

論

攷

オットー・フォン・ゲーリケの研究過程とその特徴

- ロバート・ボイルとの比較 -

鹿児島大学生涯学習教育研究センター 松野 修

1. はじめに

カスパル・ショット著『新奇技術』（1664年）には、ゲーリケがショットに宛てた12本の書簡が収められており、これらはハンス・シマンクらによってドイツ語に訳されている。「ショットがゲーリケの手紙を公にしてくれたおかげで、われわれはマグデブルク市長のアトリエをのぞくことができる。たとえばこれらの書簡によって半球の実験が行われた日付を正確に知ることができる」とシマンクが書いているように¹、この書簡を整理すればゲーリケの研究過程を追跡できる。そのうえで、ロバート・ボイル著『空気弾性論』（1660年）とオットー・フォン・ゲーリケ著『マグデブルクの新実験』（1672年）を比較すれば、同時代に活躍した2人の研究者が真空実験に関してどのように影響しあったか明らかにできる。

2. ゲーリケの研究過程

1654年、ゲーリケがレーゲンスブルグの帝国会議の折りに披露した実験はつぎの10種類だった。すなわち、(1) ポンプを使ってガラス容器から空気を抜く、(2) 空気を抜いた容器は空気が入っている時よりも軽くなることを示す、(3) 空気を抜いた容器を水に沈め、栓を開けて水が勢いよく入ってくることを示す、(4) ポンプを使って容器から水を吸い出す、(5) 銅の玉を使って容器から水と空気を吸い出す、(6) 四角いガラス容器から空気を抜いて破裂させる、(7) 空気を抜いた容器の栓をいっきに開けて空気を急激に入れる、(8) 容器から急に空気を抜いて風、霧、雲を発生させる、(9) 火を灯したロウソクを空気を抜いた容器の中に入れて、火を消す、(10) 水は空気を抜いた管の

中を高く昇っていくことを示すの10種である²。このうち(8)と(9)を除けば他はどれも大気の圧力の大きさを示すための実験である。

ゲーリケはレーゲンスブルグから帰ってから、大気の大きさを示す実験の改良に努めていた。ゲーリケがこれと並行して新しく取り組んだのが、〈知的な楽しみのための実験装置〉の製作だった。これは2つの大きなガラス球を管でつないだもので、それぞれの管には栓がつけられている。片方のガラス球から空気を抜いてから順次いくつかの栓を開けたり閉めたりすると、ガラス球の中に水を導いたり空気を入れて水を追い出したりできる³。この装置は『新奇技術』（1664年）には載せられていないが、装置自体は1656年末には完成していた。

〈2つの銅の半球を合わせて空気を抜き両方から馬で引く〉という実験にも、レーゲンスブルグから帰ってすぐに手をつけている。この実験のアイデアは1656年7月の手紙に現れているが、実験そのものは翌1657年にマグデブルクで初めて行われた。このときには直径約30センチの半球を使って12頭の馬で引かせている。さらに5年後の1661年夏にもマグデブルクでこの実験を行った。このときにはもっと大きな直径40センチの半球を使っている。この半球をはじめ6人に、つぎに8人の男に引かせた。さらに4頭、8頭、12頭、16頭としだいに馬の数を増やしている。ゲーリケはこれとは別にほぼ約50センチもの大きさの半球を製作している。1663年にはベルリンの宮廷で実験を披露したときには、左右から合計30頭もの馬で引かせたといわれている⁴。

できるだけ大がかりな実験をして見せるという姿勢は他の実験にも共通する。〈大勢の男にシリンダーに結んだロー

¹ Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den Leeren Raum, nebst Briefen, Urkunden und anderen Zeugnissen seiner Lebens- und Schaffensgeschichte, übersetzt und herausgegeben von Hans Schimank, und Mitarbeit von Hans Gossen, Gregor Maurach und Fritz Krafft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1968. Quellen und Dokumante zur Geschichte von Otto von Guericke's Leben und Forschen, S14. シマンク編のこの著作は『マグデブルクの新実験』の初めてのドイツ語全訳というだけでなく、ゲーリケの研究過程を知る上で不可欠な資料がいくつも収録されている第1級の研究書である。次の註にあるフリッツ・クラフトの解説もこの著作に収められ

た資料が元になっている。

² Fritz Krafft, 'Otto von Guericke in seiner Zeit, Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den Leeren Raum, herausgegeben von Fritz Krafft, 1996, S.LVIII.

³ Otto Von Guericke, *Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio* (Amsterdam, 1672), マーガレット・エイミスによる英訳本 Otto von Guericke, *The New (so-called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke* translated and edited by Margaret Glover Foley Ames, 1994, pp. 145-151.

⁴ Fritz Krafft, *op.cit.*, S.LXV.

ブを引かせる)という実験を思いついたいきさつについてはゲーリケ自身が説明している。レーゲンスブルグでゲーリケは〈四角のびんから空気を抜いて破壊する〉という実験を披露した。この実験が終わったところで、彼は「人が空気を抜いた容器に口をつけようものなら、あっという間に命を落としてしまう。というのも外側の空気の重さのために、人間や動物の体の中から空っぽの容器へ息が押し込まれるだけでなく、内臓そのものもズブズブに引き裂かれてしまうからです」と説明した。けれどもこのときの見物人たちに容易には信じてもらえなかった。

「わたしが政務にたずさわっていたころ、1654年にレーゲンスブルグで開かれた帝国会議に出席したことがあります。わたしはここでいくつかの実験を参加者に披露しました。このときには光栄にも故神聖ローマ皇帝フェルデナンド III 世閣下、ならびに故ローマ王フェルデナンド IV 世閣下からも、実験を見せてくれるようお願いされました。わたしは実験をはじめにあって、『もし人がこの容器に口をつけたりしたら、たちまち命をうばわれるでしょう』と説明しました。すると皇帝陛下の侍従長であったアウエルブルグ侯爵は『こんな容器でそんなことがほんとうに起こるのかね。この両目で確かめるまではそんなことはとても信じられない』と、わたしの説明に納得していただきませんでした。そのときには、わたしにとってはまちがいないと思われることでも、他の人にははずぐ信じられず、疑いをひきおこすこともあるのだと考えなおし、わたしの考えが正しいことを証明する方法はないものかとずっと思案していました。そしてその結果、わたしはべつの方法でもって、わたしの考えが正しいことを証明してみせることができるようになりました。この方法なら20人でも30人でも、(おのぞみなら)50人でも100人でもガラスの容器で引きよせられます。地面にたたきつけることだってできます」⁵。

