

## 18世紀前半までのヨーロッパにおける弾道学基礎理論について

Fundamental Theories on the European Ballistics until first half of 18<sup>th</sup> Century

但馬 亨 大阪大学等講師

Toru TAJIMA.

torutajima@07.alumni.u-tokyo.ac.jp

### 序論 ～18世紀中葉以前の研究史～

すでに[但馬 2009]等で論じたように、18世紀の弾道学研究の発展は、英国の技術者 B. ロビンズ(Benjamin Robins, 1707-51)とスイスの数学者 L. オイラー(Leonhard Euler, 1707-83)の研究を一到達点とするものであった。しかし、それ以前の研究の実態について未知の部分は多く、解明を要する部分は相当数ある。とりわけ、弾道学研究が解析的書き換えを経て、真の意味で「近代的」数理諸科学に統合されていく直前の状態を理解することは重要であるがまだまだ先行研究は少ない。したがって、まずはじめのステップとして、ヨーロッパ最大の陸軍国であったフランスにおいての弾道学研究になにか前段階として特筆すべきものはなかったか、フランス国立図書館(Bibliothèque nationale de France, BnF)やポアンカレ研究所附属図書館(Institut d'Henri Poincaré, IHP)等の所蔵調査を行い、そこから18世紀半ばの弾道理論の革命的变化に至るミッシングリンクを埋めるのが本研究の目的である。

### フランソワ・ブロンデルの研究 ～実務家の事例～

最初にとりあげるのは、数学者 F・ブロンデル(François Blondel, 1618?-1686)の研究である。彼はアカデミーや大学の中でのみ活躍する純粋数学の研究者ではなかった。彼の社会的地位として最も強調されなければならないのは、フランス王立陸軍の将校(maréchal)であったことであり、さらにはフランス皇太子(Dauphin)の数学教授を務めたという点である。同様なキャリアを歩んだ人物として、ほぼ同時代に生きたガリレオが真っ先に想起されるが、彼がメディチ家付きの個人家庭教師のポストに就くことを大学教授の地位に留まることよりも重視したという事実からも分かるように、国王や大貴族などの政治的に有力な勢力のいわゆる「お抱え」になることは、この時代の優れた研究者の第一のステイタスシンボルであり、ブロンデルの名声が同時代では他の研究者のなかで群を抜いていたことを示す事実である。

また、彼の研究の中身は先に述べたように純粋数学の範疇に留まるのではなく、築城術(fortification)と呼ばれる領域により大きな彼の貢献を残している。軍事技術者としてのエキスパートであったことが、軍事要塞の建築やパリ外延部にあるサンドニ門の構築等から明白に伺われよう。

彼の主著として、第一に扱われるのは『爆弾投擲の技法(*l'Art de Jetter les Bombes*)』(1669)、(新版 1685)である。この『爆弾投擲の技法』は以下のような「奇妙」な序文からはじまる。

おそらく、わたくしが閣下に爆弾投擲の技術についての試論を献上することは、少しばかり時代遅れなことかもしれません。というのは閣下が、ついぞヨーロッパに平和をお与えになったこの時代においては、砲術についての学問(*science*)はもはや喜びの戯れをなす以外に使われる由がないからです。少なくともわたくしは、わたくしの著作が閣下を不快なものとすることなく、幾分かの御愉しみをもってわたくしの著作でこの技術の法則をご覧になっていただけることを期待しております。閣下がたいへん有用にこの技術をそのご統治において役立たせていただき、閣下の勝利に役立つ、もっとも稚拙な道具のひとつとなりますことをお祈りいたします。<sup>1</sup> (*l'Art de Jetter les Bombes*, 1669.冒頭部分)

貴人へ献上する文体としては、きわめて控えめに書かれている平均的なものである。しかし、この内実にはブロンデルの認識する、当時のヨーロッパの政治情勢が色濃く刻印されている。というのは献上相手として敬われているのは、ブルボン朝最盛期の王であった、太陽王ルイ 14 世(*Roi-Soleil*)であり、彼の治世下でフランスは陸軍国としてヨーロッパ最強を誇っていたのである。いわゆるフランス型の絶対主義が完成した当世においては、ヨーロッパ諸国間の紛争も一段落しており、砲兵書の社会的必要性はまったくない。それほどまで、ルイ 14 世の治世は完璧を極めているという最大限の賛辞なのである。

