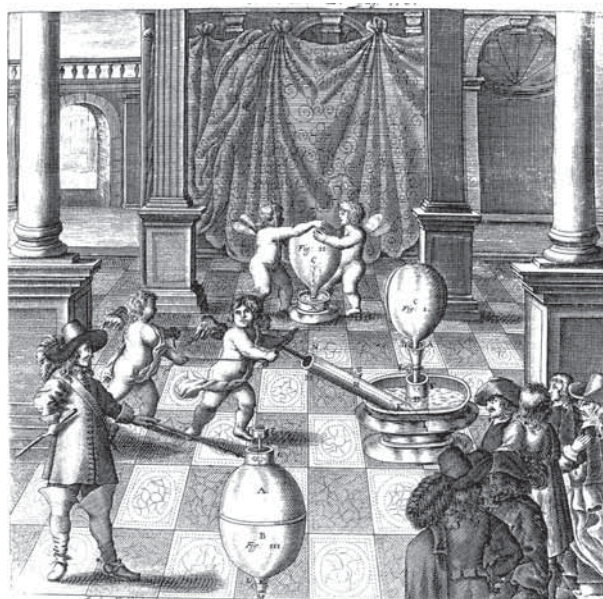


図3. レーゲンスブルクでのゲーリケの実験のようす
ショット『水気学の器械』より

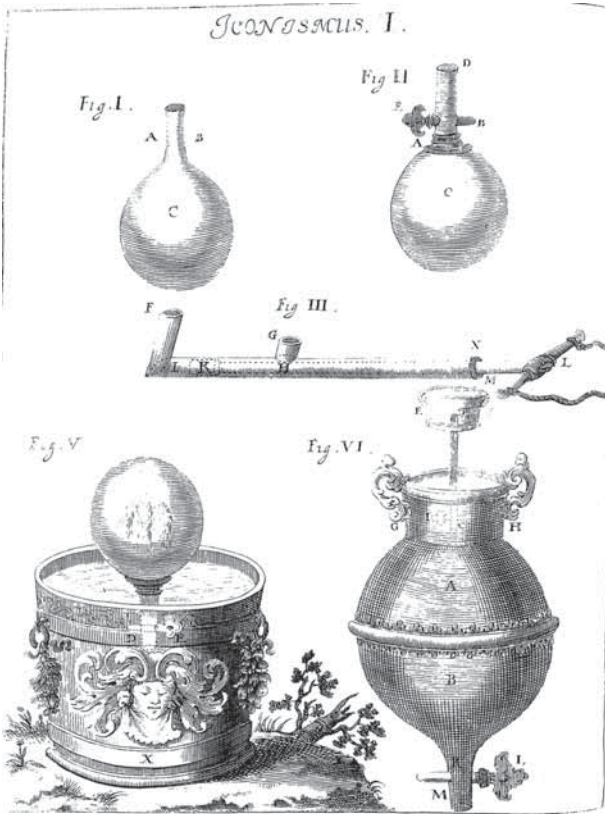


図4. ゲーリケがヨハン・フィリップに譲ったポンプ
シヨット『新奇技術』より

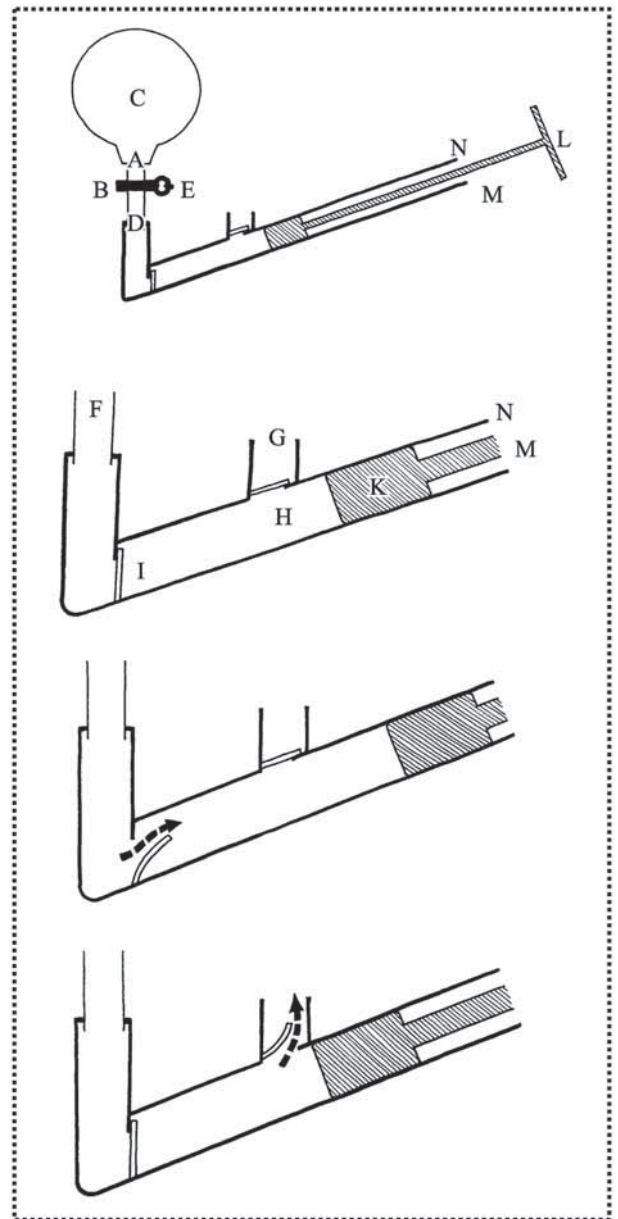


図6. ゲーリケ第1型ポンプのしくみ



図5. ビュルツブルクでの実験のようす
シヨット『新奇技術』より

からも、真空ポンプを使った実験に精力的にとり組み、そしてその成果はまたもやカスバル・ショットが1664年に出版した書著、『新奇技術』で紹介された。この本の冒頭80ページ分は「第1巻 マグデブルクの奇跡」と題されている。この文書はショットとゲーリケの手紙のやりとりをもとに、ゲーリケがどのように実験を進めていったのか詳しく解説したもので、ゲーリケ著『マグデブルクの新実験』には記載のない事実についても触れている。原本はラテン語であるがゲーリケの行った実験についての箇所が1986年にドイツ訳され、ついでロバート・ボイルの実験に関する箇所が2008年にドイツ語訳されている。そこで以下、『新奇技術』のドイツ語訳をもとに、ゲーリケが製作した第一世代のポンプについて、その構造を解説する。

ゲーリケが1654年レーゲンスブルグで披露し、ヨハン・フィリップに譲ったポンプは、『水気学の器械』と『新奇技術』にその図が載せられている。このポンプの構造は次のとおり。IとHの文字の箇所に「弁」がある。Iにある弁は一方だけに開くようになっていて、Fの方向には開かない。もうひとつのHの箇所にある弁も一方だけに開くようになっていて、Hの方向には開かない。このポンプを操作するには、ポンプの先端Fに口金の先端Dを差し込んで桶xの中に沈める。次にピストンKをシリンダーにぴったりはまるようにしてから、MNの方向に引っ張る。すると弁Iは内側に開くので、容器Cの空気はシリンダーの中に導かれる。ピストンKをHの方向に押しと弁Gが開いて弁Iが閉まる。そこで、シリンダーの中の空気は弁Gから泡となって出て行く。この操作を何回か続けると、容器Cから次第に空気が抜かれていく。こういう操作を1～2時間ないし3時間続けると、だんだんきつくなってきて引くのが難しくなる。そしたらガラス容器Cをポンプからはずして実験を始める。

『新奇技術』の記述では弁の形状が明らかではないし、図にも示されていない。そのためシリンダーの先端にある弁は第0型と同じようなコーン状なのか、それとも板状なのか不明である。1986年にオットー・フォン・ゲーリケ博物館がゲーリケのこのポンプを復元したときには、2つの弁は板状に成形されたが、その根拠はいまのところはっきりしない。いずれにせよ、シリンダーの先端は上方向に曲げられていて、この先端部にガラス製の玉が接合できるようになっている。この時点で専用の真空ポンプが完成したとってよい。