そこでゲーリケが考えだしたのが、大きな円筒形のシリンダーから空気を抜き、ピストンにつないだロープを引っばらせて力比べをするというアイデアだった。これなら人間が空気を抜いた容器の中にひきずり込まれるようすを見せることができる。この実験は1660年夏に試みられている。

この年の夏には、〈半球をがんじょうな支柱にぶら下げ、おもりをつけて引き離す〉という実験も試みている。『マグデブルクの新実験』ではこの実験について、「わたしは

前の章で説明したように『もっと大きな半球を作ったらどうなるだろう』と想像しただけでなく、『この半球におもりをつけて落としたら、カノン砲を発射したときのような大きな音がするのではなかろうか』とも考えました。そこでわたしはこの半球をいつものようにしつらえて、空気を抜きました」と説明されている⁶。半球が分かれたとき大きな音がするように工夫していたのである。さらにこのときには、〈少年にポンプを引かせて重いおもりを持ち上げさせる〉という実験も試みている。

こうしてゲーリケは、マグデブルクに帰ってきてからいろいろな実験を考案しては街の人びとに披露していた。この時期のゲーリケの関心は大気の圧力の大きさを効果的に示すことにあったといえる。半球や円筒形のシリンダーから空気を抜いて大気圧の大きさを示すにしても、ポンプの性能が劣ってれば不確かな効果しか生み出せないはずである。それなのに、これらの大がかりな実験は少なくとも初めはみなきわめて不十分な性能しかないポンプを使って行われていたのである。ゲーリケが真空ポンプの改良に乗り出したのは、ボイルの研究が発表されその情報がゲーリケのもとに届いてからだった。

3. ボイルの研究過程

ゲーリケと比較すると、同じ真空ポンプを使ってもロバート・ボイルの行った実験は非常に多岐にわたっていたことがわかる。1657年にショットの『水気学の器械』が発表されると、ボイルはこれをヒントに自ら真空ポンプの製作にのりだした。このときの事情は『空気弾性論』の「まえがき」でつぎのように説明されている。

「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のかお話ししよう。わたしたちが英国で別れる前に、わたしは1冊の本を手に入れたのだった。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スズ会士、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。というのもこの実

⁵ Otto von Guericke, *The New(so-called) Magdeburg Experiments*, p.169.

⁶ *Ibid.*, pp. 165-166.

験なら、空気のひじょうに大きな力（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、そ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」⁷。

ボイルは以前からトリチェリの実験を追試していた。けれどもショットの『水気学の器械』を読んで、ポンプを使って空気を抜くことができることを初めて知ったのだった。これはボイルにとって重要なヒントだった。密封したシリンダーからピストンを抜くときにはきわめて大きな力が必要となる。けれどもポンプを使って真空が作り出せるという確信がなま、半信半疑でピストンを引いては実験は成功しないからである。じっさいゲーリケから装置を譲りうけたショットがヴェルツブルグで追試を試みたときに、ある程度以上はピストンを引けなくなると勘違いしてしまっている⁸。ボイルは『水気学の器械』で紹介されていたポンプをもとに、ハンドルと歯車を使ってピストンを引きやすくする、容器の中に実験材料を入れられるようにするという2点の改良を施した。『空気弾性論』の「まえがき」にはこう説明されている。

「いまわたしたちが問題にしている器械についても、これを詳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（こっちのほうがもっと重大なのだが）は、〈空気を抜きだすガラス容器〉がひとつにまとまった一体構造になっていて、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。なんどか失敗したのち、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っ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。それはそんなにむつ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ど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くつ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しっくいベースにした、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」⁹。

こうしてロバート・フックの協力を得て完成したのが、ボイルのポンプだった。『空気弾性論』には、このタイプのポンプを使ってなされた実験が全部で43種類報告されている。ボイルがこのとき試みたのは、大気圧の大きさを示すことだけではない。水や水銀に含まれる微細な空気の泡の原因（実験22-23）、物質の燃焼と空気の関係（実験10-14）、生物の生命維持と空気の関係（実験41）、真空中での磁力の作用（実験16）、真空中での音の伝播（実験27）、毛細管現象と空気の関係などなど（実験35）、実に多様な実験が試みられている。

たしかにボイルも比較的大きなガラス球を使って実験をすることがあった。しかしそれは視覚的な効果を求めたからではなく、そのほうが実験の遂行に適していたからにすぎない。ボイルの装置では、空気を抜いたガラス容器に少量の空気が絶えず侵入してきた。したがってガラス容器の容量を小さくすれば扱いが容易になるとはいえ、わずかな空気の侵入のために、しばらくすると真空度が極端に落ちてしまう。その点、容器が大きければ多少の漏れがあってもしばらくは高い真空度を保つことができる。ボイルは実験によっては小さな容器を意識的に使うこともあった。ポ

⁷ Robert Boyle, *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects*, 1660, *The Works of Robert Boyle*, edited by Michael Hunter and Edward B. Davis, Vol.1, 1999, pp.158-159.

⁸ Otto von Guericke, *op.cit.*, p. 187.

⁹ Robert Boyle, *op.cit.*, p.159.