さて、つづいて、この『爆弾投擲の技法』の実際の構成をより詳細に分析してみる。著作の構成は以下の 4 部に分かれている。

1. 弾道学についての先行研究（ガリレオ、トリチェリ等イタリアの水平投射運動の紹介）
2. 臼砲などさまざまな弾頭の投擲法、ならびに正弦表、器具、比例コンパスなどを利用した照準決定。
3. 軌道を決定するための基礎理論
4. 3 で述べた事項への反論についての弁護

注目すべき点は、第 3 部がもっとも数学的・理論的分析に充てられているという点である。水平投射とパラボラ曲線の描画などは存在するが、先行するガリレオの研究、さらには直

---

<sup>1</sup> Peut-être que je viens un peu hors de saison, offrir à Votre Majesté, ce *Traité de l'Art de jeter les bombes*, dans un temps où Elle vient de donner la paix à l'Europe et où il semble que la science de l'Artillerie ne doive plus être employée qu'à faire des feux de joie. J'espère néanmoins que mon ouvrage ne lui sera pas tout à fait désagréable et qu'Elle y verra avec quelque plaisir les règles d'un Art dont Elle s'est si utilement servie dans ses conquêtes et qui n'a pas été un des moindres instruments de ses victoires.

近のトリチェリ、メルセンヌの弾道理論以上の付加価値は認められない。しいていえば、その三者の理論を統一的に配列して、弾道の基礎理論として洗練した説明をすることに成功したサーヴェイ研究という特徴をもつと分類できる。著作の目次については、巻末の付録を参照するとして、その第3部の構成についてさらに詳述すると以下ようになる。

・ 第3部（8巻構成, pp. 147-316.）

「爆弾投擲に関する理論について(De la Theorie du jet des Bombes.)」

1. 運動についてのガリレオの学説(Doctrine de Galilée sur le mouvement.)
2. 投射体運動の理論(Theorie du mouvement de projection.)
3. 爆弾投擲の技法の実践的証明(Demonstration des pratiques de l'Art de jeter les Bombes.)
4. その射程が砲台の水準にある投擲物についての実践的ならびに器具を用いた証明  
Demonstration des pratiques pour les jets dont l'étendue est au niveau des batteries et par le moyen des Instrumens.
5. その射程が砲台の水準にないような投擲物についての実践的証明 Demonstration des pratiques pour les jets dont l'étendue n'est pas au niveau des batteries.
6. 正弦による実践的証明(Demonstration des Pratiques par les Sinus.)
7. 器具による実践的証明(Demonstration des Pratiques par les Instrumens.)
8. 爆弾の投擲についてのカッシーニ氏の学説(Doctrine de M. Cassini pour le jet des Bombes.)

各巻についての概説だが、第1巻はすでに第1部で論述されているガリレオの投擲理論についてであり、このガリレオ・ドクトリン重視の傾向は本部の後半まで、トリチェリ、メルセンヌの理論の紹介とともに、ブロンデル研究の骨子をなしている。したがって、ブロンデルの独自性を見出すのは残念ながら難しいといえるのだが、第三巻の副題に見るように、投射体の仰角、射程距離、到達高度を正弦表と特殊な作図器具をつかって割り出そうとする傾向は全部分において通底している。<sup>2</sup> とりわけこの特殊な作図器具は弾道の究極的な軌道予測をなしえる「総合器具」(instrument universel)の開発につながるものとされる。<sup>3</sup> この万能器具の思想については興味深い素材となりえるものだが、ここでは残念ながら割愛して、同様の器具製作に関係した人物として重要な人物がいる。それが、第8巻の最終部で突然取り扱われるカッシーニ氏である。これまで先行研究をつうじて、カッシーニの研究についての分析は長く展開されてこなかったが、まずカッシーニとは何者でどのような研究を展開したのかについて論じよう。

<sup>2</sup> Et premierement pour les jets dont l'élévation est au niveau des batteries, et par le moyen de sinus.

<sup>3</sup> *Traité de Balistique Extérieure*, Gauthier-Villars et Doin, Paris, 1921. t.1, p.86, *Essais sur l'Histoire de la Balistique*, P. Charbonnier, Paris 1928. p. 68.