ただこのポンプが不思議なのは弁Hの位置がシリンダーの先端からあまりにも離れている点である。ショットの図ではピストンKはIとHとの間に置かれているが、シリンダー内の空気はGから抜けていくのだから、IとHの間（正確にはDとHの間）にある空気はピストンと何回押し引きしても出て行くことはない。そのため容器Cの真空度を最大限に高めようとするれば、ピストンの往復運動を長時間にわたって続けるほかない。じっさいショットは「ピストンを押し引きする操作を1～2時間ないし3時間続けなくてはならない」と書いている。容器Cの真空度を高めるには、IとHとの間のデッドスペースをできるだけ縮めた方が有利なのに、どうしてIとHはこんなにも離れているのだろうか。ショットの本には「点ABDEFIを桶の中の水に浸す」とは書かれているが、「栓Gも水に浸す」とは書かれていない。それにショットの図では栓Gは桶の水面より上に出ている。だから栓Gを水面より上にもって来なくてはならない理由があるなら、IとHとの間を広くとるのも理解できるが、栓Gを水に沈めてもシリンダーの中の空気は泡となって出てくるのだから、何の支障もないはずである。

このポンプの性能はいかほどだったのだろうか。ショットはビュルツブルクでの追試の結果について報告しており、「このポンプでもって27シェッフェルの容器から空気を抜いてから、容器の口を水につけたら、26シェッフェルと1/4だけ水が入ってきた」としている。1シェッフェルが現在の度量衡でいかほどに換算されるのか不明ではあるが、比率から推測すれば97%の空気を抜く能力があったことになる。「20シェッフェルの容器から空気を抜いたときにはヘーゼルナッツほどの空間が残っただけだった」とも書かれている。これだけの能力があれば、『新奇技術』に載せられたほとんどの実験を行うには十分だったといえよう。

ゲーリケのポンプでもうひとつ注目すべき点は、実験を手早く行うために大きな金属の球を用意していたことである。ガラス容器からポンプで空気を抜くにはかなりの時間を要するので、その間に観衆の関心がそれてしまうおそれがある。そこであらかじめ大きな金属の球から空気を抜いておき、いよいよ実験を行う時になって、大きな金属球とガラス球とを接合して、一気に空気を抜くことができるように工夫したのだった。ゲーリケの実験装置は当初から観衆を意識したものだっことを示す重要な証拠である。

4. ボイルの第1世代のポンプ

さて、ロバート・ボイルはショットの『水気学の器械』を一読するや否や、ただちに自分でもポンプの制作に着手した。ボイルが制作したポンプについては、ボイル自身が書いた『空気弾性論』に詳述されている。そこでポンプの構造に関する箇所を『空気弾性論』から引用しよう。

「さて、いまからわたしがおこなった実験について話をはじめるときだが、しかしその前に、自然学者プリニウスの味わい深い言葉、すなわち『仕事を成功させられたのはだれのおかげか、じぶんの獨創性はどこにあるかを告白することは、高潔で飾りけのない、謙虚なふるまいである』という言葉にしたがうとしよう。いまから紹介する器械を作るにあたって、どこからヒントを得たかお話ししよう。わたしたちが英国で別れる前に、わたしは1冊の本を手にいれたのだった。貴君は覚えておいでだろうか、そのとき『この本は精力的なイエズス会士、ショット師が書かれたもので、わたしはまだちゃんと読んでいない』と貴君に語ったことがある。この本でショット師は、最近ドイツにおいて『才能ゆたかな紳士であり、マグデブルクの市長でもあるオットー・ゲーリケ氏は水に沈めたレシーバから空気を抜くのに成功した』と書いていた。この実験のことを読んでわたしがひどく興奮したことは貴君も覚えておいでだろう。というのもこの装置なら空気の非常に大きな力（空気を抜いた容器を開けたときや、その中に水を押しあげるときのものすごい力）を、これまでなされてきたどんな実験よりはっきりと見せられるからである。貴君にもおりにふれていくつか原稿をみせたとおり、わたしも前からこのことについて熱心に取りくんできた。それでもこの紳士は、『容器から[ポンプで]空気を抜きとるとい手法でもって、明瞭な結果をもたらした』という点では、わたしの先を行っていたのだから、氏の報告がわたしにヒントと勇気を与えてくれたことを認めなくてはならない」。

「どんな発明でも最初から完全なものはなく、修正が必要な欠点やキズがないもの、また改善の余地がないものなどありはしない。いまわたしたちが問題にしている器械についても、これをくわしく調べてみたところ2つの点で改良が必要だと思われた。第1に、この〈風ポンプ〉（このことをそんなふうにな不適切に呼ぶ人もいる）を使って容器から空気を抜くには、屈強

