

力学の諸原理について

L・ボルツマン

稲葉 肇* 訳

Über die Prinzipien der Mechanik

L. Boltzmann

Translated by Hajime INABA

訳者前書き

ここに訳出したのは、19世紀を代表する物理学者の一人であるボルツマン（Ludwig E. Boltzmann, 1844–1906）による「力学の諸原理について」（Über die Prinzipien der Mechanik, 1905）と題された講義録である¹。ボルツマン自身が述べているように、これはもともとはライプツィヒ大学（1900年11月）とヴィーン大学（1902年10月）で行われた、「解析力学」の初回講義（Antritts-Vorlesung）の内容である。ボルツマンは当時、エネルギー論論争において原子論と力学的世界観を擁護する側の筆頭として活動しており、この講義録においてもその影響が随所に認められる²。今回「力学の諸原理について」を訳したのは、それが力学についてだけでなく、力学的世界観についてかなり詳しく述べているからであり、十分に紹介するに足るものであると判断したからである。以下ではその内容について、特に現代の我々から見た場合に理解が困難であると思われる箇所について説明を加えていこう。

我々の目から見ると一番奇妙に見えるのは「像」（Bild）という概念であろう。ここで「像」は認識論的な用語であり、人間の精神に現れる外界の表象（またはイメージ）を指す³。「像」は、以下で述べるように、精神の進化の過程においても重要な役割を演

* 日本学術振興会特別研究員（DC）・京都大学大学院文学研究科博士後期課程
Hajime.Inaba@gmail.com

¹ ボルツマンの業績についてここで詳しく述べることはできない。Brush（1986）などを参照せよ。

² エネルギー論論争については稲葉（2010）を参照せよ。

³ 「像」の理論に関してはヘルツ（Heinrich Rudolf Hertz, 1857–1894）の『力学原理』（Die Prinzipien der Mechanik, 1894。上川友好訳『力学原理』（東海大学出版会、1974年））が有名である。これについてはD'Agostino（2000a）による紹介が簡潔である。

ずるが、ここで我々の注意を引くのは力学という学問の特徴付けにおける「像」の役割であろう。ボルツマンは、力学を「物体の運動がそれにしたがって起こるような法則の体系である」とするが、このときの運動とは我々の精神に現れる「像」に他ならないのである。したがって力学とは、「精神的な現象と自然の簡単なメカニズムの間のあるアナロジー」である。この点においてボルツマンは、マッハ(Ernst Mach, 1838–1916)の見解に非常に近いと言える。マッハもまた、外界から我々が受け取る「像」の間の関係をもっとも節約的に表現することが科学であるとする立場を有していたからである⁴。それゆえ、しばしば語られるボルツマンとマッハの間の原子の存在をめぐる対立は、原子という「像」が真に有効なものであるかどうかをめぐる論争であると理解されなければならないだろう。ボルツマンが「实在」と言うとき、それは「像」を指しているのであり、決して外界の事物を指しているのではないのである⁵。

「像」とともに我々の目に留まるのは、おそらくダーウィン(Charles Darwin, 1809–1882)の進化論に力学的理論として言及していることであろう。しかもボルツマンは植物界や動物界における多様性のみならず、人間の持つ感覚的印象や「思考法則」(Denkgesetze)の発達、そして社会的な傾向までも進化論に即して理解しようとしている。すなわち、推論能力に代表される人間の精神における特徴の数々は、進化論的にその起源が説明されるのであり、決してア prioriに与えられているものではない、というのである。これは現代の進化心理学という研究プログラムを想起させる考えであるが、同時にボルツマンの進化論理解は、思考や習慣などの精神的な性質が遺伝するとしている点でラマルク的なものであり、ダーウィンに忠実とは言えないと指摘されていることにも注意しなければならない⁶。

なお、この「力学の諸原理について」の翻訳にあたっては、mechanischという言葉を一貫して「力学的」と訳すことにしたが、同時にこれには「機械的」という含みもあるということに注意しなければならない。ボルツマンは、我々から見れば意外に思えるようなことを「力学的」mechanischであると言うが、これはそれに対して何らかのメカニズムが用意できるという意味であろう。以下の本文に明らかのように、ボルツマンは、力学との関係はもちろんのこと、何らかの機械やメカニズムと強く結び付

⁴ Blackmore 1995, p. 205.

⁵ ボルツマンの認識論については、他に D'Agostino (2000b), Blackmore (1999), De Regt (1999) などを参照せよ。また、ギムナジウムおよび大学時代の哲学的教育背景については Wilson (1993) を参照せよ。

⁶ Blackmore 1995, pp. 100–102. なお、ボルツマンとダーウィンの関係については D'Agostino (2000b), Broda (1982), Tanaka (1999) などが論じている。

けた形で *mechanisch* という言葉を理解しているのである。

凡例

1. 底本は次の通りである。L. Boltzmann, “Über die Prinzipien der Mechanik,” in *Populäre Schriften* (Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, 1905), 308–337. また、次の英訳を参考にした。L. Boltzmann, “On the principles of mechanics,” in *Theoretical physics and philosophical problems*, ed. B. McGuinness (Dordrecht-Holland: D. Reidel Publishing Company, 1974), 129–152.
2. 原文においては一文で書かれた文であっても、訳文においては長すぎると思われる場合には分割したところがある。
3. 本文中、角括弧 ([]) で示した箇所は訳者による補足・注記である。また、ダッシュ (—) は原典中には現れないが、翻訳上の工夫として採用した。

序文

再三にわたってなされた要請により、私がライプツィヒ大学で教育活動を始めたとき、ウィーンでの以前の教授職に再び就任したときに行った二つの講義をここに出版しよう^{訳注 1}。もっとも、これらの講義をまだ聴いていない人は、ひどく幻滅するであろうことを私は確信しているのだが。

読者は、私がかつてミュンヘンの自然科学者会議^{訳注 2}の折に講演で発表した哲学的批判的考察の新しい版を期待するだろう。[しかし] あなたがたは、そこで私の聴衆がまったく異なっていたことを考慮に入れていない。そこでは聴衆の大半は、全員が理論物理学に精通していたわけではないにしろ、科学には飽き飽きしてしまっており、その結果批判哲学というスイスの薬^{訳注 3}への欲求を持つこともあり得たのだ。

^{訳注 1} ボルツマンは、1894年にウィーンの理論物理学正教授、1900年にライプツィヒの理論物理学正教授を歴任した後、1902年にウィーンの理論物理学の正教授に復帰した。また、1903年には、マッハの退職に伴い、「帰納科学の歴史と理論」(*Geschichte und Theorie der induktiven Wissenschaften*)の講座を兼担している。ボルツマンの生涯については、Höflechner (1994) が公文書などの史料を網羅的に検討しており、訳者の知る限りもっとも詳しい。

^{訳注 2} おそらく1899年にミュンヘンで開かれた、第71回ドイツ自然科学者・医学者協会会合のことであろうと思われる。この会合でボルツマンは、「最近の理論物理学の方法の発展について」と題した講演を行っている (Boltzmann 1905)。

^{訳注 3} 批判哲学とは科学に反する麻薬であるという意か。英訳では *digestive tablets* (消化薬) となっている (Boltzmann 1974, p. 129)。

しかし、私がここに再現する二つの講演について想定していたような聴衆に対して、それ[そうした欲求]はどれほど重要であっただろうか。[彼らは]科学に完全に飢えてその学説を初めて吸収し、二度と自分から離そうとせず、消化を促進するデザートよりは食欲を刺激する前菜を必要としていたような若い聴衆だったのである。

正しいにせよ間違っているにせよ、これが少なくとも私の見解であった。いずれにせよ、次の二つの講演を寛大に評価していただき、そこに深淵な内容ではなく無害なお喋りを期待していただきたい。

I. 初回講義(1900年11月, ライプツィヒ)

出席者諸君!