## ジャック・カッシーニの研究 ～実験器具の開発～

ジャック・カッシーニは、木星の自転や土星の衛星を発見したイタリア人天文学者、ジョヴァンニ・ドメニコ・カッシーニ(Giovanni Domenico Cassini, 1625-1712)をその父とする天文学者・物理学者である。この父 G. D. カッシーニの名前は、彼のおこなった精密な観測に由来する形で現在もカッシーニ環（カッシーニの空隙）という名称にその痕跡を残している。彼の名声はまた同時代的にも汎く知れ渡っていた。イタリアをその出自とする彼は、その後フランスに帰化し、パリ国立天文台(l'Observatoire de Paris)の初代天文台長となったが、その息子であるジャック・カッシーニ(Jacques Cassini, 1677-1756)も同様に、父の地位を継承してパリ天文台の責任者となった。父ほどの重要な業績は達成していないが、学会において指導的な役割を果たしたことは当時のフランス科学アカデミー紀要にその名を見出せることから容易に伺える。その代表的な著作としては『大地（地球）の大きさと形状についての試論(*Traité de la grandeur et de la figure de la terre*)』（1720）が挙げられる。

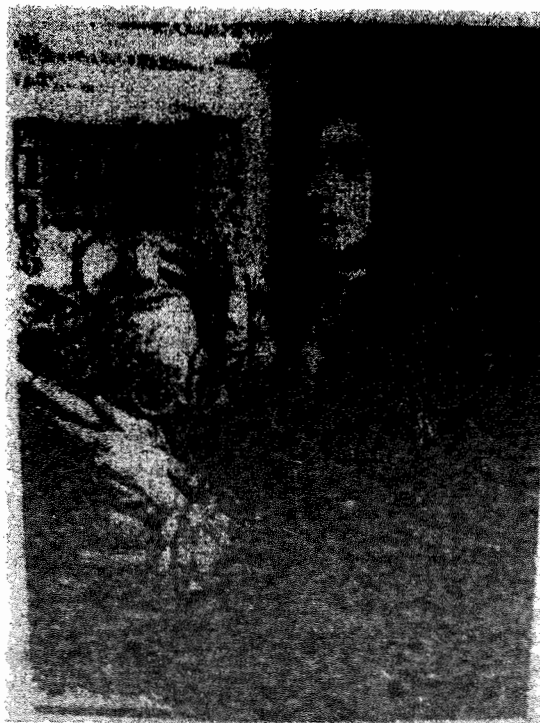


図1：ジャック・カッシーニ

このようにジャック・カッシーニは天文学者・地球物理学者としてのキャリアが有名だが、弾道初速度測定器具の開発においてもその名称は18世紀前半までの弾道学研究史においては散見される。彼の主要な功績は、ベンジャミン・ロビンズの弾道振り子に先立つこ

と40年以上も前に同様の構造をもつ実験器具を開発していたことが重要である。

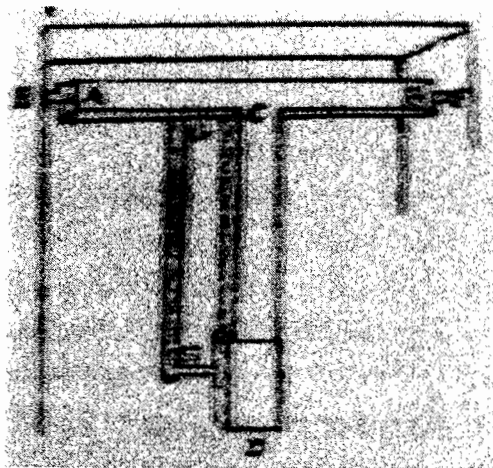


図2：カッシーニの測定器具

このカッシーニの器具の構造は基本的に弾道振り子と同様であるが、より簡素で小規模である。まず、弾丸が衝突するのはT字型の木製パーツの下底部分である図の点Dである。点Dは非常に強固な金属で補強されている。ここに衝突する際、衝撃力が壁に埋め込まれているT字部分の点E、Fを回転の軸として、T字型パーツ全体を動かす。このときの振幅を図ることによって衝撃力、ひいては弾丸の初速度を計測することにつながるのである。この装置は、1707年のフランス王立科学アカデミーの会議でデモンストレーションされたとされている。

TROISIEME PARTIE. 297

---

LIVRE HUITIEME. LIV. VIII.

*Doctrine de Monsieur Cassini pour le jet des Bombes.*

---

CHAPITRE PREMIER.

*Lignes d'égalité, d'impulsion & de chute respective.*

**M**ONSIEUR Cassini a donné la résolution de toute la doctrine de la projection d'un mobile par une seule proposition, faisant voir qu'en tous les cas, il y a trois lignes qui sont continuellement proportionnelles, à savoir celle qu'il appelle d'égalité, celle d'impulsion & celle de la chute respective.