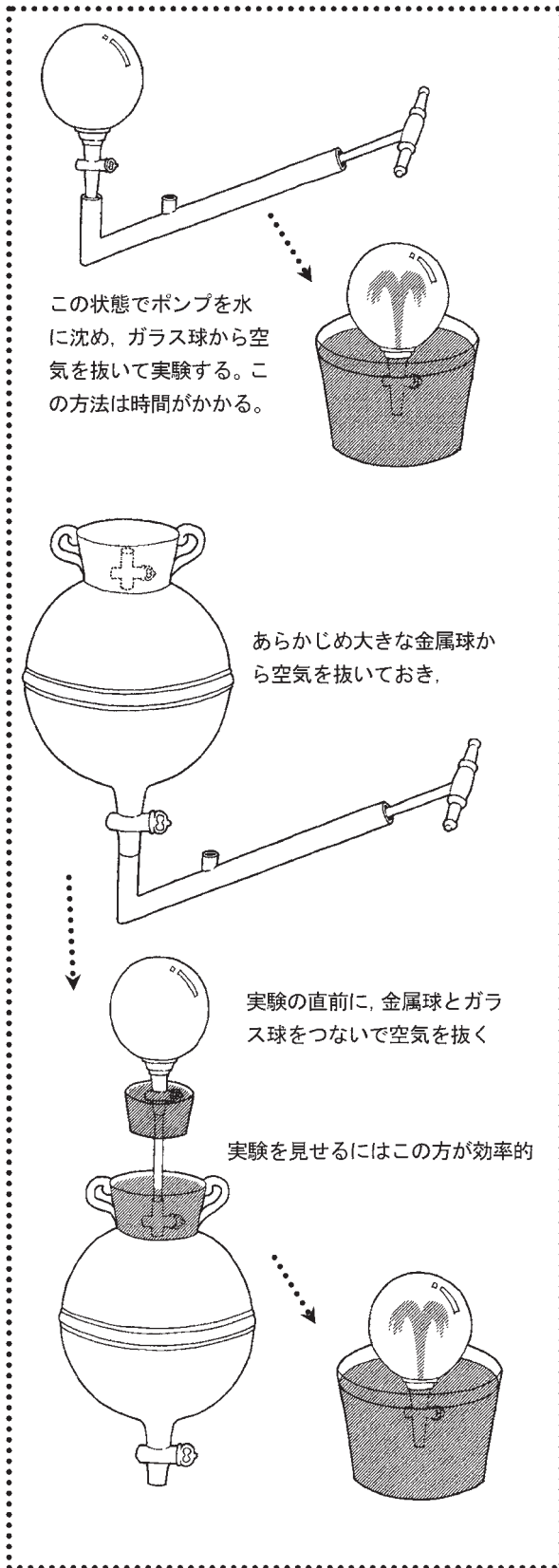


図7. ゲーリケ第1型ポンプとその付属品

な男が2人がかりで数時間にわたって働きつづけなくてはならなかった。2つめの欠点は(こっちのほうがもっと重大なのだが)、『空気を抜きだすガラス容器』がひとつにまとまった構造になっていて、本体のガラス玉の部分と首の部分とが隔てられていない点である。このため、いろいろな実験をしようとしても中にもものを入れられないのである。この器械では(何かができるとしても)、ほんのわずかしかできなくて、この著者が観察し、ショット師がそれについて書いた以上のことは期待できないのだった。これらの欠点を克服するために、わたしはG氏とR. フック氏(この人のことは貴君もよく知っているだろう。わたしがこれらの実験について考察をすすめていたときも、彼はわたしといっしょにいた)とともに新しい空気ポンプを考案したのだった。このポンプはこれまでとはちがって水に沈める必要がなく(水に沈めるのはいろいろな場面で不便である)、それにもっと簡単に操作できるようになっている。なんだか失敗したのち、後者(フック氏)は、他の人びとから指摘のあった2つの改良を加えて、いまから説明するポンプをつくりあげたのである。おかげでドイツ製の器械にあったはじめの欠点は完全とはいえないまでも、かなりの程度克服された。それから2つめの欠陥を克服するには、実験で使う容器に袖をまくりあげなくても片手をつこめるくらいの穴をあけたらどうか、つまり容器より小さくて短いものを中に入れるために、これに穴をあけられないものかと考えた。それはそんなにむづかしくはないだろうと予想できた。というのも、わたしが数年前にトリチェリの実験をなんだか試したときのことを思い出したからだ。わたしがトリチェリの実験装置を使っているつか不思議に思っていたことを試したとき、ふつうは密閉されているガラスの先端に穴をあけてやってみた。このときには(ダイアキノンと呼ばれる漆喰をベースにした、特別な密閉剤)を使ったのだが、そのおかげで(穴をあけたにもかかわらず)、そんな穴があいていないかのように、わたしの思惑どおりにガラス管をちゃんと使うことができたのだった。おそらくまちがいがあるまい。この密閉剤は微細な成分がきめ細かくうまくまじりあっているので、外の空気を完全に遮断して侵入させないにちがいない。『この密閉剤を、口金とレシーバの穴の間の合わせ目に詰め込めば、外気

がすきまを通過して容器に侵入するのを防げるだろう』。わたしはそう考えて、つぎに説明するようなガラス容器を職人にいくつも吹いて作らせることにした。とはいっても、職人はわたしたちが望んでいたほど大きくて形が整っていて使い勝手のいいガラス玉は作れなかったが、それでもそのうちの1つはほかのものに比べればはまらずの出来映えだったので、これを使って装置をこしらえることにした。

ポイルとフックはゲーリケのポンプをヒントにして2つの改良を加えた。そのひとつは、楕型のピストンロッドと歯車でもってシリンダーを容易に引けるようにした点であり、もうひとつはガラス容器の上部に片腕を突っ込めるくらいの穴を開けて、中に資料を入れられるようにした点である。ポイルが指摘しているように、容器の中にさまざまな資料を入れて外から観察できるようになったことで、この実験装置の可能性は飛躍的に向上した。ポイルとフックのポンプによっていかに多くの種類の実験が可能になったかは、ポンプの周りに描かれた付属の実験装置を見ただけでも明かである。ポイル以前にも水銀を入れたトリチェリ管の上部に実験資料を入れる試みもなされていたけれども、制約が多すぎて限られた種類の実験しかできなかったのだった。

ポイルとフックが制作したポンプとゲーリケのポンプのちがいはこれだけではない。ポイルは「ポンプを水に沈めるのはいろいろな点で不便なので、水に沈める必要のない仕様にした」と書いているが、実際には空気の漏れにいつまでも悩まされる結果を招いた。ガラス容器(レシーバー)の上部に穴を開けてガラスのふたをしたことも、空気の漏れを招く原因となった。

さらに、ポイルのポンプはゲーリケのそれとちがって弁でもって空気の出入りを制御するのではなく、シリンダーの上部に差し込まれたロッドと、ガラス容器の下部に差し込まれた活栓を交互に操作することで、空気の流れを操作するようになっていた。このためシリンダーを押し下げる操作は歯車のおかげで容易になったものの、ガラス容器から空気を抜くには、やはりかなりの時間を要したのだった。この点についてポイル自身の説明を引用しよう。

「貴君は『この装置を使うといったいどんな現象がおこるのかくわしく聞きかせてもらいたい』と思っていることだろう。そういういろいろな現象について話すまえに、まず初めにこの装置そのものについて説明し

よう。これは〈レシーバ〉と〈容器から空気を抜くためのポンプ〉という、おおむね2つの部分から成っている」。

「レシーバ（これは錬金術師が使う大きな蒸気溜めに似ているので、ガラス職人にならってわたしたちは『レシーバ』と呼んでいる）は、〈上部に大きな穴をあけたガラス球〉と、〈この穴をおおうふた〉、〈ガラス球の下部のくびれにとりつける口金〉からなっている」。

「レシーバの形は付録の図面の第1図に描いてある。これには約30ワイン・クォーターの水が入る。1ワイン・クォーターには約2ポンド（1ポンドは16オンス）の水が入る。もっと大きな容器だったらよかったのだが、ガラス職人にはこれ以上大きくて、こんなに厚くて、そのうえわたしたちの目的にかなうこうした形状の製品を吹き上げるのはできなかったのである」。

「この容器Aのいちばん上に丸い穴があいているのが見えるだろう。その直径BCは約4インチ。穴の周囲は1インチくらい高く盛り上がっていて、ガラス製の土手になっている。（貴君が自分のためにこの器械を作るかもしれないので説明しておく）と、この土手を作るにはゆるい円錐型になったガラス管を穴BCにすえつけ、高さ1インチのところ、熱いアイロンを使って切り離せばよい」。

「この土手の役目は図2に描いたふたを支えることにある。図2には〈土手BCをおおうために鑄造した真鍮のリングDE〉が描いてある。このリングを（きめの細かい強力な接合剤）でもって土手に固定する。内向きに傾斜したリングの側面（口径3インチ以上）は、真鍮の留金FGをがっちり受け止められるようになっている。そこでリングの側の凹状の表面と、留金の側の凸状の表面がおたがいに接触してこすれあうので、外の空気が侵入する隙間は完全に遮断される。留金FGの中央には〈直径1/2インチ強の穴HI〉があいている。この穴のまわりには真鍮の受け口があって、これが〈カギ状のコックがついた栓K〉を受けとめるようになっている。留金の穴に栓を差し込んでふさぐのである。栓を差し込んだままコックを回しても空気は容器に入っていないが、栓自体は必要に応じてはめ込んだりはずしたりできる。この栓の使いかたについてはあとで説明しよう。ほかに、栓の下端に〈栓自体

を貫ぬく小穴8〉をあける。この小穴と〈留金FGの底にとりつけた小さな真鍮の輪L〉（左右どちら側にとりつけてもかまわない）に糸8, 9, 10を通す。この糸は、空にした容器を締め切ったまま、容器の中でいろいろなものを動かすためのものである」。

「容器についてまだ説明が残っているのは、第1図のNに描いた栓Xである。栓Xは容器の首の部分にしっかりと取り付け、空気をできるかぎり完全に遮断できるようにする。そのために栓Xの柄のまわりに、錫の板MTVWを取りつける。これは容器の首全体をおおえるよう、じゅうぶんに長くなければならない。この板の接着はかなり困難なのでやりかたを解説しておこう。そのやり方はこうだ。まずこの錫の板の内側をピッチ、松脂、木灰をよく混ぜ合わせてとかしたドロドロの接着剤でいっぱいしておく。それからこの液状の混合物が〈柄Xの上の穴Z〉にまで入ってこないよう、この穴に糸をとりつけたコルクで栓をしておく。こうすれば、レシーバの上に開いている穴からコルクの栓を引き抜くことができる。レシーバの首をじゅうぶん暖めておいてから、これを接着剤の中につっこむ。ただしあとで柄Xがきちんと機能するように、柄の上の部分の顔をだすまでしっかりとつっこまなくてはならない。こうすれば錫板とレシーバのあいだも、レシーバの内側と柄の間も接着剤でふさがれる。器械の上の部分についてはこれで説明は終わりだ」。

