京都大学	博士（文学）	氏名	有賀暢迪
論文題目	十八世紀における「力学」の誕生 ―レオンハルト・オイラーによる力概念の革新		

（論文内容の要旨）

十八世紀のヨーロッパを代表する数学者であったレオンハルト・オイラーは、いわゆる純粋数学の分野で多大な功績を遺したのみならず、力と運動を数学的に取り扱う力学の分野においても重要な貢献を行ったことで知られる。その際、多くの歴史研究は、主として古典力学の数学的形式に関わる面において、オイラーの仕事を評価してきた。すなわち、微積分の言葉（数式）で記述された運動方程式を用いて種々の物体の運動を統一的に取り扱うという、今日「ニュートン力学」と呼ばれるような理論体系の確立において、オイラーがきわめて重要な役割を果たしたとする評価である。これに対して本論文は、力学理論を成り立たせている基本概念の一つである「力」に着目し、この概念が確立する過程、ひいては「力学」という科学そのものが成立してくる過程において、オイラーがどのような地位を占めるのかを明らかにしようとするものである。

ここで問題にしている力の概念とは、抽象的かつ一般的な作用としてのそれである。現代の物理学者や工学者は、太陽の引力による地球の運動とばねにつながれた小球の往復運動が、同じ運動方程式によって記述できることを疑っていない。惑星の運行から種々の機械装置のメカニズムまでを同じ理論によって扱える点が古典力学の大きな特徴であるが、そのようなことができるのは、由来の異なるさまざまな作用が同一の「力」なるものによって等しく表せるからである。この意味で、ニュートン力学に代表される真に近代的な「力学」を可能にしたのは、物体に対して働くさまざまな物理的作用を一括して表現する、抽象的な力の概念であったと考えられる。ところがこのような力概念は、あらかじめ存在していたわけではなかった。それ自体、十八世紀のあいだに確立されてきたのであって、その過程が本研究の主題である。

本論文では、力学において用いられる力の概念についてオイラーがどのような思考を展開したのかを、原著論文を始めとする一次資料に基づき考察する。あわせて、オイラーに先立つ人々や同時代のほかの学者たちが「力」をどのように論じていたのか、また、オイラーの行った研究を受けて展開された次の世代の力学がどのようなものであったかについても検討を行う。このように、オイラーその人だけでなく前後左右に位置するほかの人々と比較することによって、オイラーの思考を歴史の中に位置付けることが初めて可能となる。

結論的に述べるならば、オイラーの行った力概念の革新は大きく二点に集約される。第一にオイラーは、物体に内在する実体、ないしは一種の能力として広く捉えら

れていた「力」（羅vis，仏force等）を、物体の外側にある変化の原因として捉え直した。そして第二に、そのように理解された「力」の作用を、物体の釣りあいを扱う静力学の主題である「動力」（羅potentia，仏puissance等）と同一視し、これによって、物体の運動と静止を同一の概念基盤上で取り扱うことを可能にした。このような力概念は、今日の力学においてはむしろ当然のものであり、暗黙の前提になっていると言ってよい。しかしながら、そのような理解の仕方は十八世紀初頭の時点ではまだ一般的でなく、現在のような概念体系の確立においてはオイラーが重要な役割を果たしたと考えられる。そしてそのような力概念の誕生は、「力学」という科学そのものの生成と密接に関わっている、というのが本論文の中心的主張である。

本論文は、序論と結論を除き、全十章で構成される。このうち第一章「十八世紀力学史の歴史叙述―問題の所在」では、この世紀における理論力学の展開や力概念の問題を扱った先行研究を概観し、本研究の論点を明確にする。とりわけ、「力学」（羅mechanica，仏mécanique等）、「静力学」（羅statica，仏statique等）、「動力学」（羅dynamica，仏dynamique等）という言葉の指すものが十八世紀のあいだに変化していることを指摘し、釣りあいの科学（静力学）と運動の科学（動力学）を包摂する「力学」という学問の枠組み自体の成立過程を問うべきであると主張する。

以上の問題提起を受けて、第二章以降で本論が展開される。これは大きく三つの部から成り、総体としては必ずしも年代順に書かれていない。三つの部はそれぞれ、「活力論争と『運動物体の力』の盛衰」、「オイラーの『力学』構想」、「『解析力学』の起源」という副テーマを扱う。これらは少しずつ異なる側面から、十八世紀における力概念の革新を、ひいては「力学」の誕生を叙述しようとするものである。