イルのポンプを操作するには、(1) ピストンを引いてシリンダーの中を真空にする。(2) シリンダーとガラス容器をつなぐ栓を開けて、ガラス容器の空気をシリンダーに導く。

(3) この栓を閉めて、シリンダーについている別の栓を開け、ピストンを押し上げてシリンダーの中の空気を追い出す、という手順を踏む。このとき、ガラス容器がうんと小さくてシリンダーの容量ほどであれば、(2) の操作のときに、1回のストロークだけで容器を急激に真空にできる。こういう操作が望ましいときには、あえて小さなガラス容器を使っている。つまりボイルにとって実験器具の大きさは、ゲーリケのように視覚的な効果のためではなく、実験の条件によって選択されていたにすぎない。

ボイルはまた真空ポンプを自ら製作した当初から、この装置でもって空気を完全に抜き出せるかどうかに関心を持っていた。真空の存在そのものが必ずしも広く認められておらず、このポンプを使った実験によってそのことを証明しなければならぬ立場にあった者としては、それは当然の態度だったともいえる。『空気弾性論』「実験17」では、特にこのことが主題になっている。

「トリチェリの実験では、管の中の水銀は管を傾けてもふつうは液面から約27ディジットの高さで止まることが知られています。水銀がそれより下に降りてこないのは、その地点の高度では〈管の中の水銀柱〉と〈水銀の液面から大気のいちばん上にまでつながっている空気の柱〉がつりあっているからです。もしそれがほんとうの理由なら、この実験を大気の外で行ったら、管の水銀は容器の液面まで下がってくるにちがいありません。このときには、水銀の重さに抵抗する力はまったくのゼロになるのですから。だからわたしは（当然にも）こう考えました。この実験をわたしたちの装置の中でやることができれば、水銀柱はガラス球の外で27ディジットの高さがあったとしても、空気を抜くにしたがって水銀はそれより下がってくるにちがいないと」¹⁰。

これは「真空中の真空」として知られている実験である。けれどもこのときには、ボイルらの努力にもかかわらず、トリチェリ管の水銀を容器の液面まで下げることはどうしてもできなかった。その結果についても正直に記録されている。

ボイルは1659年の冬の間、空気漏れのするこの不完全なポンプを使って実験を続け、1660年にその結果を報告した。しかしその時点ではすでに、もっと新しいタイプのポンプを製作していた。ボイルは『空気弾性論』の「結論」にこう書いている。

「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。おそろ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」¹¹。

ここで言及されているポンプが、はたして1669年の『続・空気弾性論』に掲載されているものと同じかどうかは明らかではない。しかし少なくとも1669年に発表されたポンプはシリンダーとピストンを水中に沈めるもので、「真空中の真空」を完璧に実現する性能を備えていた。ボイルはこの実験を『続・空気弾性論』の冒頭で紹介している¹²。

4. ボイルがゲーリケに与えた影響

ゲーリケがポンプの改良に着手したのは、ボイルの『空気弾性論』の出版後だった。彼がポンプの改良にふれてるのは1662年2月28日の手紙が最初で、その後1662年5月10日の手紙で「ボイルのポンプは接合部を水で塞いでいないから空気漏れをおこすだろう」と指摘している。じつはこの時点で、ボイル自身はすでにその点について改良を施していた。

ゲーリケは自らのポンプの改良ののち、「真空中の真空」の問題にはじめてとり組んでいる。このときボイルとはちがって水銀ではなく、水を使って装置を組み立てているが基本的には同じしくみである。この報告は1662年4月15日の手紙でなされている。この実験を通じてゲーリケは水の中に細かい空気の泡が隠れていること、空気を抜くと圧力が減るので大きな泡になって出てくることを「発見」し

¹⁰ *Ibid.*, pp.193.

¹¹ *Ibid.*, pp.146-147.

¹² Robert Boyle, *Continuation New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects*, 1669, *The Works of Robert Boyle*, edited by Michael Hunter and Edward B. Davis, Vol.6 1999, pp.46-47.

ている。このことはゲーリケにとって、単に規模の大きな実験をするだけでは到達できない、重要な意味を持っていた。地球上の水面のみならず、地表の奥深くからも、地上のさまざまな物体からもたえず発散物が放出されている。けれどもそれらは大気の強い圧力に遮られて、ふだんは認識されていないのだ。しかし容器の中を真空にすると水中からも、金属からも、ガラス容器の内側からも発散物が放出されるようすを観察できる。そしてこれこそが、地球をとりまく大気は地球そのものから放出される発散物のあつまりであることを示す有力な証拠であると考えられた。

「じつは水だけでなく、ガラスからも小さな泡が出ているのです。これらいろいろなものから出てくる物質的な発散物こそが空気の正体なのです。つまり空気とはすべての物質から出てくる物質的な発散物のほかならないのです。ひとことでいえば、すべての物質はそれぞれじぶんに特有な発散物をもって、水だけでなく、ガラスも、金属も、そのほかすべてのものも、じぶんをとりまく空間にこの発散物を放出しているのです」¹³。「空気とは水や大地、そのほかの物質から、まわりの空間に流れ出る〈物質的な力能〉のことです。いいかえると空気とは〈水、土、そのほかの物理的な実体から発散され、放出された発散物〉以外のなものでもありません」¹⁴。

そしてもし、大気は地球そのものから放出された発散物であるなら、大気は地球を薄く覆うマントのようなものであるにすぎない。それぞれの星が自らの発散物である大気をまとっているとしても、それら星と星との間にある広大な空間には、なんらの放散物も存在もせず、そこには完全な真空が広がっていることになる。じつは、これこそがゲーリケが主張したかったことだった。

5. 2人の研究の特徴

ゲーリケの研究をボイルのそれと比較したとき、その現代的な意義はどこにあるだろうか。ボイルは真空ポンプの可能性に着目するやいなや、ただちに多様な実験に着手した。ボイルは「この装置がうまく作動することがわかったとき、わたしはすぐにいろいろな実験を考えつき、わずか

1時間半のうちにそれをメモに書きとめた」と「あとがき」に書いている¹⁵。そんなにもすぐに多くのアイデアがわいてきたのは、それまでに豊かな研究蓄積があったからである。空気ポンプの可能性が見えたことによって、それまで証明できなかった仮説が一気に検証できる見通しがついたのだった。