「下の部分はフレームと、それによって支えられる『吸引ポンプ』、ないしは前にそう呼んだ『空気ポンプ』からなっている。フレームは小さいがしかし非常に丈夫な木材でこしらえた3本の脚IIIからできている。この脚の片側は手の動きのじゃまにならないように垂直にしてある。フレームのまん中には、脚の横にさしわたして釘づけした板222があり、これはその形にふさわしく『横隔膜』と呼ばれる。この上にポンプの本体をしっかりとりつける。ポンプについては今から説明しよう」。

「ポンプ本体は中空のシリンダー、ピストン、ピストンを動かすハンドル、そしてバルブという4つの部分からなっている」。

「シリンダーは（鑄型で）鑄造された真鍮でできていて、長さは約14インチある。中は空洞になっているが、じゅうぶんな強度を保つだけの厚みがある。中

空の口径は約3インチ。その中は職人の技がおよぶ限りまっすぐで滑らかな円筒にしあげてある。この中空のシリンダーに、〈2つの部品からできたピストン4455〉をはめ込む。そのうちの1つ、リング44の直径はシリンダーの内側の口径よりわずかに小さく、そのまわりに〈厚みのある靴のなめし革〉が釘でとめてある。この部品はシリンダーにぴったりはめ込まれているので、いったんシリンダーから抜かれると、たいへんな力で叩き込まなくてはならない。ここまですれば、ピストンとそれが上下するシリンダーの間をとって、空気が入りこむのを防ぐことができる」。

「いま説明したピストンの部品のまん中には〈幅が狭くて、厚みがあり、シリンダーよりもいくらか長い鉄板55〉がしっかり固定されている。この鉄板の一方の側はまっすぐだが、もう一方の側は図に描にあるようなノコギリ状のギザギザが(いわば)歯のように並んでいる。この歯には小さな(商人がそう呼ぶような)歯車 α β が噛みあうようになっている。歯車は(2本の留金22)でもって、さっき説明した水平な横木222の下に固定されている。横木の上にはシリンダーが設置されていて、ピストンはこのポンプの3つめの部品であるハンドルによって上下に動かされる。ハンドルのくわしい形状は図にあるとおり」。

「シリンダーの最後の第4の部品はバルブRである。シリンダーの上部に内側に少し傾斜のついた穴を貫通しているのだが、この穴に真鍮の杭を打ち込む。この杭は自由に差し込んだり取り外したりできる」。

「器械については上に説明したとおりだが、そのほかにもこれを作動させる方法について加えておこう。というのも、ピストンを動かしたり空気を外側に追い出したりするのはまだしも簡単だが、容器から空気を抜き始めてからあとも、空気が入ってこないようにしておくのは人が想像する以上にむづかしいからである」。

「こうしてすべての準備をととのったら、口金のある柄Oを下にしてシリンダーの上の開口部&にぴったり差し込む。最初の実験は、ハンドルを動かしてピストンをシリンダーの上に押し込むことである。こうするとシリンダーの上には空気はまったく残っていないはずだ。つぎに[シリンダーの上部にあいている]バルブの穴を杭でふさいでからハンドルを反対側に回し、ピストンをシリンダーの下におろす。このように



図8. ボイルの第1世代のポンプ
ボイル『空気弾性論』より

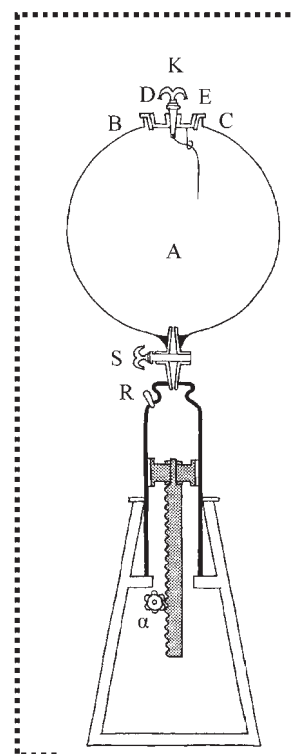


図9. ボイル第1世代のポンプのしくみ

ピストンの動きによって、シリンダーに入っていた空気は押し出され、そのあとこの空間に入ってこれなくなる。だからシリンダーの内部にあった空気は完全になくなるのは明らかである。こうしておいてから、栓についているコック S を回転させると、栓にあいている穴によってシリンダーとレシーバのあいだを行き来できる通り道ができるので、レシーバの中にあつた空気の一部はすぐにシリンダーの中に降りてくる。栓をもとどおりに回すと空気はレシーバにもどれなくなる。バルブを開けてからピストンをもういちどシリンダーの上に押し上げると外に放出される。このようにピストンをなんども上げ下げし、それに応じて栓をまわしたり、バルブの穴を開け閉めすれば、急いで実験を終えたいときでも、実験者の思いどおりに容器から空気を抜くことができる」。

「貴君は、わたしの説明はあまりにくどくて不必要だと思うかもしれない。しかし中の空気をかなりたくさん抜き出したとき、わずかな時間でも外の空気を遮断しておこうとすれば、想像もしなかつたいろんな困難に出会うものだ。貴君がそのことを自ら体験するなら、わたしがここに書いた以上に「もっといろんな条件についてくわしく書き留めてくれたらよかつたのに」と思うはずだ。しかし実際にためしてみれば、これ以上のくわしい説明は必要あるまい。ただ話を先にすすめるまえに、このことを説明しておいたほうがいいだろう。じつは、わたしたちがこの器械を使ってやろうとした実験には、おおむね 2 種類のものがあった。ひとつは、この装置にたとえわずかな漏れがあるにしろ、急いでやっしまわなければならない実験である。ポンプを急いで動かして空気をすばやく抜いてしまえば、漏れが感知できないほどにできる。わたしが「感知できないくらい」と言ったのは、「たしかに漏れていることはわかるのだが、それを止めることは容易ではない」という意味である。もう 1 種類の実験は、容器の中から空気を抜き出すだけでなく、かなり長くその状態を保っておかなくてはならない実験である。動物やその他のものを中にとじこめたり、植物の発芽や成長を確かめたりするときなどがそうだ。こういう実験のばあいには、かなり長時間にわたって外側の空気を遮断しておかなくてはならないことは明らかである。このばあいには空気がほんのわずか漏れただけで

もゆるみが生じて、「真空」とはいえない状態になってしまう。真空という言葉の意味についてここでとりあえずはつきりさせておきたいのだが、それは〈あらゆるものが存在していない空間〉のことを意味するのではなく、ただ〈空気がほとんどすべて欠けている状態〉のことを意味するにすぎない」。

「実験について話をすすめる前に、実験の 2 つの種類について前置きしたのは適切だつたと思っている。というのも実際にためしてみると、レシーバが圧縮された大気にとりかこまれているとき、この外気がわたしたちにまったく感知できない無数の小さな穴や割れ目から入り込むのを完全に防ぎつづけるなんてことは、とてつもなく（ほとんど想像できないくらい）難しいことがわかつたからである。どんなに注意深く作業しても、どんな工夫をしても、レシーバをほとんど空っぽにしたうえで、そのうえさらにまったく漏れが生じないよう長時間その状態を保つなんてことはほとんど不可能だつた。（わたしたちは近頃はだいぶ慣れてきたので）ポンプをすばやく根気よく動かして、空気が外から入ってくるより、もっと早く中の空気を抜き出せるようになったので、容器をほぼ完全にからっぽにできるようになった。そのためこれまで誰も観察したことのなかつたいろいろな自然現象を発見できるほどになったが、それでもその状態を保つのは難しかつた」。