新しい客人を長く住んだ家に呼ぼうと思ったとき、我々は入口の扉を華やかに飾るのが常である。私がこの古くて立派な大学に招聘されたのは、諸君を理論物理学という強い感銘を与えてくれる広大な建物に引き入れるためである。我々がこの建物に入ろうとして通る入口の門は解析力学[analytische Mechanik]である。したがって、私が諸君に解析力学をそのもっとも美しく飾られた姿でお見せしようと思ったとしても、何の不思議もない。その解析力学は、私ではなく、何世紀か経つうちに非常に卓越した人々によって飾られてきたものである。

真の理論家としては私は、すべての外的な装飾よりも、内部の核心に注目してみたい。解析力学の定義は非常に簡単なものである。それは、物体の運動がそれに従って起こるような法則の体系である。これらの法則を知ることは、多くの機械および同様の装置を考察するために必要であり、そのもっとも簡単な形は既に太古において、エジプト人やバビロニア人などの間でも知られていた。それゆえ、力学的法則の研究の始まりが非常に古い時代に遡るからといって、驚く必要はない。当時問題となっていたのは、ほとんどの場合物体を動かすことであったのだが、失敗したわずかな試みを除いて、ガリレイに至るまではもっぱら釣り合いの条件だけに[考察の対象]制限されていた^{訳注4}。釣り合いの条件とは、当時研究されていた場合においては、物体が完全に動かないような条件と一致するものである。注目すべきことに、我々の力学の定義ではこれらの場合はもちろん力学の中に、完全に特殊な場合として、いわば例外としてのみ含まれるものであるが、これを論ずることで当時用いられていた機械を評価するためには十分であった。しかし、本来記述されるべきもの、すなわち実際の運

^{訳注4} 力学の歴史については、ひとまず広重(1968a)を参照せよ。

動は単に無視していただけだから、本来の意味での力学にはまだ到達していなかった。それはようやくガリレイとともに始まり、彼は工夫に富んだ重要な実験によってもっとも簡単な場合の運動についての基礎法則をついに確立したのであった。

これらの法則は、例えば草の茎のような複雑な地球上の現象に適用され、それによって拡張されるのであろう、といまや期待できるかもしれない。ところが、これはまったく事実とは異なる。これらの、あるいは素朴な観察者には見ることのできない地球上の現象は、我々にとっては今日でもなお完全に謎に包まれている。進歩はむしろ、ガリレイによって発見された基礎法則をニュートンがただちに我々からもっとも遠く離れたもの、すなわち天体の運動に適用したことによって始まった。というのも、まさにこの方法によってニュートンはガリレイの法則のかの有名な拡張と完全化を見出したからである。これは、それからもとに戻って複雑な地球上の運動への適用を可能にし、その結果ニュートンは、今日に至るまで力学のみならず、理論物理学すべての基礎となるほどの完全さを持つ物体の運動の理論を作り上げることに成功したのである。

ニュートンによって造られたこの基礎の上に、ラグランジュ、ラプラス、オイラー、ハミルトンなどのあらゆる国の傑出した解析家 [Analyst] たちがさらに建設を進め、すべての数学的物理的理論の模範として賞賛されるのが正当であると思われるような産物が、解析力学から生じたのである。

それはまず、剛体の運動の法則を方程式で把握することに成功し、この種の問題は純粋な計算問題へと還元できるようになった。

しかしながらまた、人々は固体と流体の内部構造を力学的にイメージし、前者の弾性的な性質やその変形、硬さ、および後者の運動の法則を表現する方程式に到達した。ところが、ある領域の現象が方程式において把握されると、物理学者は自分の課題が終わったものとみなしてしまう。その方程式を解くのは数学者に押しつけてしまうのだ。[しかし] こうした方程式をすべて実際に解けることから、つまりどんな場合でも実際に扱われている現象の直観的な像 [Bild] をそれ [方程式] によって得られることから我々がどれほど遠く離れているかは、泡立つ小川や、大きな汽船によって立てられる大波を一目見ればわかる。これらの現象すべての詳細を流体動力学的な方程式から読みとる解析が、いかに無力であることか。けれども、それにもかかわらず、力学はこうした領域すべてにわたって、実践のために——運河や上水道の建設と同様、建物や鉄橋、鉄塔の建設のためにも——欠くべからざる価値をもった式を与えている。日々驚嘆に値するやり方で人の手仕事を置き換えるのみならず、[手仕事を] 凌駕すら

している無数の機械についてはまったく語るまでもない。

力学的に考える訓練は、実践的な生活のすべての状況においてもっとも有用なものであり、教育的に精神的生活の全体に影響する。心理学の正しい知識を持った教師がその生徒それぞれを、まさに生徒の個性に合わせて扱うように、力学的に考える者は、非常に簡単なものからきわめて複雑なものまで、どのメカニズムにも尊敬と愛をもって向き合い、メカニズムの方は、その主人の望みを満たすことによって、その尊敬や愛に報いる。一方で、力学的な素養のない者は、どのような意味においてネジを回すことができ、そして[どのような意味において]まさに自分がバラバラにしようとしているものを、外すことができないほど固くそのネジが結び付けているのかということには、決して気付くことはない。

ある国民が隣国の住民に比べて大きな成功を収めたとき、その国民は隣国の住民に対してある種のヘゲモニーを得るのが常である。それどころか、彼らは隣国の住民を抑えつけ、ほとんどの場合は隷属させることに着手する。科学の分野においてもまた、まったく同様のことが成り立つ。力学はすぐに物理学全体におけるヘゲモニーを握ったのだ。力学によって最初に自然かつ抵抗なく征服されたのは音響学であった。[音響学に]関係する現象は運動現象ときわめて密接に結び付いている。もちろんその現象は非常に速く生じるため、直接には肉眼で追跡することは出来ないが、それにもかかわらず、単に表面的な観察をただけでは、その純粹に運動論的な特質は否定されない。それどころか、手段を工夫すれば発音体の運動も空气中を伝播する音波も、直接目に見えるようにすることができる。音響学はそうしてすぐに力学によってその専門領域へと取り込まれた。光は音と同じく波動・振動現象であることが認識されたので、同じことが光学についても生じた。もちろんそこでは振動する媒質の構成が完全に想像に任されており、また少なからぬ困難に行き当たったのではあるが。

熱理論の領域への進軍路を、力学は、熱が物体の微小粒子の運動であるというイメージによって開いた。その運動は、まさしくこれらの微小粒子が知覚できないゆえに、目には見えないままである。しかしこの運動は、我々の身体を構成する分子に伝わる時にはそこに熱の感覚を、我々の身体から離されるときには冷の感覚を引き起こすことで、認識される。上に述べた仮説が熱と名付けられた原動力[Agens]の振舞いの非常に明瞭な像を与えることからこの進軍路は勝利を収め、さらにこの像は、この原動力[熱]がある物質と類比的に振る舞うというかつての見解^{訳注5}よりもはるか

^{訳注5} いわゆる熱の物質説のことであろう。これは、熱は粒子の運動ではなく熱素(caloric)と呼ばれる物

に完全なものであった。

電気と磁気は、電気流体や磁気流体の仮説によって力学的法則に従属させられた。その流体の粒子は、天体の相互作用についてニュートンが確立したものの単純な修正であり、それゆえ純粋な力学という土に完全に根を下ろしているような法則に従ってお互いに作用を及ぼしていると考えられた。引力、斥力の力学と異種の原子の相互的な運動の力学に、化学現象および結晶結合の現象も還元することが試みられ、最終的には多くの成果を収めている。実際化学現象は、一方では熱現象と、他方では電気現象との類似性を同じくらい持っているのである。最近こうした理論的努力に対して向けられている反対運動については、後で話すことにしよう。