ボイルはまた、ひとつひとつの実験をするについても何度も条件を変え、ひとつの結論を導くまでに行くとおりの証明の手順を踏んでいる。たとえば空気を抜いた容器の中でブタの膀胱が膨らむのは、まちがいに膀胱の中にある空気のせいであることを証明するために、空気を少しだけ入れて口を縛った膀胱、口を縛らないままの膀胱、しっかり空気を抜いてから口を縛った膀胱を用意し、この3つを同時のガラス球に入れて空気を抜いている¹⁶。

ボイルの実験ははじめから精密な計測を目指したのもであった。たとえばボイルは圧縮されていない空気は何倍まで膨らむかを、膀胱、小さなガラス球、ガラス管を使って計測している¹⁷。また、容器から抜かれる空気の量とそれによっても下がる水銀柱の高さに注目して、その関係を調べようともしている¹⁸。この計測は、『空気弾性論』第2版で、いわゆる「ボイルの法則」として定式化された¹⁹。さらにポンプそのものの改良についても、はじめから大きな関心を持っており、初めてのポンプの製作してから2年目には少なくとも次世代のポンプを製作にとりかかっていた。

ボイルのこうした周到な研究に比べれば、ゲーリケの研究はいかにも〈しろうとの技〉という印象を免れない。ポンプの改良についていえば、ボイルの研究が発表されるまでゲーリケは関心を払っていなかった。ボイルの研究を知ってからポンプの改良に乗り出したが、このときにはすでにボイルとホイヘンスは緊密に連絡を取り合いながら、空気ポンプで完全な真空を作るための開発競争にのりだしていた²⁰。

ゲーリケは研究の情報についても立ち後れていた。たとえばゲーリケは、「大気の圧力の大きさを知ったのは1657年だ」と書いている。この年たまたま〈知的な楽しみごとのための装置〉を操作していて、ある見物人の質問をき

¹³ Otto von Guericke, *op.cit.*, p.128.

¹⁴ *Ibid.*, p.111.

¹⁵ Robert Boyle, *New Experiments Physico-Mechanical*, 1660, *The Works of Robert Boyle*, Vol.1, p.299.

¹⁶ *Ibid.*, p.175.

¹⁷ *Ibid.*, p.178.

¹⁸ *Ibid.*, p.193.

¹⁹ Robert Boyle, *A Defence of the Doctrine Touching the Spring and Weight of the Air and An Examen of Mr T. Hobbes his Dialogus Physicus De Natura Aeris*, 1662, *The Works of Robert Boyle*, edited by Michael Hunter and Edward B. Davis, Vol.3 1999, pp. 57-65.

²⁰ Steven Shapin and Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pomp*, 1985, p.237.

かけに水柱の高さを計測したのだという。しかし大気圧の大きさを計測したトリチェリの実験は1643年には行われていた。その結果は1663年まで公刊されなかったとはいえ、1647年にはメルセンヌが『物理数学的考察』でトリチェリの実験の概要を報告している。翌1648年にはパスカルの『流体の平衡に関する大実験談』も刊行されていて、ピュイ・ド・ドームでの実験報告もなされている。むろんボイルはこうした情報をつかんでいた。それなのに、1657年になって初めて独自の観測によって大気圧の大きさを知ったというのはいかにも遅い。

ゲーリケの研究過程を整理してみると、ゲーリケの関心は少なくとも当初は大気圧の大きさを効果的に示すことにしぼられていたことがわかる。ゲーリケはボイルの研究に影響されるまでは、ひたすらこの点にだけに力を注いでいたといってもよい。大きな銅の半球を使ったみごとな実験は劇的ともいえる効果があった。この実験の目的は大気圧の正確な大きさを示すことではなく、見物人たちの視覚に訴えて大気圧の圧力の大きさを想像させることが目的だった。いっぽうの鎖の端を固定せず、わざわざ両側から馬で引かせたのも同じ効果をねらったことだったろう。視覚的な効果をねらうのなら銅の半球はできるだけ大きくするのが望ましい。16頭もの馬で左右から引かれた半球が大きな音とともに分かれるのを見た人たちは、大いに驚いたにちがいない。インパクトのあるこの実験は事実、のちの時代までマグデブルクの実験として語りつがれている。少年がポンプを操作するだけで重いおもりを持ち上げる実験にしても、20人もの男たちが引くロープが引きずりこまれる実験にしても、何らかの法則や概念を証明するための実験というよりも、むしろ祝祭的な見世物としての要素が多い。そしてそのことこそがゲーリケの研究の魅力なのである。

〈知的な楽しみごとのための装置〉は大気圧の存在そのものを教えるための優れた教材だった。2つのガラス球の中を水が行き来するとしても、それでもって真空について何か新しい事実が発見されるというわけではない。「わたしはこの装置を前に述べたようにして組み立てて書斎の机に置き、知的な楽しみごととしていろんな実験をくりかえしてやっていました。友人だけでなくこういう実験に関心をもっている人たちや、興味深そうに集まる見物人たちにも見せていました」と楽しげに書かれているように²¹、こ

の装置はゲーリケが執務する市長室に設置され、機会あるごとに来客たちに披露されていた。空気の圧力に応じて水があがったりさがったりするようすを見るのは、当時の人びとにとってさぞかし興味深かったことだろう。ゲーリケの研究を特徴づけているのは、まさにこうした教育的な効果を意識的にねらっていた点にある。

ゲーリケが〈しろと〉を対象に公開実験を行うことを想定していたことは別の資料からも指摘できる。ゲーリケは携帯できる高性能なポンプを少なくとも3台製作していて、それを各所に寄贈していた。しかもこのポンプを使ってどういう順序で実験を見せるべきかについてもメモを残している。