ボイルは、ここでポンプの 2 つの使い方を説明している。ひとつはレシーバの活栓とシリンダーのロッドを閉めたまま力任せにピストンを押し下げ、その後で活栓を急に開いて、レシーバの中の空気を一気にシリンダーへと導くやりかたである。この場合はレシーバの容積が小さい方がより効果的である。もうひとつは、レシーバの活栓とシリンダーのロッドを交互に操作して、レシーバから空気を抜き続けるやりかたである。このばあいは、レシーバの中に多少の空気が漏れ入ってきて、ピストンを引き続けるかぎりある程度の真空度を保つことができる。この場合はレシーバの容積が大きい方がより効果的である。じっさいボイルは試みようとしている実験の性質に応じて容器を使い分けている。

5 . ゲーリケの第 2 型のポンプ

ゲーリケがポンプの本格的な改良に着手したのは、ボイルのこの研究を知つてからだつた。ボイルの『空気弾性論』のラテン語訳は 1661 年に出版されたので、ゲーリケはボイ

ルの研究をくわしく読むことができた。ゲーリケは1662年2月28日付の手紙で、初めてボイルのポンプについてふれている。この手紙でゲーリケはショットに宛てて、「貴殿の先の手紙はボイル氏の方法とその長所について簡潔に説明されていました。けれどもわたしは手紙がとどくより前に、ポンプにいくつかの点に改良を加えていました。自宅の2階をぶち抜いて2つの部品をつなぎ、1階でポンプを操作できるようにしたのです。それに比べてイギリスのやり方では時間がかかりすぎるうえに、どうやっても空気がもれてしまいます」と伝えている。ボイルの研究に触発されて、ゲーリケも自らのポンプを改良し巨大なポンプを組み立てた。ゲーリケはこれまでも水でもって空気の滲入を防いできた。このポンプはその利点を最大限に活かす仕組みになっていて、その点がボイルのポンプとちがっている。桶の直径は50センチ、高さは150センチある。この中にポンプを沈め2人がかりで梃子を使って動かすのである。

このポンプは当時、最高水準にあった。ゲーリケはこの巨大ポンプに自信をもって、「これはボイルのポンプより格段に優れている」と、1662年5月10日の手紙で誇らしげに書いている。

「ロバート・ボイル氏の『物理器械の新実験』に関して言えば、貴殿がわたしに実験のやり方について説明してくださったよりも前に、わたしはこの本を自分で入手して読んでいました。この本についてのわたしの考えを述べるなら、『ボイル氏の作ったような空気ポンプで真空を作り出そうというのは、とうていむりだ』と言わざるをえません。その理由は、第1にポンプが水に沈められていないからであり、第2に歯車などを使ってはとうていすばやく仕事を終えられないからです」。

「このことについては、ボイル氏自身も認めています。ボイル氏の本の65ページには、『どんなに慎重にやっても外気がすぐに浸入してくるので、いろいろな実験やろうと何度もくり返して失敗したすえ、とうとうこのガラス容器を使うのはあきらめるほかありませんでした。その代わりもっと大きな容器を用意して、これでもって改めて実験を始めることにしました』とあります」。

「その前の箇所には、『ほとんどの空気は抜き出せるけれども、その間にもつねにピストンの壁から空気がひそかに入り込んでくる』と書かれています。こうい

うことはわたしの作った装置ではまったくおこりません。わたしは真空にしたガラス容器や銅の球、そのほか似たような容器を3か月、いやそれ以上の期間、そのままの状態で保管することができます。貴殿にまえにもお知らせしたとおり、しっかりした環で締めつけるだけで、銅製の半球を何週間も真空にしたままにしておけるのです」。

ゲーリケは、ボイルのポンプのことを知らされて「先を越された」と感じたのだろう。ボイルの研究を知って、あわててポンプ自体の改良に本格的にとりくんだにちがいない。

ゲーリケがこのとき制作したポンプの構造と操作方法は次のとおり。この装置はゲーリケの自宅の2階をぶち抜いて備えつけられた巨大なものである。ポンプはその全体が大きな樽に沈められている。ポンプには弁とロッドがとりつけてあって、両方で空気の流れを制御する。板状の弁はシリンダーの内部、上の先端の内側にとりつけられている。ロッドはシリンダーの上の先端に開いている穴に外側から差し込まれている。(1) まずロッドで穴を塞いでおいてピストンを引くと、板状の弁が下向きに開いて、レシーバの中の空気がシリンダーに降りてくる。(2) つぎにロッドをはずしてからピストンを押すと弁が閉まって、空気が泡になって出ていく。この操作を繰り返せば、ポンプの上にとりつけられたガラス容器を限りなく真空に近づけることができる。(3) ゲーリケは「ガラス容器の中の空気がほとんどなくなってしまうと、弁を押し開ける力がなくなるのではないかと考え、このごくわずかな空気をシリンダーに導くために、シリンダー内の弁を押し下げる小さなピンをロッドの穴の横に備えつけている。ピストンは直に人の力で引くのではなく、テコを使って2人がかりで引くようになっている。

図では、銅の玉Hの上にガラス球Lが接続されているが、じっさいには別べつにポンプにつないだと思われる。このポンプを使えばガラス球Lから空気を抜くのにそれほど時間がかかるとは思われぬ。しかしポンプそのものがあまりに巨大になったので、戸外で実験をするときには、真空にした容器を持ち出すほかない。そのために銅の玉Hが用意されたのかもしれない。図では器具や管についている栓を開け閉めすれば、ガラス球Lから空気を抜いたり、銅の玉Hから空気を抜いたりできるように描かれている。また、それぞれの栓と接合部はopとqrの容器にある水で塞がれている。ゲーリケはこのポンプを使って、ほとんど完全な