第一部では、「力」が物体の内側でなく外側に求められるようになるまでの過程を、活力論争と呼ばれている十八世紀前半の議論の展開に即して描き出す。活力論争とは、「力」がデカルトの言うように質量と速度の積（すなわち「運動の量」、mv）に比例するのか、それともライプニッツの主張するように質量と速度の二乗の積（すなわち「活力」、mv^2）に比例するのかという問いをめぐって戦わされた、一連の議論のことを言う。ここで重要なのは、論争で問われた「力」なるものがその当時、第一義的には、運動している物体に内在する実体として理解されていた点である。

そのことを理解するために、第二章「十七世紀の自然哲学における『運動物体の力』」では、デカルト、ニュートン、ライプニッツという代表的人物の著作を取り上げ、物体が何らかの「力」を持つという発想が共通して認められることを示す。すなわちデカルトは、自然界で生じるあらゆる現象が、究極的には運動する物体同士の衝突によって理解できると考えていた。その際、運動している物体は何らかの意味で「力」を有すると見なされ、衝突前後における物体の運動の変化が物体間での「力」のやり取りとして記述された。ニュートンはこれに対して「刻印力」という別種の力

概念を導入したが、物体の有する「力」という考え方もまた、「固有力」ないしは「慣性の力」という形で受け継いでいた。ライプニッツは、この後者の考えを深めて「活力」「死力」という対概念を提示し、それらの尺度について新しい説を立てた。「動力学」とは本来、この意味での活力の学を表すために発明された用語であった。

続く第三章「活力論争の始まり」では、ライプニッツの考えを支持した人々、とりわけヴォルフ、ヘルマン、ヨハン・ベルヌーイといった哲学者・数学者たちの活動の結果として、1720年代に賛同と批判が寄せられるようになり、本格的な論争が勃発した経緯を見る。この一連の経過は、「力」に関するライプニッツの学説のドイツ語圏における支持拡大と、それに対する外部からの反応として記述される。たとえば、オランダの「ニュートン主義者」ス・グラーフェサンデは活力説の支持に転じ、パリ科学アカデミーでは両学説の支持者のあいだで論争が行われるようになった。これら論争の当時者たちが口にしていたさまざまな「力」の意味の分析からは、運動物体に「力」が備わっているという考え方が、この時期の議論の前提となっていたことが確認できる。

これと対照をなすのが、第四章「活力論争の解消」である。ここでは、ダランベール、モーペルテュイ、オイラーという三人の人物を取り上げ、1740年代から50年代にかけて、三者三様の形で論争の解消が試みられたことを示す。「解消」という表現は、論争の前提であった「運動物体の力」そのものを彼らが否定したという事実を指すために、ここで独自に導入する用語である。ダランベールにとって、「運動物体の力」は真正な力学理論に要求される確実性・明証性を欠くものであったし、モーペルテュイも同様に、「力」という観念の曖昧さを批判した。これに対してオイラーは、認識論的というよりは存在論的な関心から、「力」と「慣性」を区別し、物体の本性について独自の主張を展開した。結局のところ、三者は前提や目標こそ違えていたものの、「運動物体の力」を拒否するという点では一致した。それによって論争を解消しようとする試みは、力学史上、一つの画期をなすものであった。

「運動物体の力」という概念を退けることは、今日「ニュートン力学」として知られる理論体系が確立するための必要条件であったと考えることができる。しかし、「運動物体の力」を否定することで今日的な力学理論が自動的に手に入ると考えるのもまた正しくない。本論文の第二部では、特にオイラーの場合を取り上げ、「運動物体の力」の批判と、今日に通じる新しい力概念の提唱がなされた経緯を考察する。このことは結局、オイラーが、師のベルヌーイらが採用していたライプニッツ流の「動力学」理解から出発しながらも、そこから離れ、新しい意味での「力学」を構想した過程を明らかにすることにつながる。

第五章「『動力学』の解析化―ベルヌーイとヘルマンにおける活力と死力の関係」では、オイラーの初期の力学研究の背景として、ライプニッツの導入した活力・死力

の概念に、ベルヌーイらが無限小解析（微積分）という新しい数学を適用した様子を考察する。重要なことに、こうして解析化された「動力学」は、ライプニッツが言葉で述べた内容を単純に数式で書き換えたものではなかった。たとえば、本来はまったく異質なものとして提示されていた活力と死力は、微積分の考え方を介して接続されるようになった。

続く第六章「活力論争における衝突理論の諸相と革新」は、オイラーとベルヌーイの共通点・相違点を、物体の衝突の取扱いに即して明確化する目的でここに置かれている。1720年代の活力論争では、衝突の問題は多くの場合「運動物体の力」を使って解かれていたが、ベルヌーイはそれを使わず、仮想的なばねのモデルを用いた。オイラーはこのアプローチを継承したと考えられるが、その際、ベルヌーイと異なり、「動力」という静力学由来の概念を分析の道具とした（1731年）。この意味で、オイラーの衝突理論はベルヌーイの理論の後継であると同時に、そこからの大きな飛躍でもあったと言える。