そのメモには、「まずは大気の性質について、見物人たちにつぎのように概略を説明せよ」とある。そのうえで実験の手順について「まず大きなガラス球を天秤に吊して鉛のおもりとバランスをとる、つぎにガラス容器を天秤からはずし、大きな桶の上に置いてから中の空気を抜く」などと細かな指示がある。しかも「もし空気を抜くのに時間かかるようなら、その間に硫黄玉の実験やショットの本に出ているほかの実験を見せよ」とも書かれている。観客が退屈したらどうしたらいいのかについてまで説明しているのである。さらにこのメモには、「四角いびんから空気を抜いて破裂させよ。もし破裂しなかったときには帽子をかぶり、万一びんが割れても破片が目飛びこまないようにしてからびんをはずせ」と、実験が失敗したときの対処の仕方も指示されている。これは自分が行った実験の記録でもなければ、その実験を再現するためのメモでもない。自分以外の者が観衆を前に実験を演示してみせる場面を想定し、そのとき教師役を務める者に与えたシナリオである。ゲーリケは自分以外の者でも同じように実験を再現できるよう、教具と教材とをセットにして準備していたのだ。しかもシマンクによれば、このメモはドイツ語で書かれた最初の科学論文だとのことである²²。

ゲーリケが真空ポンプを使って実験をしていた時代は、真空の存在そのものが疑われていた時代だった。ゲーリケは巨大な実験装置を使って宇宙空間のようすや、ふだんは気がつかない大気圧の圧力の大きさを人びとに伝えようとしていた。彼は大学教授ではなかったし聖職者でもなかった。忙しい政務に携わりながら、楽しみごととしての科学を街

²¹ Otto von Guericke, *op.cit.*, p. 149.

²² Schimank, H., Die drei Luftpumpen Otto von Guericke's, *Wissenschaftliche*

Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft 13 (1961), S. 143.

の人たちと共有しようとしていたにすぎない。彼にとって科学研究とは、街の人びとを相手にした科学教育と同じ意味を持っていたのだった。

6. 資料1 ゲーリケの書簡

ゲーリケからショットへの手紙は、シマンク編の *Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den Leeren Raum, 1668*, (以下 *Quellen* と表記) にドイツ語訳が所収されている。以下ではこの資料に基づいてゲーリケの研究過程を整理する。

(1) 真空ポンプの改良

ゲーリケは 1654 年レーゲンスブルグでの公開実験以後も、『水気学の器械』で紹介されているポンプ (タイプ I) を使っていたと考えられる。ゲーリケがポンプの改良に乗り出したのはボイルの研究に刺激されたからだった。ゲーリケは 1662 年 2 月 28 日の手紙で、ボイルの『空気弾性論』にふれ、「イギリスのやり方では時間がかかるうえに、空気の漏れを防ぎえない」と指摘したあと、容器の栓の部分にバケツで覆いをして水で満たしたことで、シリンダーとピストン全体を水に浸して空気が漏れないようにしたこと、1 階と 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ことなどを挙げて、自分のポンプにいくつかの改良を加えたと報告している。

ゲーリケがここで言及した巨大なポンプ (タイプ II) は『新奇技術』に挿絵がある。「ショットへの手紙の解説 1」でこのポンプの説明をしている。ここで注目すべき点はシマンクも指摘しているように、ゲーリケが空気を水のように考えていて、そのため容器の下にポンプを置くように指示していることである。しかもボイルにならって「空気が抜かれるのは弾性があるからだ」と説明している当の文章の中で、そのことに気がついていないかのように書いている箇所がある²³。

「空気はその重さのために容器からポンプに降りてくる」という説明は、『マデブルクの新実験』第 3 巻第 36 章にも残っている。ゲーリケは「この容器の中でいったいどうやって真空が作られるのだろうか？ それは容器の中で、いっきに同時に作られるのだろうか？ それとも容器のある部分からべつ部分へと、少しずつ真空になっていくのだろうか？」というショットの質問に答えて、「容器から

だんだん空気が抜かれていくのです。空気には自分で膨らむ性質があるために、そして空気自身の重さのためにこうなります (ですからご覧のように、ガラス容器を上におき、ポンプをそれよりも下におくのです)」と答えている²⁴。このことから逆に、第 3 巻第 36 章の原稿は、かなり早い時期、1662 年前後に書かれたことをうかがわせる。

1662 年 5 月 10 日付の手紙では、ボイルと自分のポンプのちがいははっきりと説明している。「ロバート・ボイル氏の『物理器械の実験』についていえば、貴殿がわたしに実験のやりかたについての説明を書いて送っ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おりました。それについてのわたしの考えを述べるなら、氏のやられたような方法でもって空気ポンプで真空を作りだそうというのは、まったく適切ではないと申し上げるべきでしょう。というのも、第一にそれは水の中に沈められていないからであり、第二に歯車を使ってはとうてい素早く仕事を終えられないからです。このことについてボイル氏自身もつぎのように認めています。『わたしたちがどれだけ慎重にやっても外の空気がすばやく侵入してしまうので、わたしたちはさまざまな実験をしようとして何度も裏切られる試みを繰り返した末に、とうとうこのガラス容器を使うのを断念せざるえませんでした。そのかわりもっと大きな容器を用意して、これでもって新たに実験をはじめることになりました』と。わたしの作った装置ではそんなことはまったく生じません。このポンプについては貴殿に送った前の手紙に概要を示したとおりです。わたしはガラス容器、銅の球、そのほか似たような容器を真空にし、その後 3 か月以上にわたってそのまま保管したことがあります。貴殿にもお知らせしたように、わたしはしっかりと環でしめただけで、銅製の半球を何週間にもわたって真空のままに保つことができます」²⁵。

ゲーリケは『水気学の器械』の挿絵でもポンプを水に沈めて使っていたが、1662 年にはポンプをもっと大きくし、ポンプ全体と容器の接合部を水で覆うようにした。

『マデブルクの新実験』に挿絵のあるタイプ III のポンプについては、こう説明している。

「わたしはポンプの上と下を水でおおう仕組みにした、いろんなタイプの実験装置を作ってみました。カスパー・ショット師は、はじめこの実験装置を『水気学の器械』で

²³ *Quellen*, S.36.

²⁴ Otto von Guericke, *op.cit.*, p. 188.

²⁵ *Quellen*, S.40.