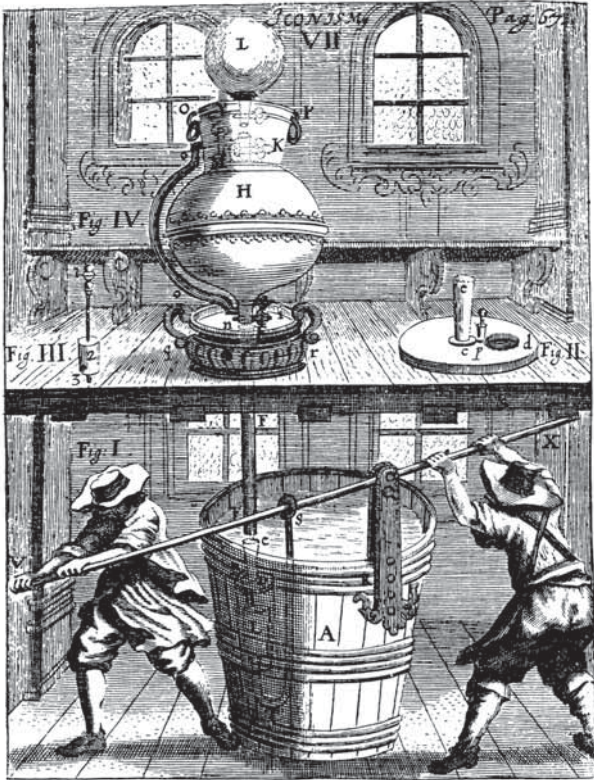


図 10. ゲーリック第 2 型のポンプ
シヨット『新奇技術』より

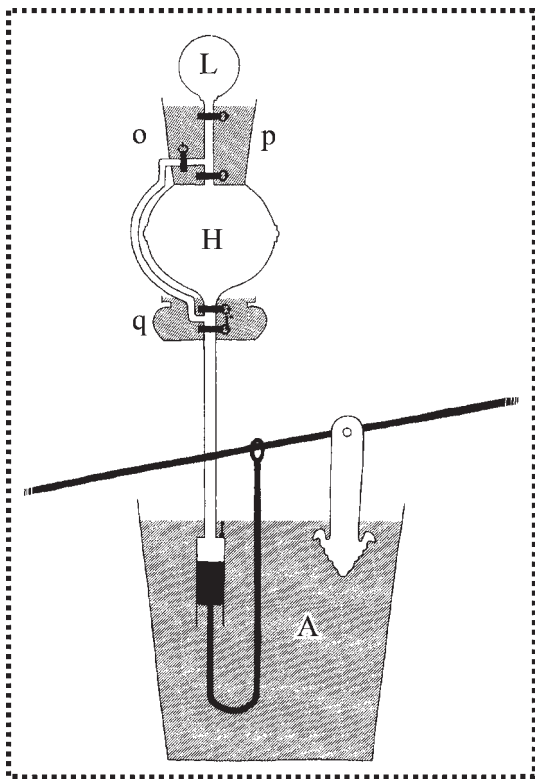


図 11. ゲーリック第 2 型のポンプのしくみ

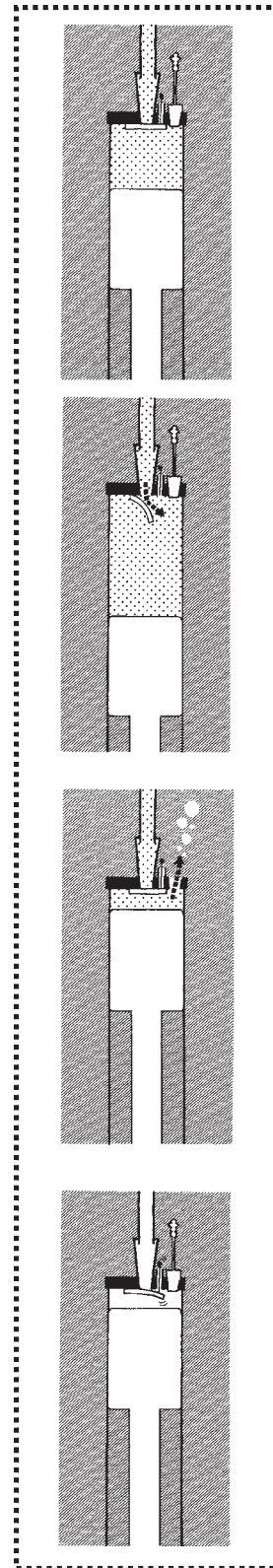


図 12. ゲーリック第 2 型のポンプの操作

真空状態を作り出すに成功した。

6. ボイルの第2世代のポンプ

ボイルは『空気弾性論』の「まえがき」の末尾に次のように書いている。

「わたしは以下の手紙の結論を書き終えてからあと、この器械にある改良を加えた。それによってわれわれは（いくつもの新しい試みをやってみた結果）、特にやっかいな操作をしなくても、容器をこれまでよりも長く、一日じゅうでも真空にしておけるようになった。おそらくそれよりもっと長くだって真空を保てるようになるだろう。わたしが当面のめんどろな仕事をかたづけ、出版社との契約どおり差し迫った原稿を出版してわたしの責務をはたしおえたなら、これを使っているいろいろな実験を試みる余裕ができ、以下の論文の補足としてその記録を読者に提供できるだろう」。

ボイルが1660年の冬に制作したという第2世代のポンプはどのような形状をしたのかわかっていない。しかしこのとき「論文の補足」として出版を予告された実験は、1669年『続・空気弾性論』で発表された。この『続・空気弾性論』の冒頭ではボイルが改良したポンプの図が載せられている。ボイルは、このポンプの構造と操作の方法について、「空気ポンプを使った実験を知悉している者には、この図を見れば説明は不要であろう」としか書いていない。そこで、この図をもとにポンプの構造と操作方法を推測してみよう。

ポンプの本体は水槽の中に沈められている。これはまちがいなくゲーリケの影響である。球形をしていたレシーバはお椀を伏せたような形状に変えられ、板の上に載せられている。今日「真空鐘」と呼ばれる部品はこの時点で発案された。容器の中の空気は板の下を通過してシリンダーにつながる管によってポンプに導かれる。これによって、第1世代のポンプでは不安定だったレシーバとシリンダーの接続が安定した。レシーバの下部からつながっている管はシリンダーの下先端ではなく、シリンダーの上部の横に開けられた穴につながっている。この状態からどうやって空気を抜くのだろうか。

空気の制御は相変わらず「弁」ではなく、活栓とロッドによって行う。ただしロッドはシリンダーではなく、ピストンヘッドの内部に突き刺しておく。(1) まず活栓とロッドを閉めた状態で、ピストンをシリンダーのいちばん下

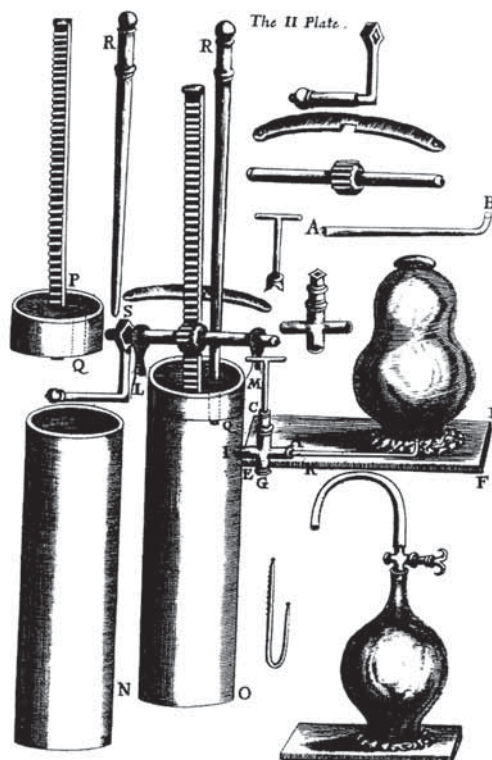
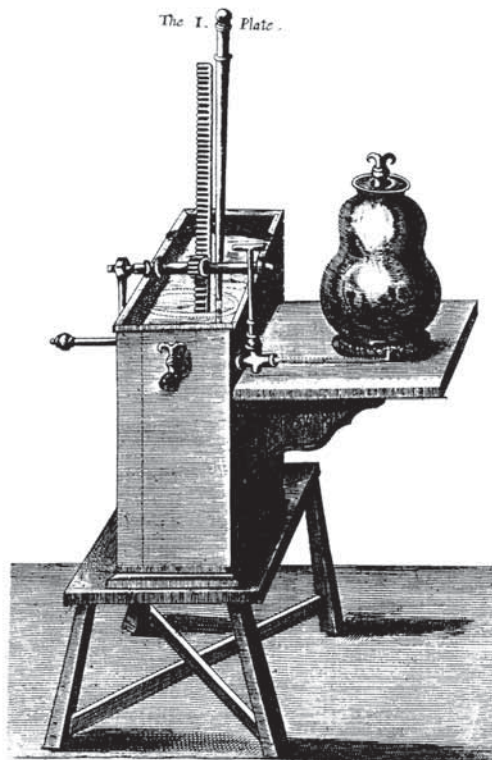