CHAP. I.  
Lignes d'égalité, d'impulsion & de chute respective,

図3：『爆弾投擲の技法』第三部八巻 カッシーニの記述

ただ奇妙なこととして、王立科学アカデミーにおいて披露されたことものの、正式にアカデミー紀要などで論文の形式として記録はされておらず、技術は伝承されていないとされる。したがって、英国のロビンズの40年のちの研究との連関は直接指摘できない。しかしながら、なぜ天文台長であったジャック・カッシーニがこの種の研究に取り組むことになったのか、その原因については、先に扱ったブロンデルの著作にその答えがある。実は、ブロンデルの著作で示されていたカッシーニは、この子であるジャックではなく、親の G. D. カッシーニを指していたのである。というのは、図3で示されるように、カッシーニの名称は姓のみでどちらを示すか不明だが、ブロンデルの著作の執筆時期は17世紀半ばであり、その時期には息子ジャック・カッシーニは研究を提示できるような年齢ではないのである。

したがって、ジャック・カッシーニは親の研究を継承するという形で、弾道学研究を行ったという線が非常に濃厚であり、親子双方とも弾道学研究に取り組んでいたという事実がブロンデル著作から判明した。このような応用物理学研究に携わることでフランスの絶対主義の完成につながるような、国家寄与の科学者として当時のアカデミーの枠内で彼らが認知されていたのである。なおブロンデル著作における父カッシーニの記述はガリレオの投射体理論の範疇にあるものであり、ここでのさらなる詳述は控えるが、今後の研究ではより詳細に解説を加えることとする。つづいて、ロビンズとオイラーの18世紀半ばの研究革新にもっとも近い人物であったヨハン・ベルヌーイの研究について詳述する。

### ヨハン・ベルヌーイの弾道学研究とニュートンの影響力

ヨハン・ベルヌーイ(Johann Bernoulli, 1667-1748)は、言うまでもなく L. オイラーの直接の数学・物理学研究における師であり、G. W. ライプニッツの流儀の無限小解析学を汎用的な形式で、大陸に普及させた第一人者である。彼の弾道学についての貢献は、そもそもアイザック・ニュートンとの対立の文脈で議論される。ライプニッツ、ヨハン・ベルヌーイ等17世紀後半を生きた数学者たちの中で、突出した数学的才能をもち、研究全般をリードしていたのはやはり、ニュートンその人であったが、ヨハン・ベルヌーイは、発表直後は難解で、ヨーロッパ全体でもその内容についてきちんと咀嚼できる人物が十人に満たないといわれた『自然哲学の数学的諸原理(Principia Mathematica Philosophiae Naturalis)』(1687, 以下プリンキピア)初版の問題点を指摘するなど、大陸側のニュートン批判者としては最重要人物であった。彼の当該領域についての言及は少なからず存在するが、その理論的考察は、すべてニュートンの先行する議論という文脈の上で行われているものである。したがって、まずニュートンの関連する分野についての理解が必要であろう。ガリレオやトリチェリらの研究が、投射体運動理論という点で、ブロンデルに影響を与えたこととは、まったく方向性の違う議論であるが、抵抗媒質という新しい課題に焦点を当てているのがニュートンの記述である。抵抗媒質の考察とは、ニュートンの力学のなかで

いかなる自然哲学的位置を占めているのか。以下 1726 年の第 3 版第 3 篇冒頭における抵抗媒質についての記述を引いてみよう。

先立つ二つの篇では（自然）哲学の諸原理を述べてきたのであるが、それらの原理は哲学的なものというよりはもっぱら数学的なものであり、それらから（自然）哲学の探求において明晰に推論を行い得るようなものだった。それらはさまざまな運動や力の法則と条件とであって、（自然）哲学にとくに深い関係をもっている。しかし、それら原理が無味乾燥なものに思われぬように、いくつかの（自然）哲学的な注解をつけ加え、より一般的な性質をもち、（自然）哲学がもっぱらそのうえに基礎づけられているとみえる事項の解説を行いつつ、具体的に例示してきた。たとえば**物体の密度と抵抗**、物体の存在しない空間、光や音の運動などといったものである。なお、同じこれらの原理から世界体系（ラテン語原文：mundus systemata）を示すことが残っている。この問題については本第 3 篇を、多くの人たちによって読まれるような一般向きの仕方で行きわたったのであった。<sup>4</sup> (*Mathematical Principles of Natural Philosophy* translated by Andrew Motte and revised by Florian Cajori, the University of California Press, 1934. *Principia*, Book 3, p. 269.)