実際、「動力」概念の導入こそは、オイラーの「力学」構想の最大の特色である。第七章「オイラーにおける『力学』の確立―活力・死力から動力への移行」では、ベルヌーイらの影響のもとで力学研究を始めたオイラーが、独自の理論体系を確立するに至った過程を考察する。1720年代に書かれたと見られるいくつかの草稿は、オイラーが当初は活力・死力の考え方を受け入れていたことを示している。しかしオイラーはその頃からすでに、活力は死力に帰着させることができ、死力は動力で置き換えることができると気が付いていた。その結果として著された『力学』（1736年）は、物体の運動状態の変化を動力のもたらす効果として論じるものであった。やがて1740年代以降になると、オイラーは、ライプニッツ流の「力」理解に対する根本的な批判を展開する。活力と死力の区別が否定され、慣性と力が区別されて、力は物体から切り離された。これがオイラーの到達地点であった。

ここまでの議論によって、オイラーの「力学」構想の有していた新奇性・独創性が、歴史的文脈に即して明らかにされた。残された課題は、この新しい「力学」理解が、その後にどのような形で受け継がれたかを見定めることである。第三部ではこの問題を、次の世代の数学者であるラグランジュが『解析力学』（1788年）において達成した、静力学と動力学の統一というテーマに即して検討する。ただし、ラグランジュの力学研究は、オイラー一人だけの影響を受けて行われたものではない。どの部分がオイラーとの関係で記述され、どの部分がそうでないかに留意することが求められる。

そのためにまず、第八章「再定義される『動力学』とその『一般原理』」では、ラグランジュの力学研究の背景として、オイラーとは別の文脈を取り上げる。パリの科学アカデミーでは、ダランベールの『動力学論』（1743年）に象徴されるように、1740

年代に「動力学」が活発な研究の対象となった。ただしこの「動力学」は、活力の学という当初の意味ではなく、むしろ相互作用する物体系の運動の科学を指していた。また、この言葉の再定義が進行する過程と並行して、種々の問題を解くための「一般原理」が、ダランベールを始めとする複数のアカデミー会員によって提案された。

他方、ベルリンの科学・文学アカデミーでは、オイラーが1740年代から50年代初頭にかけて、力学の最小原理に関する一連の研究を行った。第九章「オイラーの『労力』、あるいは力の効果が示す最小性」では、オイラーによるその原理の発見と解釈を論じ、それが静力学的な力概念と密接に関わっていたことを示す。オイラーは、モーペルテュイが以前に提唱した「静止の法則」を発展させ、静止においても運動においても最小になっていると思われた量を「労力」という名前で呼んだ。最小労力の原理とでも呼ぶべき、このオイラーの主張は、静力学的な力（すなわち動力）の作用が有する性質の帰結として理解された。

これら二つの章で見た議論の合流点としてラグランジュの力学研究を描き出すことが、第十章「静力学と動力学の統一―ラグランジュの力学構想の展開」の課題である。ラグランジュは一方では、自ら定式化し直した「最小作用の原理」を使って「動力学のさまざまな問題」を論じ、他方では、それを用いて固体と流体の釣りあいおよび運動を統一的に扱うことを早期に企てていた。最終的に『解析力学』では、ラグランジュはオイラーとダランベール双方の主張に再解釈を施し、釣りあいと運動を同一の「一般公式」、同一の力概念によって論じた。この意味で、『解析力学』は力概念の革新により可能となった著作であった。

以上の考察を通じて描き出される十八世紀の力学史は、ある意味ではライプニッツからラグランジュへ、と要約できるであろう。そしてその過程はまた、「運動物体の力」から「動力」へ、とも表現することができる。この変化こそ、「力学」は十八世紀に形成されたという本研究の中心的主張を実質的に構成するものである。

古典的な科学史の研究、特に、いわゆる十七世紀の科学革命をめぐる議論では、ガリレオからニュートンへと至る「近代力学」の形成に大きな関心が寄せられていた。しかし、十七世紀末の時点における力と運動の科学―あるいは自然哲学―と、今日「力学」と聞いて連想されるものとのあいだには、相当大きな開きがある。実際には、理論の基盤となる力概念がその数学的形式とともに十八世紀に確立したことによって、真に普遍的かつ汎用的な性格を持つ「力学」という科学が生まれたのである。そのような理論体系が十九世紀以降の物理科学や工学を理念的にも実践的にも支えてきたという意味において、オイラーによる力概念の変革は科学史上、特筆に値する出来事であった。