図13. ボイルの第2世代のポンプ
ボイル『続 空気弾性論』より

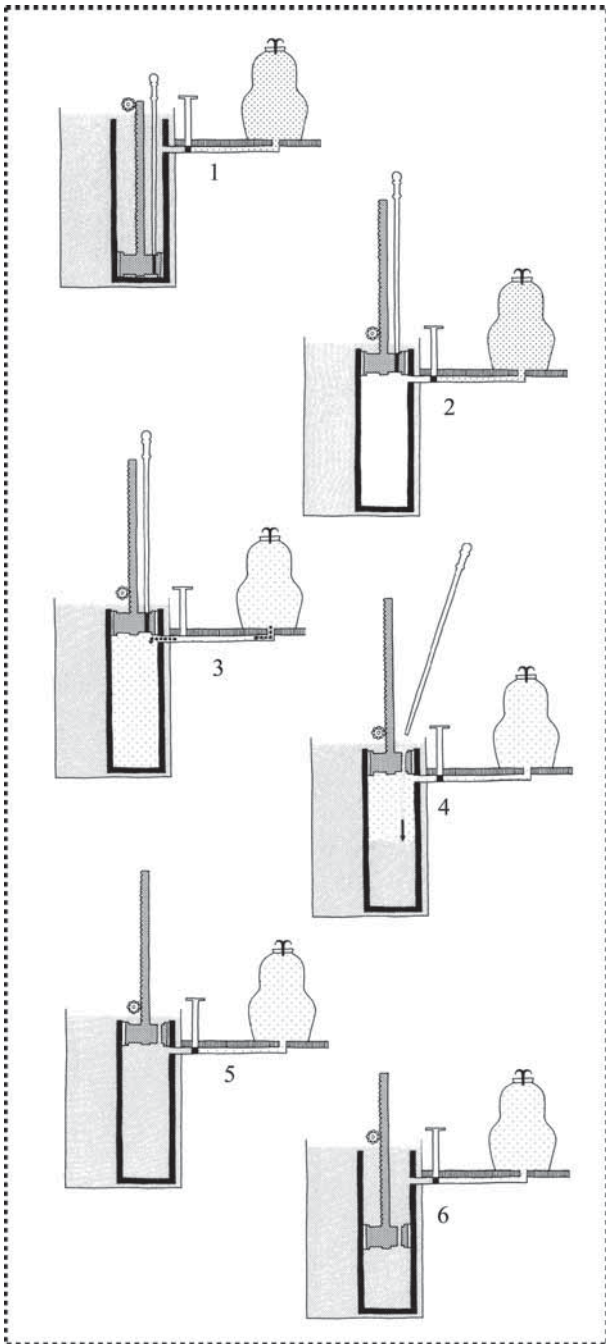


図 14. ボイルの第 2 世代のポンプの操作

で押し込む。(2) その状態のまま、歯車を使ってピストンを引きあげる。このとき大気の圧力に反してピストンを引きあげるのだから、きわめて大きな力が求められる。ピストンヘッドを管の上まで引きあげてから、その位置でいったん静止させる。図には大気の圧力に反してピストンの位置を保持するための装置が描かれていないが、おそらく何らかの工夫がなされていたはずである。(3) ピストンを上方に保持したまま、レシーバにつながる活栓を開ける。するとレシーバの中の空気は真空になっているシリンダーへと導かれる。活栓を少しだけ開ければ、空気は徐々にシリンダーへと導かれる。活栓を全開すれば、空気は一気にシリンダーに流れ込む。これは実験の性質によって使いわけることができる。もっとも、急激に空気を抜くと大気の圧力に耐えきれずに装置が壊れるおそれがある。じっさいボイルは「水銀を入れた容器が壊れて、レシーバごと破裂したことがある」と書いている。(4) もっと空気を抜きたいときには、活栓を閉めてからピストンヘッドにあるロッドを抜く。すると水槽の水がシリンダーの中に勢いよく入ってくる。同時にシリンダーの中にあった空気が泡になって、ピストンヘッドに開いている穴から出て行く。

(5) こうしてシリンダーの中はすべて水槽の水によって満たされる。(6) そうしたら、ピストンをシリンダーの下の先端まで押し下げる。このときロッドは引き抜いたままにし、活栓も閉めたままにしておく。そのあと、ピストンヘッドにロッドを差し込んで (1) の状態にする。以上の操作を繰り返せば、レシーバを限りなく真空に近づけることができる。

7. ゲーリケの第 3 型のポンプ

ゲーリケが最後に制作したポンプは、『マグデブルクの新実験』に詳しく描かれている。このポンプは 1663 年にゲーリケがブランデンブルク選帝侯の宮廷で実験を披露するよう要請を受けたのをきっかけに、小型で携帯できるタイプを設計したのだった。その概要は以下のとおり。

まず高さ 1 メートルほどの三脚 *abcdf* を鍛冶屋に作らせる。この三脚の上を鉄の円盤 *bc* でつなぎあわせ、下の脚 *afd* は鉄のネジで床に固定する。真鍮製の空気ポンプ *gh* の上に鉛の円盤 *y* をかぶせる。小さな管 *n* のついた真鍮の板 *mn* をポンプの上においた鉛の円盤 *y* にかぶせる。鉛の円盤 *y* と真鍮の板 *mn* との間にはドーナツ状の皮のシートをはさんで、3 本のねじを使ってしっかり止める。真鍮の板 *mn* の

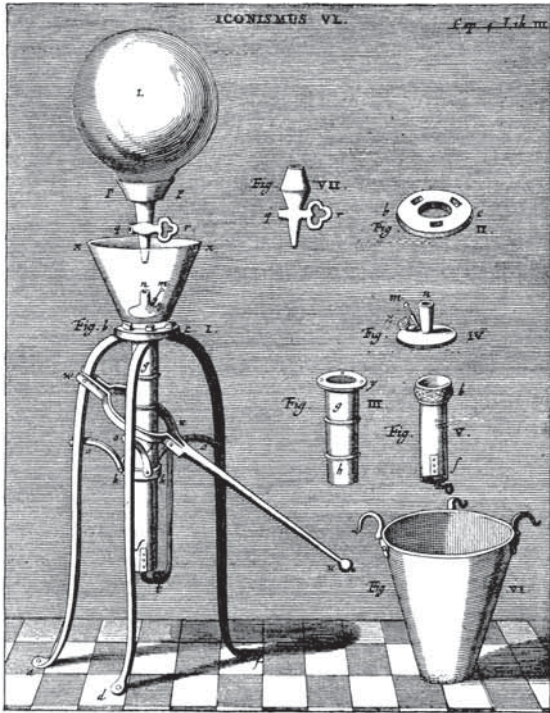


図 15. ゲーリケ第3型のポンプ
『マグデブルクの新実験』より

まん中の内側か下側に革製の弁をとりつける。こうすればピストンを押し上げたとき、ガラス容器の中の空気や水が引き出されてポンプ gh に入ってくる。ピストンが上げられると、空気や水はバルブ z を通って外へ押し出される。水を入れる銅バケツ xx の縁を鉛の円盤 y のまわりにハンダづけする。ポンプ ygh はハンダづけしたバケツと一しょに、鉄の円盤 bc にあいている穴 e をとおって三脚の中にすえつける。このとき、3本の鉄のネジで鉛の円盤 y の端をしっかりと押さえつける。さらにポンプの下がガタつかないように、鉄の輪 kk を鉄のネジでポンプの中ほどにはめ、ここから3本の支持棒 ooo を出して、それぞれを三脚の中ほどに固定する。鉄のハンドル w を三脚の一つの点 w でとめる。最後に鉄の軸 ut をハンドルにとりつける。この軸は木製のピストン棒 sh から下に伸びている金具 t につなぐ。木製のピストン h をピストン棒 sh にはめ込む。こうやってポンプが作動するよう準備する。さらに空気がポンプの下やピストンの脇から入り込まないように深い銅製のバケツをもってきて、これを3本の支持棒 ooo の下にぶらさげ、中に水を入れる。こうしておけばポンプの下の部分 kk も、ピストン棒やそのほかの装置の部分も水でおおわれるので、空気が上や下から入ってこない。弁には真鍮製のばねがきっちりはめこまれているので、空気が抜かれていくと、ガラス容器の中の空気が少なくなって、空気がまだ残っているのに革製の弁を押し広げるだけの力がなくなってしまふ。そこでポンプのふた zmn にあるバルブ z と管 n の間に、小さな管 m をとりつけ、その中につまようじくらいの大きさの棒をさし込む。このつまようじを下に突っ込んで、内側にある革製の弁を広げたり閉じたりする。こうすれば、空気力だけでは弁を押せなくなっても、ちょっと弁を広げてやれば空気がポンプに引き込まれていく。

このポンプは第2型のポンプを引き継ぎながらも、ロッドを弁に変えたことによって、空気を迅速にけるようになった。そのうえ全体を小型化したことによって携帯が可能になっただけでなく、堅牢性も増し、扱いがはるかに容易になった。