表面的な観察だけでも、力学的法則が無生物的な自然に限定されているものではない、ということがわかる。目はそのきわめて小さな細部に至るまで光学的な暗室であり、心臓はポンプ、筋肉は純粋な力学の見地のみから理解可能な込み入った梘子の系であり、これ [梘子の系] によって見かけ上は非常に複雑な問題をごく簡単な手段を用いることで解くことができる。すると、目の考えられる運動のすべては、その中心の周りを動く球についた引っ張り糸のような働きをする、六つの筋繊維^{訳注 6}によって引き起こされる。もちろん、短編作家が語っているような、目を見開くことや目を伏せることの完全な表現は、外部の装置、すなわち瞼や表情筋その他の作用によってもたらされる。

力学の適用可能性は、表面的な考察から推測されるよりも広く、いまや精神的なもの領域へと広がっている。例えば、いったい誰が、記憶力の力学的本性を証明するような観察をまだしていないというのか。私は昔、ギリシア語の単語を記憶にのみがえらせるため、その言葉が関係する場所にすぐに出てくるような暗唱用のホメロスの韻文をすべて復唱しなければならなかったが、これは珍しくはなかったことだ。私が一週間の間もっぱらヘルツ [Hertz] の力学に取り組んでいたとき、「親愛なる妻へ [Herz (心)]」という言葉で妻への手紙を書き始めたことが一度あったが、気付かぬうちに^{訳注 7}Herz を tz で書いていたものだ。

特別なメカニズム (ハンカチの結び目、冬コートの上に雨傘をさすこと) によって

質からなるとする説で、19世紀始めごろまでは物理学において主流として、種々の熱現象に成果を挙げた (広重 1968a, pp. 186-190)。

訳注 6 ボルツマンはここで筋繊維 *Muskelstränge* という表現を用いているが、意図されているのは外眼筋のことであろう。

訳注 7 原文では *ehe ich mich versah* 「私が見落とす前には」となっているが、*ehe ich mich es versah* の誤りであると思われる。英訳では *before I knew* とされている (Boltzmann 1974, p. 133)。

支えられていなければ、どれほどの頻度で記憶に蓄えられている生まれつきの目覚し時計が我々を見捨てるか、誰でも知っている。ライプツィヒへの引越しの日、いつものように温度計を読もうと——その温度計を私は一日前に自分で取り外していたのだが——窓際へ行ったとき、私はこう叫んだのだ。「理解力とまでは言わないが、自分の記憶力ほど役に立たないメカニズムは私は他に持っていない！」

このようにして、我々の身体においても精巧なメカニズムを認めることができるし、その病気も純粋に力学的な原因によって説明できる。すでにこうした認識は大きな有用性をもたらしている——外科的な方法と目的の力学的な噛み合いを示すことによって、また感染症の患者の真のメカニズムを発見し、病気を引き起こすようなバクテリアをさえぎることでそれを予防し、あるいはバクテリアを殺して治療することによって。もちろんほとんどの場合、我々はまだ自然の力の前に無力であるが、しかしそれでも力学は自然の力を把握し、同時に自然の力に耐えるための、我々の助けとなるのである。

我々はさらに、生物科学の領域における、もっとも驚嘆すべき力学的理論に言及しなければならない。すなわちダーウィンの学説である。これは、遺伝という純粋に力学的な原理——もちろんすべての力学的な始原的原理のように、それ自身では不明瞭であるが——から植物界と動物界のすべての多様性を説明しようと試みている。

花の驚くべき美しさ、昆虫の世界における形態の豊かさ、人体や動物の体の器官の構造の合目的性、これらすべてがこのようにして力学の領域となるのである。[すると]我々は、なぜある感覚的印象が我々を良い気持ちにさせ、我々はその印象を求めるのか、そして他の感覚的印象が我々を遠ざけるのかを理解するだろう。我々は、環境の可能な限り正確な像を我々の精神に構築することが、そして経験と一致する像を真なものとして、経験と一致しないもの、すなわち偽なものから厳格に遠ざけておくことが、どれほど有利なことであるかを見てとるであろう。我々はまた、真理と同じく、美の概念の発生をも力学的に説明することができるであろう。

さらに我々は、なぜある極度に有害な影響を、非常に強い神経の力でもって忌み嫌いかつ妨げようとしてきたような人々が、そして他のものを自身とその種の存続のために必要なものとして同じくらいの活発さで求めてきたような人々が存続できたのかも理解できるだろう。我々はそうして、どのように我々のもっとも強力な感性生活——快樂と痛み、嫌悪と愛情、希望と恐怖、幸福と絶望——が発展したのかを把握するだろう。肉体的な病気とまったく同様に、我々はすべての段階にわたる情熱から逃れることはできないが、他方また我々はそれを理解し、耐えるのである。

第一に、今、どんな個人にとっても疑いなく重要なのは、各自の生存のためにその努力を傾けることであり、エゴイズムは欠点ではなくむしろ必要なことのように思われる。しかし種の存続のためには、様々な個人が自助努力をし、個々人が協同するときには全体に従うことが、大きな有用性を持つだろう。だから我々は既に子供の頃にわがままと頑固さの必要性を理解しているが、それは一緒になって行う遊びにおける団結や社交の必要性についても同様なのである。我々は、我々の種における、利己心と同情、恥と欲求、自由への愛と卑屈な心、美德と悪徳、死への怖れと死の軽視を理解している。このことは、若者が偉大なものと高貴なもの、友情と愛、そして自由と祖国に熱狂しているときには、平和と戦争における一致した行動に対する利点となるだろう。しかし他方では、どれほど容易にこの傾向が美辞麗句や行動の伴わない熱狂へと陥ることか。それゆえ、勇氣と熱狂を掻き立てることに対する敏感さが、冷静さやエゴイズムと同様に、我々の種においてはその必要な釣り合いおもりとして成長しなければならなかった。このようにして我々には、若者がシラーの詩に夢中になり、非常に多くの者がハイネの作品を非難すること、けれどもハイネの作品は、他の人々にとっては非常に力強くまた抗いがたく働きかけるものであったことが力学的原因からわかるのである。実際、噴水の水は、果てしない空間へと飛び出すことが自らできるだけの活力を得なければならぬが、同様に力学的に必要なのは、無数の空気粒子の重力と圧力の反作用であり、これはその水を再び燃るべき時に母なる大地へと押し返す。皮肉を言いたければ、嫌悪すべき悪徳だけでなく、最高の美德もある程度は、我々の生まれつきの衝動 [Trieb] が的を外したことに起因する誤りであると大胆にも主張することができるだろう。というのは、あまりにも大きな理想主義は実践的な意義を損ない、それゆえ低俗な考え方に反対する一方でまた恥ずべき極端なものとなるからだ。このようなパラドクスは、一般に信じられているよりも容易に思いつくものであり、円筒型の鏡もしくは球状の鏡を使ったときの歪んだ像のように、一面的な観点から事物を考察するときには常に生じる。同様の仕方で、天才とは精神的な病気であると主張されてきた。

それどころか人類は、ただその [人類という] 種に対してだけさえ、理想を要求しないことがあり得る。人類は、忠実でないものを鞭打ち、忠実なものに食物を与えることで、犬に忠実さを教えこんできた。これは、雌牛に乳をたっぷり分泌させ、ガチョウに大きな肝臓を形成させたのと同様である。人になついた犬は、生存闘争においては人間によって常に優遇され、そして犬という種はますます人になつくようになり、忠実さも増したのである。いま、しばしば起こるように、主人を失ったある犬がもはや