（論文審査の結果の要旨）

本論文は、十八世紀における力学の発展を、基本概念である「力」の概念に焦点を定め、この世紀を代表する数理科学者レオンハルト・オイラーを中心に考察したものである。

力学史においては、従来、ガリレオからニュートンに至る十七世紀数学的運動論の発展が研究の中心だったが、近年十八世紀力学史研究が精力的に行われるようになっている。その最も重要な成果は、ニュートンが主著『プリンキピア』（1687年刊行）において提示した力学が、現代の我々が「ニュートン力学」とみなしているものとは大きく異なっており、「ニュートン力学」すなわち古典力学が成立するのは半世紀後の十八世紀中頃だったことが明らかにされたことである。十八世紀前半における力学の発展過程は力学の解析化・体系化と呼ばれるように、第一に微積分という数学的技法の発展によって特徴付けられている。

本論文は、これまでの十八世紀力学史研究が数学的側面を中心になされてきた結果、力学的基礎概念の検討が見過ごされている点に着目し、力学の解析化において最も重要な役割を果たしたオイラーを中心に、「力」概念の革新を検討し、力学という学問分野の成立を新たな視点から考察している。

本論文の意義は、以下に挙げられる三つの点に見いだすことができる。

第一に、十八世紀前半に行われた運動物体の「力」をめぐる論争を詳細に検討し、力学の発展過程の中に位置付けたことである。この論争は、運動物体の「力」は運動量と「活力」（現代の運動エネルギーに相当）のどちらによって測られるのかという問題をめぐって、運動量を支持するデカルト派と「活力」を支持するライプニッツ派の間で行われた。この論争は、1740年代には解決されたと言われるが、論者は「解決」されたのではなく「解消」されたと主張する。運動物体の「力」という問題自体が力学の中心的問題ではなくなり、それを扱う「動力学」が従来の意味を失い、異なる意味を持つことになったのである。すなわち「動力学」は、運動物体の「力」を扱うものから、外力の作用によって生じる運動の変化を扱うものとなった。その結果として、静力学と動力学という二つの領域から構成される「力学」が十八世紀中頃には成立したのである。

第二に、「力」概念の革新においてオイラーが果たした役割を明らかにしたことである。オイラーは、「慣性力」に代表される物体に内在する「力」の実在性を否定し、外力のみを力学において認めていた。彼は、「活力」論争において最も重要な問題であった運動物体の衝突を、瞬間的な事象ではなく、微小ではあっても有限な時間内に生じる事象として捉え、それに運動方程式を適用する。この運動方程式に適用される力として、静力学的な力すなわち「動力」を置くことによって、力学における「力」から運動物体に内在する「力」を排除し、静力学的な力に置き換えたのだった。

第三に、十八世紀後半に活躍したラグランジュによる「解析力学」の提唱を、オイラーの試みを継承し発展させたものとして捉えた点である。ラグランジュの力学は、変分原理に基づく力学として、オイラーの運動方程式を基礎とした力学と大きく異なる性格をもつことが知られているが、一方この変分原理に基づく力学の発想自体はオイラーを引き継ぐものだった。オイラーは、1740年代以降に力学の最小原理に関して研究を行い、静止においても運動においても最小になっている量として「労力」を考案した。ラグランジュは、静力学と動力学とに共通する原理を最小原理に見いだし、両分野を統一的に扱う方法を確立しようとしたのである。ラグランジュは、最終的に、基礎原理としては「労力」の概念を廃棄し、仮想変位の原理を用いることによって、動力学と静力学という両分野を扱う方法を確立した。それが「解析力学」の試みであった。

十八世紀力学史研究は、数学技法の革新と力学的理論の発展という側面を中心に行われてきた。本論文は、従来の研究を踏まえつつ、「力」概念の革新に焦点を定めた科学思想史研究として、力学史研究の新たな方向を提示した研究と評価できる。一方、いくつかの課題が残されている。数学的技法の発展を中心とした力学の解析化と「力」概念の革新がどのような関係にあったのか、とくに運動方程式が成立した1740年代のオイラーの活動に関する研究が望まれる。また十八世紀中頃までは、ガリレオやホイヘンスの力学の影響があったことが知られており、その役割に関する考察が欠けている点が挙げられる。しかし、これらの点は論者も自覚しており、今後の研鑽の過程で克服されることが期待される。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。２０１７年1月２５日、調査委員３名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第１４条第２項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。