8 . 吉川辰司によるゲーリケ第3型のポンプの復元

ゲーリケがブランデンブルグ選帝侯のために制作したこの第3型のポンプは、現在ミュンヘンにあるドイツ博物館

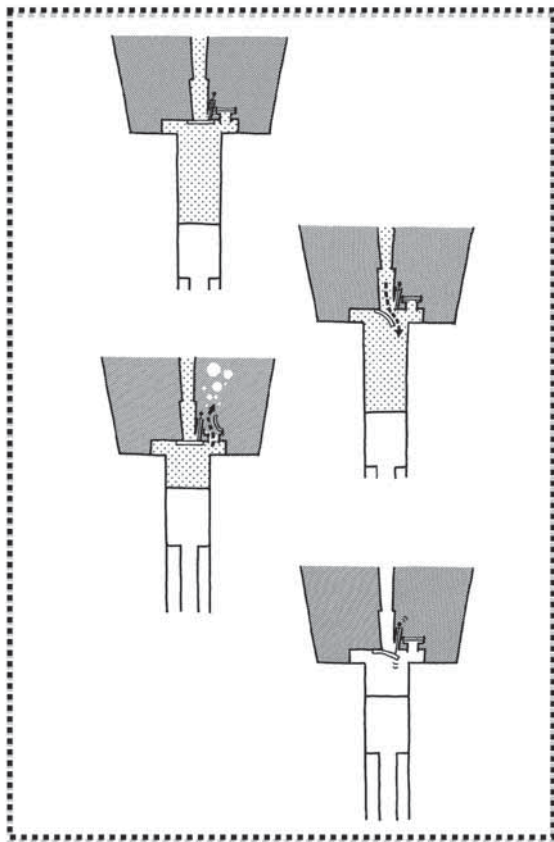


図 16 ゲーリケ第3型のポンプの操作

に所蔵されている。ゲーリケはこの型のポンプを少なくともあと2台制作しており、そのうち1台はスウェーデンのルンドに、もう1台はブランシュワイク市に保存されている。マグデブルク市にあるオットー・フォン・ゲーリケ博物館にはこのポンプの複製が所蔵されている。日本では2008年に日産科学財団の助成を得て、松野と吉川がこの型のポンプを複製した。すなわち松野がゲーリケ著『マグデブルクの新実験』に記載されているポンプの構造を解説し、吉川がその資料と原著の挿絵をもとに実際の制作にあたった。ドイツ博物館に所蔵されているゲーリケ制作のポンプはシリンダーの内径が60mm、長さ48cmなので、その容積は1356ccである。これに対して吉川が2008年に制作したポンプはシリンダーの外径が32mm、内径29mm、長さ30cmだったので、その容積は212cc。つまりゲーリケ自身が制作したポンプのシリンダーの容積はこのポンプの6.4倍あったことになる。

吉川はドイツ博物館に保存されている実物を見ることなく、ゲーリケの残した資料だけをたよりに復元に挑んだ。その結果はというと、試行錯誤を繰り返したものの、十分に機能するポンプを制作するのに成功したのだった。ゲーリケの説明は、それほど的確だったのである。フラスコをポンプに接続して梃子を引くと、フラスコから空気が抜かれる。梃子をあげると弁から空気が抜けて泡になって出てくるようすを見せることができる。しばらく梃子をあげさげしていると、しだいで出てくる泡が少なくなってきて、梃子のはねあげられるような感覚が手に伝わる。670ccの容量のあるフラスコをつないで実験を繰り返し試したところ、40回ほどのストロークで泡がほとんど出なくなった。その間わずかに3分たらず。フラスコの口を水槽に沈めてふたをあけると、約640ccの水が入ってきた。つまり95%の空気を抜くことができた。

このポンプに薄いガラスでできた四角のびんを接続して空気を抜くと、数回梃子を動かすだけで、ガラスびんは粉々に砕け散った。ゲーリケがレーゲンスブルグで行った実験を350年後に再現できたのである。この実験は2008年12月27日に、千葉県幕張で開催された〈大道仮説実験ワークショップ〉で、吉川辰司によって再現された。ポンプの直接の制作者ではない松野によっても同じ実験が試みられ、2009年7月26日、鹿児島県霧島市で行われた公開実験では失敗したものの、2009年9月27日鹿児島県奄美県立図書館で開催された〈ふしぎ探検塾〉では、120人の



図 17. 2007年12月27日 千葉，幕張での再現実験
操作しているのは制作者の吉川



図 18. 2009年7月26日 鹿児島県霧島市での公開実験



図 19. 2009年9月27日 鹿児島奄美大島県立図書館で
ゲーリケのポンプのしくみを説明

観衆の前でみごとに成功した。ゲーリケは第3型のポンプを複数制作しただけでなく、自分以外の者が実験を披露することを想定して、〈このポンプを使ってどんな順序で実験を見せればいいのか、その際、どんな点に注意すべきなのか〉についての指示書も残している。その意味では、奄美大島での成功によって、「ゲーリケの制作したポンプはその制作者がその場についていなくても、いくつかの実験を成功させることができるほど、扱いの容易なポンプだったこと」が証明されたといえる。

2009年10月には吉川によってほぼ実物大の複製ポンプが完成した。

【典拠文献】

- Kaspar Scott, *De Arte Mechanica -Hydraulico*, Helbipoli, 1657. カスパル・ショット『水気学の器械』1657年。
- Robert Boyle, *New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air, and its Effects*, Oxford, 1660. ロバート・ボイル『空気弾性論』, 1660年。
- Robert Boyle, *New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air, and its Effects*, Oxford, 1669. ロバート・ボイル『続・空気弾性論』, 1669年。
- Kaspar Scott, *Technica Curiosa*, Helbipoli, 1664. カスパル・ショット『新奇技術』1664年。
- Otto von Guericke, *Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio*, Amsterdam, 1672. オットー・フォン・ゲーリケ『真空空間についての(いわゆる)マグデブルクの新実験』, 1672年。
- Otto von Guericke's *Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den Leeren Raum, nebst Briefen, Urkunden und anderen Zeugnissen seiner Lebens- und Schaffensgeschichte*, übersetzt und herausgeben von Hans Schimank, und Mitarbeit von Hans Gossen, Gregor Maurach und Fritz Krafft, 1968.
- Schimank, H. "Die drei Luftpumpen Otto von Guericke's, eine bisher unbekannte Anleitung zum Experimentieren damit und eine ebenfalls bisher unbekannte Anweisung zur Wettervorhersage auf Grund barometrischer Beobachtung", *Wissenschaftliche Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft*, 13 (1961), S. 128-148.
- Caspar Scott, *Tecnica Curiosa*, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule „Otto von Guericke“ Magdeburg*, 30 (1986) Heft 1/2 Otto-von-Guericke-Ehrung der DDR 1986. カスパル・ショット『新奇技術』ドイツ語版。
- *The New (so-called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke*, translated and edited by Margaret G. Ames, 1994.
- 松野 修「ゲーリケの真空研究」『鹿児島大学生涯学習教育研究センター年報』第3号, 2006年。
- 松野 修「オットー・フォン・ゲーリケの研究過程とその特徴ーロバート・ボイルとの比較ー」『鹿児島大学生涯学習教育研究センター年報』第5号, 2008年。
- 松野 修「(ゲーリケの真空ポンプ)の誕生と復活」『たのしい授業』354号, 2009年8月所収。
- 吉川辰司「ゲーリケの真空ポンプの復元物語」『たのしい授業』354号, 2009年8月所収。
- オットー・フォン・ゲーリケ著, 松野修 訳・解説, 上園志織 挿絵『真空空間に関する(いわゆる)マグデブルクの新実験』NPO 法人楽知ん研究所刊, 2009年。

なお本文中に破線で囲った図は、松野が原文にあたり、上園志織とともに検討したうえで、上園志織が描いたものである。



図 20. 2009年9月27日 鹿児島奄美大島県立図書館でこの直後、実験はみごとに成功した



図 21. 2009年10月 吉川によって復元されたほぼ実物大のポンプ