ここにあるように、ニュートンによれば、第 2 篇であらわれる、物体の密度と抵抗という概念ならびに問題は自然哲学の諸原理を明確に読者に理解してもらうために必要な具体的な事例であり、これら事項をとおして理解される自然哲学の諸概念から世界体系そのものの理解が第 3 篇において導出されるのである。この先にも記述が続いていて、たしかに第 3 篇の理解はこのように先立つ 2 篇の理解を前提とするものだが、（1）定義と運動の法則、（2）第 1 篇のはじめの三章の理解をとりあえず完成させなければ、この難解な『プリンキピア』の通読は困難であり、第 3 篇で出現した事例に基づいて、その都度第 2 篇にさかのぼってその引用を確認すべしとある（上記引用と同頁）。したがって、この物体の密度と抵抗という具体的事例は、単に世界体系を理解するために完全に解かれた課題である、といった認識はニュートン自体にもない。これら事項をまとめると『プリンキピア』における弾道学問題に関連する命題は以下のように整理されるであろう。

<sup>4</sup> In the preceding books I have laid down the principles of philosophy; principles not philosophical but mathematical; such, namely, as we may build our reasonings upon in philosophical inquiries. These principles are the laws and conditions of certain motions, and powers and forces, which chiefly have respect to philosophy; but lest they should have appeared of themselves dry and barren, I have illustrated them here and there with some philosophical scholiums, giving an account of such things as are of more general nature, and which philosophy seems chiefly to be founded on; such as **the density and the resistance of bodies**, spaces void of all bodies, and the motion of light and sounds. It remains that, from the same principles, I now demonstrate the frame of the System of the World. Upon this subject I had, indeed, composed the third book in a popular method, that it might be read by many; なお、邦訳は『世界の名著』3 1 巻 4 1 4 頁の河辺六男氏によるものを参考に独自に訳出している。

- ・ 第3篇: 前1, 2篇は世界体系が「周知になるように(*ut a pluribus legeretur*), 記述された, 非哲学的な内容であり, 世界体系の理解につながる。
- ・ 第3篇をいきなり学ぶことはできない。前二篇の該当部分に習熟すること, すなわち, さらに「成熟した」考察が必要。(But *maturer consideration was needed: for those who had first mastered the earlier books.*)
- ・ この達成後に抵抗問題など当該の応用問題への考察が始まる。周到的準備と完全な力学の理解が必要とされるが, これこそ「自然哲学的」問題である。

これらから, 抵抗の問題は, 具体例としては明示的なものの, その本質においては困難な話題であるから, 理解をスキップしてもよいという「脇役的」位置にあるのだが, ニュートンの指示にしたがって, 第2篇の当該部分をみると, その結果はきわめてあっさりしたものである。第2篇第1章〜第3章ではじめて展開される抵抗の議論は, そもそも抵抗媒質は空気に限定したものではない。第1章末の注解で示されるように, 「まったく硬さのない」媒質においても, その抵抗は速度の二乗に比例するとなり, さらにつづく2章, 3章でも, 媒質を空気と限定してもやはり具体的には「抵抗は速度の自乗比」となる, といった短い結論でまとめられるものとなっている。<sup>5</sup> この単純な言説の改良が新しい弾道学研究の端緒となるのである。当然ながら, ニュートンによる抵抗媒質中の運動についての議論は17世紀中の数学の洗練性では明らかに分析の範囲を超える難問であったが, たとえば『プリンキピア』には多体問題や三角級数問題等, 時代に先んじる議論の展開・新理論の萌芽を見出すことが多々あり, 指導的な物理学書として, ヨハンをはじめとする同時代の数理物理学者は空気抵抗の議論についてもニュートンの命題を出発点にする指針としての意味があったのである。

そして, この素朴なニュートン理論に対するカウンターとして, いよいよヨハン・ベルヌーイの理論が生まれることになる。ヨハンの研究は, 理論的には砲外弾道学(*exterior ballistics*)研究の範疇に属するもの, すなわち抵抗が飛翔物体に与える影響を議論するものであり, その点からも忠実にニュートンの後継となるものである。ちなみに, 甥で物理学者となったダニエル・ベルヌーイ(Daniel Bernoulli, 1700-1782)は砲内弾道学(*interior ballistics*)に関する研究を行っていたことが知られているので, そのことを考慮するとこの二人のベルヌーイの研究は現代弾道学の基礎部分を築いたといっても過言ではない。ヨハンの重要な空気抵抗に関する論文は, 以下のラテン語論文である。

- ・ 1719年『学術紀要』(*Acta Eruditorum*)発表論文: “*Responsio ad non neminis provocationem, Ejusque solution quaestionis ipsi ab eodem propositae de invenienda Linea curva quam describit projectile in medio resistente*”