餌を食べることなく、やつれ果てて徐々に死のうとしているとすれば、それは、我々が人間においては、特に現代の召し使いにおいて見出すことはほとんどないような理想主義ではないのか！それゆえ、多くの哲学者は、犬を人間よりも倫理的に高い位置に起こうと試みてきたのである。これは、鳥の無意識的な巣作りの方法を、苦勞して修得したが誤りやすい建築家の建築技法よりも、優位に起こうとする気持ちになり得るのと同様である。

したがって自然と人工物においては、絶大な力を持つ力学が支配的であり、それはまた政治と社会的な生活においても同様に支配的である。自主性への強力な衝動——既に子供のころに必然的に発達するに違いないことを我々は見てきたが——のために、個々人は他者によってはただ嫌々ながらに統治され得るのであり、社会的な団体、都市、公共団体や国家においては共和的な統治形態を好むものである。しかし他方ではこれに対して、再び力学的な困難が立ち足る。公開討論に参加した者は誰でも、公開会議とはどれほどごちなく、素早く首尾一貫した行動のためには不適切な組織であり、どれほど頻繁にこれが、個々人に割り当てられる責任範囲が小さいために議決の際に誤りを犯してきたかを知っている。なおこのことは、シラーが次の言葉で特徴付けた状況によって容易に引き起こされる。「分別は常に少数の側にしかなかった」^{訳注8} またこうした理由から、少数者による、あるいは個人による統治の利点が明らかとなる。そして実際、様々な人物が国民会議において協同することは、大衆の抵抗的な意思表示がある個人が巧みにコントロールすることと同様、心理学という力学に基づくのである。ビスマルクは自分の政治上の対立者の心を見破っていた。これは、機械技術者が機械の歯車装置の仕組みを見抜いていること、そしてその技術者がどの梃子を押さなければならないか知っていれば、望む動作のためにはどのようにして機械を動かさなければならないかを正確に知っていることと同様である。カトー、ブルートゥス、ヴェリーナの熱狂的な自由への愛は、純粋に力学的な理由によって彼らの胸に芽生えた感情から生じたのであり、我々はよく秩序の保たれた君主制の国において快く生活できることと、けれども我々は同胞がプルタルコスやシラーを読んで熱狂的な共和主義者の言動に心酔するのを目にすれば喜ぶことが、同様に力学的に説明される。ここでは我々は何も変化させることはできないが、しかし我々はそのことを理解し、耐えることを学ぶのである。王は、神の恩寵によって統治するが、神は力学の基礎法則なのである。

^{訳注8} シラーの戯曲『デメトリウス』にある台詞。訳文は海老澤による (Schiller 1999, p. 78)。

ダーウィンの学説は、人体や動物の体の器官の合目的性を説明するだけでなく、なぜしばしば目的に合わないものや、余分な器官、さらには欠点そのものさえもが生物のなかに成長し得たのか、成長しなければならなかったのかということへの正当化を与えることが知られている。

我々の衝動や情熱の領域においても同様である。適応と遺伝により、全般的に個体と種の維持のために必要な基本的衝動 [Grundtrieb] だけが形成され得る。そこでは、個々の場合においてはこの基本的衝動が間違っていて働いたり、無用に、それどころか有害になるということは避けられない。しばしば、我々に生まれつき備わっている衝動はある程度は的を外してしまうのである。ある作用を獲得するためにこの衝動が我々の精神に結びついている力は非常に大きいため、その作用が獲得され、いまや習慣となった衝動が余分なものかあるいは有害なものになるときでも、我々はすぐにこれから逃れることはできない。したがって新しく生まれた子供にとって修得という衝動は、他のものすべてに比べて重要性において勝っている。それゆえ、その修得という衝動が他のすべてに比べて強く、後に既に分別を身に付けたその子供がもはやしばしば信じられないほど長い間その衝動から逃れられなくなったときに、それが負担になったとしても、驚くにはあたらぬ。大人は子供にほほえみかけるが、しかし大人において種の保持のために役立つ衝動の、目的に合わない転倒した継続的作用が、なお多くの不合理な形を取ることは珍しくない。

類似した現象は、純粋に精神的な領域においても見出される。だから我々は、自分の感情を決まったイメージや印象に非常に強く結び付けており、それは工夫をこらして書かれた物語や演劇作品のほうが、我々から遠く離れた人々の現実の不幸についての短いありのままの報告よりも、はるかに我々の心を打つほどである。

同様の作用は、哲学的思考の領域においても現れる。我々は、様々な事物が人生に役立つものか有害なものであるかに応じてその価値や無価値を判断することに慣れている。このことは、我々が最終的には人生自体の価値・無価値について判断できると信じており、それどころかこの転倒したテーマについてかなり多くの本が書かれたほどに我々にとって習慣となっている。

私が確信するところでは、思考法則 [Denkgesetze] とは、我々が事物について心に描いた内的な観念 [Ideen] の結合が、どんどん事物の結合に順応してきたことによって生じてきたものである。経験と矛盾するようなすべての結合法則は放棄され、これに対して常に正しいものへと至るような結合法則は多大なエネルギーをもって保持され、保持されたものは一貫して子孫へと遺伝した。その結果、我々はずいには

その規則に公理あるいは生まれつきの思考の必然性を見たのである。しかしここにおいてもまた、特に論理学においてさえも、的を外したものは排除されていない。それどころかまさにその領域の抽象性や見だ目上の透明性のゆえに、このことはかかる場合においては我々を大抵あざむくのである。私はここに、カントにおいてはアンチノミー^{訳注9}と、近時においては宇宙の謎^{訳注10}と呼ばれているあの矛盾の源泉を見ている。いくつかこの種の例を導入することを許してほしい。我々はつねに概念をより簡単な要素に分解し、現象を我々にとって既知の法則から説明しなければならない。この極めて有用でまた必要でもある活動は、我々にとっていま説得的な見かけが生じるほどに習慣となっており、もっとも簡単な例はさらにその要素へと分解され、基礎法則はさらに簡単なものへと還元されねばならないであろう。

数概念の定義、因果法則の原因、物質・力・エネルギーの本質などについての問いは、哲学の教育を受けた者の胸にさえも、自然と繰り返し湧いてくる。彼は、これらの概念は経験から直接に生じ、これ以上説明はできないと、またここで、原因や概念を問うという抵抗なく慣れてしまった思考習慣は的を外していると、確信しているだろう。それにもかかわらず、数や因果といった重要な概念がその定義の試みを嘲笑うことへの不満がある程度残ることを彼は乗り越えられない。ここでこのことは、その力学的な原因を明確に認識したあとでも、目の錯覚は依然としてなくなるらない、というのと同様である。

もう一步前へ踏み出せば、我々は、我々自身が、あるいはともかくも何かが存在しているということが不可解で謎に満ちたものだと思っている。我々は、人生全体の判断における価値や無価値の概念のように、不可解さの概念がここではあまり適用できないということを認識したときでさえも、この考えを完全に捨てることはしていない。

ここに相応しい他の例は、今は独我論と呼ばれている、かなり古い誤りが与えてくれる。血管の血流が、外部の印象に対応しない音感覚を引き起こすこと、あるいは明

^{訳注9} カントが『純粹理性批判』において提示した、超越論的仮象と呼ばれる、理性の陥る誤りの一つ。(1) 世界は有限か否か、(2) 物質は単純な要素から成るか否か、(3) 自由は存在するか否か、(4) 必然的存在者は存在するか否か、という4つの問いすべてに対して、理性によれば肯定的に答えることも否定的に答えることも可能であるため、理性の役割に対して一定の制約が課せられる(福谷 2007, pp. 154-155)。