紹介し、のちに『新奇な技術 - マグデブルクの新実験』でもとりあげてくれました。わたしの尊敬する偉大な指導者、ブランデンブルグ選帝侯閣下は、もったいなくも(シヨット師が「マグデブルクの新実験」と名づけた)これらの実験をぜひともご覧になりたいとおおせになりました。けれども初期のタイプのポンプは持ち運ぶのがとても不便だったので、わたしはつぎのような新しいモデルを設計しました²⁶。このタイプⅢのポンプは、1663年9月にベルリンに送られたことがはっきりしている。このポンプは1663年12月にベルリンの宮廷での公開実験で使われた²⁷。

(2) 大気圧の大きさを示す実験

ゲーリケは大気圧の大きさをいつ知ったのだろうか。1656年7月11日の手紙では、「空気を抜いたガラス容器になぜ空気がはいるのか?」という質問に対して、ゲーリケは「それはまわりの空気の重さのためだ」と答え、「その空気の重さは管にとじこめた水の柱の高さでわかる。そのためには30エレから50エレほどの長さ〔約15メートルから25メートル〕の管を用意して、それに水を入れればよい」としているものの、肝心の水柱の高さの値は示していない²⁸。1656年7月18日の手紙でも、大気圧の大きさを測定する問題に取り組んでいると告げているだけで結論には達していない²⁹。1656年7月22日には、空気の重さの値について、「もし1エレの直径の球から空気を抜けば1200ポンドの重さを持ち上げられる。これは計算からわかる」と書いている³⁰。ゲーリケはこの手紙の後半で、「わたしはつい最近、偶然にもわれわれの努力のためでなく、自然そのものによってスコラ学者たちが要求するとおりの真空を作り出すのに成功しました。この様子を貴殿にもお見せしたいものです」と書いている³¹。この記述は、〈容器の中を完全に真空にしえたこと〉ではなく、懸案の〈水柱の高さを測定できたこと〉を意味しているのだろう。ゲーリケはこの値をもとに大気圧の大きさを算出したにちがいない。とはいえ直径1エレの円にかかる大気圧の大きさは、後にはこの倍以上の値としているので、この時には件の水柱の高さを5メートル前後だと誤測していたと思われる。

水柱の高さを正確に確かめたことは1657年1月4日の手紙で報告されている。ここには「わたしは水柱の高さをレーゲンスブルグで確かめようとしたが、その正確な高さを測ることはできなかった。しかしこの実験をたった今行った。わたしの家の高さからすれば、その高さはほぼ20エレ〔約10メートル〕である」とある³²。5年後の1662年2月28日の手紙ではこのときの事情を説明している。「他の人たちが〈真空嫌悪〉のせいだと考えていることを、空気の重さのせいだと考えるようになったのはどうしてか」といえば、それは〈知的な楽しみのための実験装置〉で実験をしていたのがきっかけだった。このときある見物人に「容器の水はどこまでのぼるのか」と尋ねられたのだが、そのときわたしはその値を知らなかった。そこで管を伸ばしていったら20エレの高さで止まった。ところがこの水柱の高さは一定ではない。特に雨が降るときには1エレ近くも水柱が上昇するではないか。これを知って、「これは真空嫌悪のせいではない」と確信したのだと³³。

(3) いわゆる マグデブルク半球 の実験

〈銅の半球を合わせから空気を抜き、大きな力で引き離す〉という実験のアイデアは、かなり早くからあった。1656年7月22日の手紙には、「直径わずか5/8エレ〔約30センチ〕の半球でも男が8人がかりで引っ張っても離れないだろう。だとすれば、まるまる1エレの半球ならどんなことになるだろうか?」と書かれている³⁴。この実験の第1報は1657年8月4日の手紙にある。「わたしは以前、6人の男でもって半球を引き離せないだろうと貴殿に申し上げました。その後(少なからぬ費用と損失を免れなかったとはいえ)、次のようなことを経験することができました。つまり12頭の馬でもって、なんとか半球を引き離しえたのです。もし完全に空気を抜いていたら16頭の馬でも無理だったでしょう。けれども栓を開けたらなんなく半球を引き離すことができました」³⁵。

5年後の1661年12月30日の手紙には、「この夏に直径は3/4エレの半球を使って実験を行った」とあり、そのときのようすが詳しく書かれている。「まず、この半球を

²⁶ Otto von Guericke, *op.cit.*, pp. 118-119.

²⁷ Schimank, H., Die drei Luftpumpen Otto von Guericke's, *Wissenschaftliche Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* 13 (1961), S.128.

²⁸ *Quellen*, S.15.

²⁹ *Ibid.*, S.16.

³⁰ *Ibid.*, S.19.

³¹ *Ibid.*, S.20.

³² *Ibid.*, S.22.

³³ *Ibid.*, S.31. この話は『マグデブルクの新実験』第3巻第19章でもくりかえされている。

³⁴ *Ibid.*, S.19.

³⁵ *Ibid.*, S.22.

8人の男に引かせたが、分かれなかった。つぎに4頭の馬で引かせたがだめだった。馬の数を増やしたところ、半球にとりつけてあった鉄の環がとれてしまったので、補強しなおしてもういちど試した。8頭の馬で引き、つぎに12頭の馬で引いたがだめだった。16頭の馬で引いたらなんとか引き離すことができた。しかし実験で半球がゆがんで使えなくなった。この夏にほぼ1マグデブルク・エレの直径がある半球を作らせた。これなら20頭の馬でも引き離せないだろう。いつも馬を入手できるわけではないので、自宅の庭に支柱を立てて錘をつけて空気力を測定した。計算によれば2686ポンドになるはずだ」と³⁶。

ところで〈マグデブルク半球の実験〉は1657年にいちどマグデブルクで、1661年夏に再びマグデブルクで行われたことになっている。ところが『マグデブルクの新実験』第3巻第23章には、このときの実験について、タイプIIIのポンプでもって空気を抜いたかのように書かれている³⁷。しかしタイプIIIのポンプは1663年にベルリンの宮廷で使われたはずで、このときには30頭の馬で引いたとの記録がある。だとすれば、『マグデブルクの新実験』第3巻第23章に描かれている実験は、いったい、いつ行われたのだろうか？