<sup>5</sup> ただし, 第3章には速度に比例する抵抗とその二乗に比例する抵抗の双方の混交命題がだされている。



(Fr.) "Réponse à la provocation d'un certain individu, et solution de la question qu'il a proposé: Trouver la courbe que décrit un projectile dans un milieu résistant"

(『ある個人の挑発に対する返答と彼が投げかけた問題、すなわち抵抗媒質中の投射物が描画する曲線を見出すことについての解法』)

この論文(図4, 図5)は以上のように、非常に長い題名をもつものだが、はたしてこのある個人というのは誰を指しているのであろうか。一見すると、その有力な候補は、当時から熾烈なライヴアル関係にあった、ニュートンその人を指すように思えるのだが、果たしてそうであろうか。論文の具体的中身を理解することなしに、その候補者の特定はできないであろう。

INDEX NUMERORUM		519
N <sup>o</sup> . CVII. Solutio Problematis Trajectoriarum Orthogonalium,	pag. 281	
CVIII. De Trajectorii curvas ordinatum positione datas ad angulos rectos, vel alia data lege secantibus,		286
CIX. Additamentum ad Num. CVI.		299
CX. Tentamen Solutionis generalis Problematis eundem,		305
CXI. Methodus inveniendi curvas algebraicas inde quae non quadrabiles, habentes tamen numerum determinatum spatium absolute quadrabilium,		315
CXII. Dissertatio Physica, de Mercurio lucente in vacuo,		319
<u>CXIII. Responsio ad non nemini provocationem, &amp; inventa curvae, quam describit projectile in medio resistente.</u>		393
CXIV. Solutio Problematis Analytici, omnibus Geometris non-Axiomaticis propositi,		404
CXV. Demonstratio Theorematum analyticorum Nri. praeced.,		419
CXVI. Exercitatio geometrica de Trajectoriis Orthogonalibus,		423
CXVII. Fragment de l'extrait du Livre de Mr. TAYLOR,		473
CXVIII. Responsio ad TAYLORI querelas,		474
CXIX. TAYLORI Apologia contra BERNOULLIUM,		478
CXX. Epistola ad TAYLORUM, seu ad ejus Apologiam Responsio,		483
CXXI. Operatio Analytica, per quam deducta est Solutio Problematis Nri. CXIII.		513

図4: ベルヌーイ著作集における見出し

さて早々に読解した結論を述べると、この「とある個人」の正体は、実はニュートンではなく、ジョン・ケイル(Johh Keill, 1671-1721)というスコットランド・エディンバラ出身の物理学者・天文学者であった。彼はのちにスコットランドを離れてオックスフォード大学に移るが、ニュートン力学の主要な擁護者であり、主著『真正自然学および天文学入門(Introductiones ad veram Physicam et veram Astronomiam)』(1708)で、ニュートン力学による天文学の諸課題解明に臨み、啓蒙的活動を図った人物である。この彼の主著後に長崎の通詞であった志筑忠雄(1760-1806)がオランダ語訳から『暦象新書』として邦訳したと

いう経緯をもっており、実は日本への西洋天文学・応用物理学の移入という観点からも結びつきをもっている重要な学者であった。では、なぜケイルがヨハン・ベルヌーイと白熱した論争を繰り広げなければならなかったか。それは、18世紀初頭にケイルはニュートンが簡単な定式化しかできなかった抵抗媒質中の運動について、改良の余地があるとするヨハンと激論を交わしている最中であつたからである。ニュートン・ライプニッツ間の学派間の対立は有名であるが、微積分先取権論争等、「目立つ」課題のほかにも、いわば局地戦というべき各陣営間の学者の個別課題についての議論が同時に行われていたことは、科学的には興味深い問題であろう。



Nº. CXIII.

JOHANNIS BERNOULLI  
RESPONSIO AD NONNEMINIS  
PROVOCATIONEM,

*Ejusque solutio questionis ipsi ab eodem proposita de invenienda  
Linea curva quam describit projectile in medio resistente.*

**P**roponere Problemata in publicum non caret utilitate; Acta E-  
rud. Lips  
1719. Mai.  
pag 216.  
hac enim ratione excitantur & acuuntur ingenia, ac saepe aliquid eruitur in scientiae incrementum, quod alioquin forte absconditum mansisset. Hoc igitur nomine laudabilis est illa quovis tempore recepta consuetudo, qua cum primis Geometrae mutua problematum propositione vires suas subinde exercuerunt: amittit vero pretium suum, statim ac degenerat in abusum a parte Proponentis; quod fit, quando non indefini-