^{訳注10} デュ=ボア=レーモン (Emil Du Bois-Reymond, 1818-1896) による「宇宙の七つの謎」(Die sieben Welträtsel. 坂田徳男訳『自然認識の限界について・宇宙の七つの謎』(岩波文庫, 1928))の講演で提示された問題のことであろう。デュ=ボア=レーモンはこの中で、科学によっては解くことが出来ないであろう7つの問題を提示し、「我々は知らないであろう」(Ignorabimus)というフレーズで知られる不可知論を唱えたことで知られる。

るい〔光を発する〕対象が我々の視界から消えたあとでもその残像を知覚できること、それどころか、我々が完全な暗闇においてさえ、何の事物にも対応しないような多彩でしばしば幻想的な物を見るのが力学的に理解できるように、我々の意識〔を司る〕器官が夢の中で外界とまったく独立な現実離れした働きをすることもまた力学的に理解できる。同様の、控え目な程度でなされるその働きは、むしろ想像力として新しい観念の結合の形成のために有用であり必要である。しかしまたこれは、しばしば的を外してしまう。素朴な人間は太陽と月、木と泉を魂のある存在として扱ったが、教養ある人間もまた、力のことを人間の力の働きという像のもとに考えているのである。この場合は、厳格な統制、すなわち夢想による単なる付加物のすべてを厳しく否定することが必要である。これは、訓練を繰り返すことで再び習慣となる。それを極端にまで推し進め、また相応しくないところで適用してしまうことにより、もっぱらすべての我々の表象〔Vorstellungen〕は夢であり、表象する者、つまりただ一人の夢を見ている人以外には何も存在しない、という観念へと至ってしまう。この誤りは、我々の通常の表象の働きの発達と同様に、ダーウィンの理論の観点から理解できる。ところで後者〔通常の表象の働き〕の力学的な本性は、最近になって確かに健康な状態においても睡眠による混乱の可能性によって証明されているが、しかし多くはいまだに病気の状態における幻覚、熱譫妄、精神障害によって証明されている。

ダーウィンの理論の観点からはまた、人間の悟性〔Verstande〕に対する動物界の本能〔Instinkt〕の関係が理解できる。動物にはすでに、その動物が完全であればあるほど、本能に加えて悟性の痕跡がより多く見られる。

少ない数の行動——しかも常にきわめてよく似た環境のもとで起こされる行動——しか必要としない動物にとっては、多くのことを考える必要なく、正しい行動の仕方への衝動が生まれつきのものであることがもっとも有用であろう——教えてもらうことなく生まれつきの本能によって、驚嘆すべき巧みさで巣を作ることを理解している鳥のように。我々が教育も受けず、多くのことを思案することもせず、常に正しいことを的確に捉えたいと望んだとすれば、そのことは我々にとっておそらく、見かけ上は非常に完全な状態として映るであろう。しかし、その動物がいるような単純な条件下では、完全な行動の方法への衝動が全体として遺伝することは、簡単でさほど複雑ではないことであったが、その一方でこれは変化した環境に適応することや進歩に対しては妨げとなり、複雑な生活環境の下では人間に生まれつき備わった能力——外的な事象の内的な像を形成すること、それにより経験を収集すること、これにしたがってどのような場合でも行動の統御が可能になること——の方がはるかに優越する

ことが明らかになる。

ところで、人間においては本能は確かに非常に退化しているが、その痕跡は至る所でまだ認められるのであり、しかもそれは上述した〔乳児の〕しゃぶる衝動や、子供の持つ模倣への衝動のような場合においてだけでなく、熟慮を抑え込んだり熟慮に先行するような、成人の持つすべての基本的な衝動においても見られる。突然騒音が起きたときの驚きと、突然危険が迫ったときの恐怖は、不意に襲撃されたときの怒りのように、我々の意思に反して理性的な振舞いに先行する。我々の振舞いに必要な後押しや活発さを与えるために有用な、強力な印象に対して激しく反応するという遺伝により受け継がれた習慣は、そこでは抑えきれないほどの作用を及ぼし、熟慮に対してあまりにもいちじるしく先行する場合には有害なものとなる。享楽への強い欲望や怠惰と同様、功名心、支配欲、同情、嫉妬といった我々の気質の基本的衝動は、総じて遺伝により受け継がれた体質や、特に生まれつきの本能から生じるものである。純粋な理性的基礎がすべての我々の行動の動機である、ということから、我々はどれほど遠く離れていることか。我々の行動へのもっとも内的な衝動は、依然としてほとんどの場合は生まれつきの衝動や情熱から、すなわち我々に芽生えている本能への助力なしに生じる。〔そうした〕本能は、理性を支配しているときには、確かに有害でありまた非難すべきものであるが、我々の行動の仕方に活発さを、我々の気質にその固有の色合いを与えるためには必要なものである。世界の動きは、シラーの言うように保たれている。「今日、かつて空腹と愛によってそうであったように、哲学が世界の輪をつなげる日はまだ遠い。」^{訳注 11}

本能的な性格は迷信もまた持っているものであり、これはしばしば教養ある人でさえも完全に振り払うことはない。迷信は、何の正当性も存在しない場合に、我々の因果律の要請が作用を及ぼし続けることによって生じる。至る所で因果的な結合を求める習慣は、純粋に偶然であるように見える出来事を、多くの場合完全に異質な何か他のものと結び付けるように我々を刺激し、正しく用いらればすべての認識の基礎となる原因と結果の法則は、我々を間違った道へと導くような誤りとなるのである。

いま、社会的な傾向というメカニズム全体がどれほどよく我々の考察の枠組みに適合するかを想起する必要がある。そこでは、我々は無数の作法と礼儀の形式を、いくぶん不自然なまでに有しており、しばしば理性と呼ばれるが、力学の絶大な力を忘れ

訳注 11 この典拠は不明だが、シラーの詩 *Die Weltweisen* (世界のやり方) に類似した一節が見られる。「世界という建物を／哲学がまとも上げるまでしばらくの間／それ〔世界〕はその営みを／飢えと愛によって保つ」

てしまっているような偏見のない考察の観点からは、そうした作法と礼儀の形式は馬鹿げており嘲笑すべきものであるように見えると確信するほどである。これらの作法は常に同じであるわけではなく、異なる民族においてはそれは我々のものとは非常に異なり、我々が完全に混乱してしまうほどである。しかし、それはそうでなければならぬ。

社会的な交際に関するどんな旧来の風習や規則も正確に観察すること、そのすべての肩書を挨拶において正確に用いることや、社会的な特権を承認することを監視している保守的な人の、あるいは術学的で時代遅れの、そして堅苦しい作法にうるさい人の活動は、我々にはしばしば嘲笑すべきであるように思われる。しかし、この活動は良いことであり、社会的な交際の粗暴化が生じないようにするためには、良いことでなければならない。これに対して、それが精神の化石化につながらないように、解放的な人、自由な人、遠慮のない人が配慮をしている。両方の種類の人間がおたがいに戦い、そして社会を適切な平衡状態に保つのである。

社会的生活のまったく別の領域には、ある他のメカニズムが定常的な非常に激しい運動をしつつ、常に「社会の」平衡状態を保ち続けながら作用をはたらかせている。それは人類がつくり出したもっとも偉大な類の驚嘆すべきメカニズムのひとつ、すなわち資本の、金のメカニズムである。ゾラの小説『金』[*L'argent*] 訳注¹²を読むとよい。原民族の原始的な物々交換は、次のことによりこれほどまでに洗練されてきた。それは、様々な金の形式が、複雑な時計細工の歯車よりも、商人の取引や取引所での取引のすべての法や伝統的なしきたりと驚くほどよく噛み合い、また最良の設計をされた電気モーターのような活発さ、確実さ、そして正確さでもって働いている、ということである。