(4) 完全な真空を作り出す実験

完全な真空を作り出す研究は、ポンプの改良後に試みられている。1662年4月15日/25日には「完全な真空状態を作りだそうとしているところである」と報告されているが³⁸、その成果は『新奇技術』にある図の解説、「ショットへの手紙の解説2」に収められている。

「Aは人の腕くらいの太さのあるガラス管で、長さは1マグデブルク・エレある。この端に鉛の栓cがついたふたBをがついている。そのまわりはもっと大きなふたDEで覆ってある。そのため栓cは水で覆われるので、ここから空気が漏れて管の中に入ることはない。これに栓E,Fをとりつける。Eは栓cを操作できるようになっている。FはGにつながっている。「まずDEまで水を注ぎ、栓Cも水に浸かるようにして2-3日そのままにしておいた。2-3日たつと上の部分に真珠の玉くらいの小さな空気の泡ができるので、装置をひっくりかえして水を数滴つぎ足し

た。「このガラス管をいつものように空気を抜いた銅球の上にすえつけてから、(栓をあけて)ガラスの中の水が半分くらいの高さになるまで、銅球に引き入れた。このときには前の実験のときのように小さな泡は出てこないで、水が静かに下におりてきた。「栓をしめてとりはずしたら、なんと！水の動きによって小さな泡がたくさんできた。ガラス管をさかさにしたりゆすったときにはガラスの内側のかべにあたって、石や棒をぶつけたときのような大きな音がした。それから突然、どういうわけかガラスにひびが入ってしまった」³⁹。

この説明は『マグデブルクの新実験』第3巻第7章の記述とほぼ対応している⁴⁰。

7. 資料2 「空気ポンプを使った実験を演示するための手引書」

ハンス・シマンクによれば、かつてマグデブルク市庁文書館にゲーリケの遺品として1冊の冊子が保存されていた。それは「1663年～70年までのゲーリケ実験と器具」という表題のもとに85葉のさまざまな大きさの文書が綴られていた。この冊子はいつ、誰が最後に製本したのか不明である。ただ一連の用紙には2つの異なったページ数が打たれていたため、元もとは別の文書がひとつにまとめられたことがうかがわれる。この冊子には、気圧人形のスケッチ、手紙の下書き、実験の実演のための手引書、ゲーリケ自身が書いた物理機械的な問題についてのメモなどが含まれていた。この冊子は第2次大戦の際、他の文書とともに消失してしまったが、幸いシマンクが1936年にその一部をコピーし、その内容が1961年に発表された⁴¹。この冊子に収められた「手引書」はゲーリケの『マグデブルクの新実験』ではなく、ショットの『新奇技術』を参照しているため、シマンクはこれは1664年～1672年の間に作成されたものだろうと推測している。ここにはゲーリケがボイルの研究から影響を受けたと思われる実験も記されている。以下、シマンクの論文からこの資料の部分を抄訳する。

* * *

(1) 大きなガラス球の使い方

(1) まず、大きなガラス球を天秤に吊して鉛の錘とバラ

³⁶ *Ibid.*, S.25.

³⁷ Otto von Guericke, *op.cit.*, p. 160.

³⁸ *Quellen*, S.34.

³⁹ *Ibid.*, S.40.

⁴⁰ Otto von Guericke, *op.cit.*, p. 123.

⁴¹ Schimank, H., *op.cit.*, S. 128-148. のち *Quellen*, 1968 にも所収。

ンスをとる。

- (2) ガラス球を天秤からとりはずし、台の代わりにする樽の上において空気を抜く。空気を抜くのに時間かかるようなら、この間に硫黄玉の実験や⁴²、ショットの本に出ている実験をいくつか見せるとよい。
- (3) ガラス球をふたたび天秤にかけて、どれだけ重さが減ったかを示す⁴³。
- (4) このとき、「このガラス容器に息を近づけたら、まわりの空気が吸い込まれるので、息が引き込まれて死んでしまう」と説明する⁴⁴。
- (5) ガラス球の下にある栓にガラスびんをつなぐ。ガラスびんのまわりは水で覆っておく。栓を少しだけ開けると空気が抜ける音が聞こえて、びんが割れる⁴⁵。
- (6) びんにひびがはいったらすぐに栓を閉めなくてはならない。びんが破裂するときの破裂音は大砲を発射したときの爆発音と同じで、これは空気が崩壊するためである。同じことはびんに火を近づけたときにもおきる。
- (7) つぎのことを心得ておくべきである。びんが破裂しなかったら、それはガラスが厚すぎるか、器具に正しく接続されていなかったか、あるいは栓から空気が漏れていたからである。びんが割れなかったら実験者は帽子をかぶり、万一びんが割れても破片が目には飛びこまないように用心してびんをとりはずすこと。
- (8) こういうときにはびんをとりかえたほうがよい。
- (9) 天秤からガラス球をおろし、樽の上に敷いた板に乗せる。ガラス球の背後に緑の布を置き、金属板でガラス球のまんなかを覆う。
- (10) 大きなガラス球に小さなガラス容器をつなぎ、すばやく回転させながら擦る。するといろいろな色の雲や稲光が出る⁴⁶。このようすをはっきり見せるには、少量の水をいったん球に入れてから外に出すとよい。するとガラスの面に金属板がしばらくはりつ