図5：ヨハン・ベルヌーイによる抵抗媒質中の運動についての論文

さて、ケイルへの中傷など、かなりヨハン・ベルヌーイの個人的性格を明かすような点を飛ばして論文に含まれている、ニュートンの研究を上回る内容について、まとめてみよう。ヨハンの基本的な方針としては、抵抗媒質中の運動は速度の  $2n$  のべき乗に比例するという基礎理論の変更を求めるものであった。たとえば、未知量を  $z$  とし、上式で描画される領域を  $Z$  とおくと、弾道曲線の軌道は  $xy$  平面上では下式で表示される。

$$Z = \int (aa + zz)^{-\frac{1}{2}} dz.$$

$$x = \int z Z^{-\frac{1}{n}} dz, y = \int a Z^{-\frac{1}{n}} dz.$$

ニュートンの記述が大陸の記号法を一切導入していないという性格のものであるのに対して、ヨハンの結果は微分方程式の形式で、速度に対する抵抗の増加、さらには弾道軌道の変化を表現するものであり、もちろん理論としては不正確であるものの、新時代の到来を予言させるものである。こういった研究に若き日のオイラーが触れていたことは明らかであり、ロビンズの著作の成果も含め、オイラーのみならず当該問題を扱う研究者は『学術紀要』誌という当代随一の有名誌からも問題の端緒を理解したことは、想像に難くない。つまり、18世紀半ばの弾道学革命に直接的に影響を及ぼしているのは、このヨハン・ベルヌーイの研究であったのである。最後に補足的に、フランスの状況に戻り、プリンキピアの大陸側の受容者の代表格であったヴァリニオンについて説明する。

#### ヴァリニオンの研究 ～デカルト主義的分析～

ピエール・ヴァリニオン(Pierre Varignon, 1654-1722)はフランスの数学者である。イエズス会の学院ならびにカン大学で学んでおり、17世紀半ばのポスト・デカルト世代の重要な数学者の一人であった。教育ならびに研究者としての地位としては、ユークリッド『原論』ならびにデカルト『幾何学』を習得し、1688年にマザランの学院(Collège Mazarin)数学教授職、王立科学アカデミー会員になる。その後も、同学院並びに同アカデミー。ならびにベルリン科学アカデミー等でも要職を歴任している。



図6：ピエール・ヴァリニオン

彼の物理学者としての主要業績は、画法静力学の開発と動力学におけるいわゆるヴァリニオンの原理の発見である。<sup>6</sup> ヴァリニオンの原理とは、「多くの力のある1点に対する力のモーメントの総和は、それらの力の合力のその力に対するモーメントと等価」であるというものである。他にも、1699年に流体と水時計について微分計算を応用したことが知られているが、残念ながら今回は調査が及ばなかった。ヴァリニオンの主要著作とその内実は以下のとおりである。

1. 『新力学構想(*Projet d'une nouvelle mécanique*)』(1687):『プリンキピア』の大陸側の記号法による解析的書き換え。
2. 『数学原論(*Eléments de mathématique*)』(1731):死後出版、ユークリッド『原論』にとって代わる新世代改定版の試み。

総じて、デカルト『幾何学』の洗礼を大きく受けた人物であるので、大陸側の新記号法をさまざまな個所で応用し、数理科学の発展に利用しようと試みたという彼の特性が指摘できる。特に(1)の著作は、大陸側の「書き換え」を行った人物としては、最初の世代に属するものであり、ヨーロッパ全域におけるニュートン理論の名声の拡大といった点からは、欠かせざる働きといえよう。ヴァリニオンの弾道学の該当分野における研究は、1707, 1708, 1709, 1710の各年の『アカデミー選集』(*Recueils de l'Académie*)に収録されているものがあり、目立った主張としては、**直線弾道学**(la balistique rectiligne)という理論の提唱がある。これは、ロビンズの議論とも通じる問題だが、超音速の飛翔物体の軌道予測には、ガリレオスタイルのパラボラを利用した投擲理論だけでは不十分だと考える、ヴァリニオンのアイディアに基づいている。実は、ニュートンやホイヘンスもすでにこの着想はあるが、大陸的記号法でいわゆる解析的書き換えにはじめて望んだのはヴァリニオンがはじめてであった。他にも、線形の微分方程式で軌道の予測が可能だとしていることなどがあるが、当時の研究者が共有していたある意味「常識的」側面であったので、彼独自の着想とは言い難いものがある。

## まとめとして

これまで、ブロンデル、カッシーニ、ヨハン・ベルヌーイ、ニュートン、ヴァリニオンといった17世紀後半~18世紀前半を主たる活動時期とした物理学者の先行研究を調査したが、以下の二つの事項を結論として述べたい。