貧乏な者は、金持ちを罵倒する。私利私欲から規則をねじ曲げる詐欺師は、生命体における無用な物質のように排除される。しかし、我々の近代的な文明にとっては、金や株の取引は印刷術、蒸気、電気と同じくらい重要である。

ある個人にとってそれ自身では完全に無価値なある量の金属片が、邸宅や公園、ヨット、簡単に言えば、生活を彩るすべてのものを造る材料となり、それどころかその個人の死後長く経っても芸術と科学の傑作の創造に本質的に寄与する賞を制定する手段となると、その人は魔法の力を及ぼしてはいないのだろうか。けれどもその魔法使

訳注¹² 1891年出版。フランス第二帝政期を舞台に、東方への鉄道網拡張計画をめぐる株式投資による、主人公サッカーの栄光と挫折が描かれる（野村正人訳・解説『金』（藤原書店、2003年））。

い自身がまた他方では、自分の心臓の膜の位置が不正確であったり、自分の脳の血管の壁が破れることにより、一群の素晴らしいものすべてを利用できなくなり、一撃で力あるものが一片の死んだものに変えられるとき、力学の法則に従っているわけではないとでも言うのだろうか。

ところで、紙幣を嘲ることもまた私には一方的な観点であるように思われる。けれどもこれ〔紙幣〕は、ゲーテのファウストにおいて非常にギラギラした光のもとで記されたもの^{訳注 13}とは異なる側面を持つ。いやそれどころか、我々が紙幣の名のもとにすべての有価証券、債券、手形やその類のものを含めて考えるならば、それは直ちに人間の商取引の重要な部分、すなわち私のものと君のものを今日の複雑な要請に応じながら調整するメカニズムの王となるのだ。

大げさなことから再び小さなことへと移行するために私が思い出すのは、清潔にすることへの抗いがたい衝動は、わずかでも弱まった場合には陰口好きな人によって元通りに強くなるものだが、これはすべての有害な伝染ウイルスの住居から距離をとることによってもっとも有用となる、ということである。もちろんそのような衝動的な外れとなろう——例えば真鍮の一部分が常にぴかぴかに保たれ、その古つやが無害であるばかりでなく今日のギラギラした夜間照明においてはむしろ目にやさしい、ということになったときには、しかし私は決して、塵をきれいにすることが、召し使いの代わりに細菌学者にゆだねられれば我々はよくなるだろう、とは主張するつもりはない。

私のテーゼを支持するさらなる例を与えることに、私は困ってはいない。私はむしろ、それを支持する例でないような何がしかの出来事を見出すことに困難を感じている。

我々はこうして、肉体的な器官だけでなく、精神生活もまた、そしてそれどころか芸術と科学、感覚印象と感動をも力学の領域へと変えてきた。いま力学は、こうした事物の提示のためには事実あまりにも力学的ではないのか、人間の手により造られたもっとも複雑なメカニズム、それはもっとも単純な植物的あるいは動物的なものに比べていかに取るに足らず、また生気に乏しいことか！

私がこのような説明をするときに、どのような恐怖が夢想家を襲い、すべての偉大なもの、高貴なものが無感覚な死んだメカニズムへとおとしめられること、すべての詩文が病み寝えることをいかに彼が怖れているかを、私は予め見通している。しかし、

訳注 13 『ファウスト』第Ⅱ部第一幕を指していると思われる。帝国の財政が窮乏状態にあったため、ファウストとメフィストフェレスはありもしない地中の財宝を担保に兌換紙幣の発行を提案し、状況の打開を図る。

私にとっては、こうした恐怖すべては述べてきたことの完全な誤解に基づいているように思われる。

事物 [Ding] に関する我々の観念は、その本質と決して同一ではない。それは単なる像、あるいはむしろ指示されるものを必ず一方向的に指示する印 [Zeichen] であり、それはむしろある種の本質との結合を模倣するという以上のことはなし得ないのである。ここでは、その本質は完全に触れられないままである。

我々はしたがって、以前の表現の鋭さと明確さについて、何も撤回する必要はない。しかしそれと同時に、我々は、精神的な現象と自然の簡単なメカニズムの間のあるアナロジーを主張する以上のことはしていない。我々はただ、現象のある結びつきを感覚的に知覚できるようにし、我々には未知の新しい現象を予言するために一方向的な像を構築してきた。しかし、その一方向性のゆえに、このひとつの像に加えて対象の内的な側面や倫理的な側面を表すような他の像も同時に現れることが可能だし、またそうでなければならない。そして我々の魂を後者の像によって高めることは、我々が力学的な像から正しい理解を得ている限りもはや妨げられることはない。力学的な像はそれが相応しいところでのみ適用することができるものであろうが、しかし我々は、その有用性は疑わないだろうし、またもっとも高貴な観念や表象が、やはり再び像になる、すなわち現象の結びつきの仕方についての外部への印となることを考慮に入れるだろう。

それによってまた、私の論述が宗教に反するものだという、場合によっては持ち出されたかもしれない反論がなくなる。まったく別物の、比較にならないほど堅固な基礎を持つ宗教的概念を、外界の事物について我々が作り出す不安定で主観的な像と結び付けることよりも本末転倒なものはない。提示された見解がなにか宗教に対する危険を含んでいるようなときには、私は決してそれを述べることはしないだろう。しかし私は確かに知っている——地球が静止しているか太陽の周りを運動するかという問いと同様、そうした見解は宗教とは関係のないものであると誰もが悟るときが来ることを。

力学的説明の原理は、科学全体の領域においてますますその支配権を拡張しているが、しかし不思議なことに、同時にその固有の領域である理論物理学においては土台を失った。その原因は、国が征服を行うときにはしばしば事実であるように、部分的には内部分裂に、部分的には外部との関係にある。

力学の適用を非常に細かな詳細に至るまで仕上げる努力が大きな成功を収めてきた一方で、その支柱を揺さぶり始め、力学の諸原理における不明確さを示すような方向

が登場した。力学の基礎をなす概念は運動の概念である。他のどんな変化からも切り離された、純粋な運動の概念は、ただ剛体の考察においてのみ明らかとなる。ここでは我々は実際、その空間中における位置以外には何も変わらないような、完全に不変な物を有している。いま、自然界には完全な剛体は存在しないが、しかしその形状を運動中にはただ気付かれないほど小さくしか変えないような固体は、ともかくも存在する。流体や気体の形状の変化をその微小粒子の運動に還元しようと試みられているのは自然なことだ。それらの形状の変化は、確かに実際、感覚的に知覚できるバラバラの物体から構成されている砂山の形の変化と、見かけ上は似ている。それにもかかわらず、現実の流体の場合には、どの個々の粒子もすべての時点にわたって同定することが可能であるという仮定にはいくらか仮説的なものが存在する。経験によっては、我々にはまさに全質量と全重量の不変性のみが与えられているに過ぎないのである。

さて、一見したところ定性的ですらある変化も微小粒子の運動に還元できなければならぬ、ということを実験的に証明することが試みられてきた。これは、運動している対象が常にそのままである場合、運動が唯一の現象であるからだ。私は、すべてのこの種の形而上学的基礎は不十分であると思う。もちろん、運動の概念を我々はどんな場合でも形作らねばならない。だから、すべての一見したところ定性的な変化が微小粒子の運動もしくは配置の変化の像のもとで表現することが出来たとしたならば、これは特に簡単な自然の説明へと至るであろう。このとき自然は我々にとってもっとも理解できるものに見えるであろう。しかし、自然の理解がこのようななされることを強制はできない。それがうまく行かない可能性、すなわち我々が自然の記述のためにまた別の変化の像を必然的に有するという可能性は開いたままにされねばならない。この可能性を考慮することがまさに物理学の最近の発展によって容易になったということはもっともなことである。