いたように見える。ガラス球の上の方には霧が現れ、下の方には風が強く吹くのがわかる。これによって雲や風やができる理由がわかる⁴⁷。

- (11) これらの実験を見せたあと、ガラス球をまた天秤にとりつけて、中がいっぱいになるまで空気を入れる。それから鉛の錘をとりつけてバランスをとる。

(2) 光、鳥、魚を入れる

- (1) 空気の入ったガラス球を天秤に吊して錘とバランスをとる。ガラス球を天秤からはずして桶の台に載せる。他の人に手伝ってもらいながら両手で栓を押さえゆっくり栓をあける（このとき決して急いではない）。それから金属板をはずして、開けた栓からロウソクを入れる。空気を抜いたらロウソクがどのように変化するか観察する⁴⁸。栓を開けると空気が中に入ってくるが外へは出ていかない。水がものすごい勢いでガラス球に入ってきて大きな音がする。このとき水といっしょに空気もガラス球の中に入ってくるので、たいそう驚く。
- (2) ガラス球をくぼみのある小さな板の上におき、その下に大きくて深いボウルを栓の下におく。すると水が勢いよく昇ってくる。手で栓を押さえ、水があまり勢いよくガラス球に入らないように用心すること。栓を半分くらいあけて空気がうまく入ってくるようにすると、大きな音を立てることができる。
- (3) ガラス球を小さな机からおろして桶の上におく。さっきのように栓と栓の取っ手をねじりはずし、その中に水と魚を入れてから好きなだけ空気を抜く。3回ほど空気を抜くと魚の目が頭部からとび出して腹を上にして死んでしまう⁴⁹。
- (4) ロウソクの代わりに鳥を入れてもうまくいく。しかし（ロウソクではなく）魚を入れるのはうまくいかない。鳥を入れたガラス球に、水を入れてから鳥を入れることもできる⁵⁰。ただし、もう一度またやる

⁴² 『マグデブルクの新実験』第4巻第15章参照。Otto von Guericke, *op.cit.*, pp. 227-231.

⁴³ 同上書、第3巻第21章参照。Ibid., pp.155-156.

⁴⁴ 同上書、第3巻第27章参照。Ibid., p.168.

⁴⁵ 同上書、第3巻第26章参照。Ibid., pp.167-168.

⁴⁶ 真空にした容器を回転させて摩擦する実験は『マグデブルクの新実験』には記載がない。ボイルは真空放電の現象に偶然気がついていて摩擦がきっかけになっていたことは知らなかった。『空気弾性論』「実験37」。Robert Boyle, *New Experiments Physico-Mechanical, The Works of Robert Boyle*, vol.1, pp.264-270.

ゲーリケは硫黄玉を摩擦して静電気をおこす実験をしているので、この事実に気づいていたのかもしれない。

⁴⁷ 『マグデブルクの新実験』第3巻第11章参照。Ibid., pp.136-137.

⁴⁸ 同上書、第3巻第12章参照。Ibid., pp.138-139.

⁴⁹ 同上書、第3巻第16章参照。Ibid., pp.143-144. 『空気弾性論』「実験41」ではウナギを使っている。Robert Boyle, *op.cit.*, p.290.

⁵⁰ 『マグデブルクの新実験』第3巻第16章参照。Otto von Guericke, *op.cit.*, p.143. 『空気弾性論』「実験41」ではヒバリ、スズメ、ネズミを使って詳しく実験している。Robert Boyle, *op.cit.*, pp. 274-275.

うとすればたいへん時間がかかる。鳥のとなりに時計をつるすこともできる。もういちど空気を入れなければ鳥は死んでしまう。ハンマーが鉄を打つ音やカチカチいう音はするけれども、済んだ音はしない⁵¹。ガラス球にピストルを入れることもできる。しかし空気の崩壊がおこらないので爆発音はしない⁵²。小さな昆虫をガラス球の中に入れて、どんな昆虫も飛べなくなる⁵³。魚から取り出した浮き袋は空気を抜いて真空にすると破裂する⁵⁴。

大小のガラス球は暖かい部屋に口をあけたまま置いておくこと。さもないとひびがはいってしまう。外が凍るような日にはポンプの装置から水を抜き出しておかなくてはならない。6月に「料理」を演じるには、水が冷たければ、少し暖めておかねばならない。さもないと非常にむつかしくて簡単にはこの現象はおきない⁵⁵。寒い季節には暖かい部屋の中でないとうまくいかない。

(3)注意

外が凍るようなときには、暖かい部屋の外ではガラス装置は使えない。というのも寒さのために接着剤が膨張して、接着剤がガラスにひびを入れるからであり、水が寒さによって膨張するからである。ふつうの寒さではそんなことはおこらないが、猛烈な寒さと暑さはものを膨張させるのである。

高い山や高い塔にある空気は軽くなっていることを見せたいときには、ガラスのフラスコを用意し、まず栓を開け、それから栓を閉めて、空気をとらえる。あるときわたしが高いところで栓をあけたら、反対に空気がガラス球の中に入ってきたことがある。これは高いところにある空気が、低いところにある空気より重かったからではなく、ちょうどそのとき強い風が吹いていたからである。わたしはそのときには、栓をもういちど開けて空気を捕まえ、それから栓をしめた。それを持って低いところで栓を開けたら、空気がフラスコに入ってきた。この実験は何度でもかんたん

に行うことができる⁵⁶。

⁵¹ 『マグデブルクの新実験』第3巻第15章参照。Otto von Guericke, *op.cit.*, pp.141-142. 『空気弾性論』「実験27」にも同じ実験がある。Robert Boyle, *op.cit.*, pp.229-230.

⁵² この実験は『マグデブルクの新実験』にはない。『空気弾性論』「実験19」では、真空容器の中で火薬に点火する実験が試みられているが成功していない。Robert Boyle, *op.cit.*, pp.189-190.

⁵³ 真空の容器の中に昆虫を閉じこめる実験は『マグデブルクの新実験』にはない。『空気弾性論』には「実験41」にある。Robert Boyle, *op.cit.*, p. 293.

⁵⁴ 『マグデブルクの新実験』第3巻第33章参照。 *op.cit.*, p.179. この実験は『空気弾性論』にはない。

⁵⁵ これは減圧沸騰を指していると思われる。『マグデブルクの新実験』はこの現象についてはふれていない。この現象は『空気弾性論』の最後、「実験43」に出てくる。Robert Boyle, *op.cit.*, p. 297.

⁵⁶ 『マグデブルクの新実験』第3巻第30章参照。 *op.cit.*, pp.175-176. この実験は『空気弾性論』にはない。