<sup>6</sup> *Dynamica* とは、17世紀当時の G. W. Leibniz の造語であり、基本的に力学とは長い間、静力学、釣合の学とよばれる平衡状態を扱う *Statica* が本流とされた。これは、Joseph Louis Lagrange の『解析力学』第1部第1章の歴史記述等からも容易に伺われる。

1. 18 世紀半ば以前の基礎理論の研究には、砲兵学の実践に近い位置にいた理論家と、力学の解析化という当時の最先端分野の研究者の双方が混在。
2. 両者の相互影響関係は希薄であり、理論と実践の乖離という点では、19 世紀までつづく弾道学研究の状況と基本的様態はかわらず。

真の意味で「近代的」応用物理学の一部に弾道学がなっていったのはどのような過程を経てか、という問題設定から本論はスタートしたのだが、見えてくるのは実践の現場に近い研究者と、純理論的な研究者との乖離という状況のみであった。なかなか両者は接点をもたないように思える。これは、弾道学のみならず、一般的傾向としてたとえば流体力学史の研究等においても 18 世紀という時代の特異性としてよく指摘される課題であるといえ、仮にロビンズやオイラーの弾道学革命がなされた後でも、実は継続して存在する難題であった。彼らに先立つ、ブロンデルやカッシーニのモデルが、よりよくヴァリニオン、ヨハン・ベルヌーイなどによくよく咀嚼されていれば、また違った展開をみることができたように思うのだが、そういった可能性の議論とは無縁として、本論文で扱った課題は結局のところ、18 世紀科学史の定番ともいえるようなヒストリオグラフィー（歴史記述法）に従うこととなった。両者の相互影響関係は、いずれにせよ時代的な制約を受けて限定的なものとはなるであろうが、ディスコミュニケーションという結果を生んだとしても、何らかの対話として記録に残ったものを次の課題として解明していきたい所存である。

なお、この研究は科学研究費補助金（「物質・技術文化からみた近代数理諸科学の展開（1669-1840）」課題番号：23501200）の 2012 年度の助成を受けている。広島大学総合科学部准教授・隠岐さや香氏をはじめとした関係者にはここであらためて謝辞を申し上げます。

#### 参考文献（主要なもの）：

[Newton 1934]: *Sir Isaac Newton's Mathematical principles of natural philosophy and his System of the world* translated into English by Andrew Motte in 1729, the translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix by Florian Cajori. Cambridge : At the University Press, 1934.

[Newton 1958]: *Isaac Newton's papers and letters on natural philosophy and related documents : containing Newton's contributions to the Philosophical transactions of the Royal Society, his letter to Boyle about the æther, "De natura acidorum", Newton's letters to Bentley and the "Boyle lectures" related to them, the first published biography of Newton, Halley's publications about Newton's "Principia" etc.* edited with a general introduction by I. Bernard Cohen ; assisted by Robert E. Schofield ; with explanatory prefaces by Marie Boas ... [et al.]. Cambridge University Press, 1958.

[但馬 2009]: 但馬 亨 「18世紀における流体力学研究と弾道決定問題」, 京都大学数理解析研究所考究録『数学史の研究』 第1625巻 2009年 108-119頁.

付録: index of *l'Art de jetter*, Abridged version.

- ・ **1st Part** (2 Books, pp. 1-60.)  
Opinions fausses du jet des Bombes avant Galilée.
- ・ **2nd Part** (6 Books, pp. 61-146.)  
Pratiques de l'Art de jetter les Bombes.
- ・ **3rd Part** (8 Books, pp. 147-316.)  
De la Théorie du jet des Bombes.
  1. Doctrine de Galilée sur le mouvement.
  2. Theorie du mouvement de projection.
  3. Demonstration des pratiques de l'Art de jetter les Bombes. Et premièrement pour les jets dont l'élevation est au niveau des batteries, et par le moyen de sinus.
  4. Demonstration des pratiques pour les jets dont l'étendue est au niveau des batteries et par le moyen des Instrumens.
  5. Demonstration des pratiques pour les jets dont l'étendue n'est pas au niveau des batteries.
  6. Demonstration des Pratiques par les Sinus.
  7. Demonstration des Pratiques par les Instrumens.
  8. Doctrine de M. Cassini pour le jet des Bombes.
- ・ **4th Part** (4 Books, pp. 317-445.)  
Resolution des difficultés qui se trouvent dans la doctrine du jet des Bombes.