力学的な物理学においては、すべての物体は質点の集合体 [Aggregat] であると考えられ、それらは離れていてもお互いに直接的に作用するとされていた。きわめて小さな(分子的)距離では、凝集力、付着力、化学力が作用し、大きな距離では重力が作用するとされた。秤量できる物質のほか光エーテルも想定され、それは剛体と完全に類比的に考えられた。これに対して、我々が既にはじめに説明したように、電磁気現象は、その粒子が[質点と]同様に離れていてもお互いに直接作用し合うような電氣的・磁氣的流体によって説明されていた^{訳注 14}。この仮説はすべての観察された現象

訳注 14 荷電粒子間に働く遠隔作用によって電気現象を説明しようとするプログラムは、19世紀半ばに W・

に対して正しいことが長い間知られていた。[しかし] ようやく 10 年ほど前に^{訳注 15}、ヘルツが実験によって、ファラデーとマクスウェルが既に推測していた次のようなことを証明することに成功したのである。それは、電氣的・磁氣的な力は離れたところに直接的に作用するのではなく、光の速度で体積要素から体積要素へと伝わる状態変化によって生み出される、ということである。これにより、古く権威ある電氣的流体の理論は打撃を受け、間も無くそれに屈することとなった。しかしまた別の理論がヘルツの実験により打撃を与えられていた。すなわち、電磁波の伝播の法則は、光の運動の法則とのあまりにも絶対的な一致を示しており、双方の現象の同一性を疑うことがもはやできなくなったのである。光は光エーテルの微小粒子の振動運動に由来する、ということがそれによって決定的に反駁されたわけではないにしても、それでもこの光エーテルは確実にこれまで与えられてきたよりもはるかに複雑な性質を持たなければならない、ということが証明されたのだ。これによって電気と磁気の理論は、いくつかの立場から、逆に力学のもっとも簡単な法則を電磁気学の理論から導こうとすることで、力学のヘゲモニーに代わって理論物理学における電磁気学主義のヘゲモニーを認めようとする試みがなされるほどの優位性を獲得したのである^{訳注 16}。

他方では、すべての仮説に対して疑いが向けられ、[そこでは]理論の課題は、決して経験的に与えられるものを超えることのない、現象の記述を与えることに制限された。そこで、二つの極端な方法の間で選択肢が与えられる。あまりにも特殊な仮定をするならば、余分なものや、あるいは正しくないものさえも観念の領域に受け入れてしまうという危険を犯すことになる。これに対してすべての仮説を捨て去ろうとするならば、理論は決定されないままで、またまったく新しい種類の現象を予言し、実験を新しい道に導くためには不適當なものとなる。ある時のあまりにも大胆な仮説に、それに応じた反動が続いてきたのは理解できることである。

このために生じたのは、その重要性が既にライブニッツによって明確に認識され、長い間力学において重要な役割を担っていたある概念が、次第に現象界全体を包括する強力な帯へと成長した、ということである。すなわち、エネルギーの概念である。これは物質の概念よりも抽象的ではあるが、どの現象においても正確に追跡できるし、

ヴェーバーや F・ノイマンによって展開されていた（広重 1968, pp. 14-20）。

^{訳注 15} ヘルツがマクスウェルの電磁気学によってその存在が予言されていた電磁波を検出し、それが光速で伝播することを発見したのは 1887 年である。

^{訳注 16} 物理学を電磁気学によって基礎付けようとする運動については、Jungnickel and McCormach (1986, pp. 227-245) を参照せよ。

またそれどころか、ある物質についての、その物質にどこかで結びついているであろう推測の根拠のすべてを我々が持っていない場合でも、[エネルギーは]定量的に決定できるのである。

エネルギーは、いまやその現れの形式のいずれにおいても他の特徴的な特質を示しており、また顕著なアナロジーをも示している。この結果、エネルギーの変換と性質についての理論は、まもなく理論物理学においてもヘゲモニーを獲得することを目指し、エネルギー論 [Energetik] となろうとするほどに影響力を増した。私がこれをすぐにこの場でさらに検討する必要はない。というのはまさに直接的な遠隔作用という極端な方向と同じく、エネルギー論もかつてこの大学の同僚の初回講義において非常に明快に論じられたからだ^{訳注 17}。

形式論理的な基礎に関する限りは、古い力学は力と物質の二元論に与してきた。物質は運動するものである。我々は現在、どの個別的な運動に関しても原因を求めようとすることに慣れている。この思考習慣をその正当化されている領域を超えて拡大し、またその適用にあたって的外してしまうことによって、特に物質とは別のある特別な原因を仮定しなければならない運動現象が生じると考えられた。これには力という名前が与えられ、物質に並んで特別な存在が付与された。キルヒホッフはこの必然性を否定し、物質の単なる仮定と記述可能な決まった法則によるその運動という事実で十分であり得る、と考えた^{訳注 18}。彼はけれども直接的な遠隔作用は保持した。しかし我々の今日の認識のもとでその[遠隔作用の]内の何が残っているかを真剣に問えば、我々はもはや多くのものを見出すことはない。電気的・磁気的な力は遠隔作用を及ぼすのではなく、体積要素から体積要素へと[近接]作用を働かせる。弾性力と化学力、あるいは吸着力と凝集力は、遠隔作用なしではその作用領域がごく小さくなるが、これらについても同様に遠隔作用の存在が証明されることはあり得ない。ただ重力だけが残っているが、しかしここでもその作用の法則の静電的・磁気力とのアナロジーが、媒質を通じての伝達を蓋然性のあるものに見せているのである。

^{訳注 17} McGuinness は次の 2 つのことであろうとしている (Boltzmann 1974, p. 152, n. 1). J. C. F. Zöllner, *Über die universelle Bedeutung der mechanischen Prinzipien: Academische Antrittsvorlesung, gehalten in der Aula der Universität Leipzig am 15. December 1866* (Leipzig: W. Engelmann, 1867); W. Ostwald, *Die Energie und ihre Wandlungen: Antrittsvorlesung, gehalten am 23. November 1887 in der Aula der Universität Leipzig* (Leipzig: W. Engelmann 1887). なお、エネルギー論については 稲葉 (2010) も参照せよ。

^{訳注 18} キルヒホッフは、力学の任務を現象の説明ではなく記述であるとし、時間・空間・物質という基本概念から力学の一般的な方程式を構成するとともに、質量や力は派生的な概念であると主張した (Jungnickel and McCormmach 1986, pp. 125–129).

たとえニュートン自身が応急手段としてのみ直接的な遠隔作用に言及していたとしても、古典力学という建築物全体はその観念に合わせて構成されている。それゆえ、ヘルツが力学を根底から革新しようとし、加速作用のかわりに条件方程式 [Bedingungs-gleichung] を据えたことが我々を驚かせることはあり得ない^{訳注 19}。しかし、ヘルツもまた物質を質点から構築していた。これら質点は確かに離れたところでお互いに力を及ぼすことはないが、それらの間に存在する条件は [遠隔作用] と同様に離れた点を瞬時的・直接的にお互い結びつけているのである。ヘルツはつまり遠隔作用のかわりに、ある遠隔条件方程式 [Fernbedingungs-gleichungen] をおいたのだ。

ブリル^{訳注 20}は、ヘルツの方法を連続体に適用することを試み、この方法で非圧縮性流体の運動方程式を導出することに成功した。いま、ケルヴィン卿によれば、渦の輪の交換作用、あるいは、その中に硬い物を沈めることの出来る流体における通常の運動現象からその本性を説明することができる。このとき実際、その現象全体の像をヘルツの力学という土台の上に完全に得るであろう。しかしただちに分かるように、これは古代の空想的な世界像と異なるところが多いわけではまったくない。その利益は、ヘルツの力学の美しい哲学的基礎から期待されるのと同じくらい大きいとはとうてい言えない。後者 [ヘルツの力学] を他の仮説のない仕方で改良することは、しかしこれまで成功していない。

電磁気に関する最新の見解がもつばら体積要素から隣の体積要素への作用の中に救済を見出すことをそそのかしているとき、他方ではまさに最近陰極線や電解質中で観測されているある現象が、電気さえもが原子的な構成を有しており、離散的な要素、すなわち電子から成るのであるという想定のみかけとなった^{訳注 21}。したがって、古いカントのアンチノミー、すなわち物質の無限分割可能性と原子的構成の間の対立は、科学にいまだに息つく暇も与えていないことがわかる^{訳注 22}。ただ我々は現在、この双方の見解を、思考法則から生ずる、内的・論理的な矛盾と結び付いているようなものであると考えているのではなく、そのいずれにも、我々によって構成された内的な像を見ているのであり、そしてどちらの像がよりはっきりと、より容易に改良することが可能で、最大の正確さと最高の明確さでもって現象の法則を再現するのかを問題に

訳注 19 訳者前書き注 3 を参照せよ。

訳注 20 Alexander Brill, 1842-1935. 代数関数, 代数幾何学, 数学教育法などの業績が知られるが、1900 年前後にヘルツの力学に関する論文をいくつか著している。

訳注 21 電子は 1897 年、J・J・トムソンによって発見された。

訳注 22 訳注 9 を参照せよ。

しているのである。

最後に、いま考察の結果を要約するならば、次のように述べるができる。多くの努力や高い理想がすべて何も損なわれることないままに、非生物界および生物界のすべての現象のある側面は、純粋に力学的な像によって、これまで他の方法では達成されなかったような正確さで表現することができる、あるいは——こうも表現できようが——理解できるようにすることができるのである。

さて、あなたがた、私の来たるべき生徒と学友にもう一言を。あなたがたにこの大学で与えられるものを理解するときには、理想主義に満ち、高い情熱を持ってほしい。しかし、それを消化するときには、機械のように力学的で、根気強く、常に前進してほしい。

II. 初回講義 (1902年10月, ヴィーン)

諸君!

就任講演では、前任者の賞賛とともに始めるのが常である。この時折面倒な課題を、私は今日は省くことができる。というのは、ナポレオン一世も自分自身の曾祖父となることには成功しなかったが、私はいま自分自身の前任者であるからだ^{訳注 23}。だから私はすぐに実際のテーマの考察に入ることができる。

さて、力学の諸原理についての初回講義を行うことには、私はもうある程度慣れている。既に私が33年前にグラーツで大学の正教授として活動を始めたときの講義がこのテーマを扱っていたのだ。それ以来、私はヴィーンで今日に至るまで三度この題材を考察する講義を開講し、これに同じ対象についてのミュンヘンでの初回講義が一度、ライプツィヒでの初回講義が一度付け加わるのである^{訳注 24}。

実際、この主題を何度も考察できるということは、繰り返すすぎることではないほど重要である。力学とは、理論物理学という建物全体がその上に建てられているような基礎であり、この科学 [理論物理学] の残りの分野すべてがそこから萌え出するような根なのである。このことは、一方では物理科学の歴史的発展を考察し、他方ではまた

訳注 23 訳注 1 を参照せよ。ライプツィヒ大学ヘボルツマンが異動した後、ヴィーン大学の理論物理学教授職は彼の復帰まで空席だった。

訳注 24 ボルツマンは 1870/1 年の冬学期にグラーツ大学で「解析力学」(Analytische Mechanik) の講義を開いている。ヴィーン大学では 1894/5 年冬学期、96/7 年冬学期、98/9 年冬学期の三度「解析力学」を開講し、ミュンヘン大学では 1891/2 年の冬学期に「解析力学」を、さらにライプツィヒ大学では 1900/1 年の冬学期に「解析力学」(この初回講義がこの翻訳の前半部である) を講義している (Höflechner 1994, I. pp. 312-314)。

その論理的・内的な構成に注目したときに理解される。

科学がどんなに強くその目的の理想性を誇り、技術や実践をいくらか蔑視して見下していようが、その起源が純粋に実践的な必要を満たすことへの努力にあることは否定できない。加えて、今日の科学が技術者のなかに非常に有能なパイオニアを持っていなかったとしたなら、その凱旋行進は決して比類のないほど輝かしいものとはならなかったであろう。

人類の力学的活動の最初の跡を見出すためには、我々は現代から、すなわちレントゲン線と無線電信の時代から^{訳注 25}、人類の文化の一番最初の時点に戻らなければならない。人類の最初の道具は棍棒であった。棍棒はオランウータンも扱っており、しかもこれは、我々が棍棒を凌駕したとと思っているような今日においてもなお、人類の発明精神と技術的明晰さのかなりの部分が取り組んでいるようなある目的のためである。平和主義者ならば、その目的を人殺しと名付けるだろう。兵士であればそれを人類のもっとも高貴な善のために、すなわち榮譽、自由、祖国のために命という最高度の代価を払うことと言うだろう。

事情はどうあれ、いずれにせよ我々は棍棒において既に力学的な道具、すなわち技術のための自覚的な意識という最初の贈り物を認めなければならない。後に人類の文化が発展を始めたとき、最初に発明されたのは、音響的・光学的な装置でも、熱的・電磁氣的機械でもなかった。事態は少しばかりゆっくりと進んだのである。自然のほら穴をよりよく塞ぎ、人工的なほら穴を作る必要が、次第に住居や城の建設へと至った。この目的のために重い石や巨大な木材を運搬する必要が発明精神を刺激した。人類は適切な形の枝を円筒へと丸め、後には未熟な造りの車輪を製作し、棍棒をもっとも原始的な形の梃子として用い、そうして初めは無意識に、それから意図や意識を増しながら、本来の意味での力学の領域に入り込んだのである。

熊の毛皮^{訳注 26}と樹皮の靴の発見者に脱帽せよ。ある人間が、巧みに下に置いた柱によって、永久に自分の仲間の巨大な拳をあざ笑うかにみえた重さをもつ石を最初に動かしたとき、彼はきっとマルコーニにも劣らぬ満足を感じただろう。なぜならマルコーニは、最初に空気中を通じて海を越えて伝送された電信信号を検知したからだ——もちろんこれについて新聞が報じていたことがすべて正しいという前提のもとで。

^{訳注 25} レントゲンが X 線の発見を報告したのは 1896 年初頭、マルコーニが無線電信の通信実験に成功したのは 1895 年である。なおマルコーニは 1901 年、大西洋横断無線通信実験にも成功している。

^{訳注 26} 原文では Bärenfällen（熊狩り）となっているが（p. 331）、Bärenfell の誤りだと思われる。英訳の解釈に従った（Boltzmann 1974, p. 147）。

非常に目立たない始まりから力学は、最初は限りなくゆっくりと、しかし不断に、そして後にはますます急速なテンポで成長した。既にアルキメデスをして、彼の時代に達成されたことが、次のような驚異的な考えを抱かせている。それは、ただ一つの確固とした支点が与えられ得るならば、思い切って世界を根本から動かすこともできるだろう、ということである。さて、もちろん今日の技術の進歩によってはもちろん地球は動かされていないが、しかし社会的な組織全体、すなわち人類の通商取引全体は実際にほとんど根本から動かされている。

ところで、自然科学の領域における進歩は、人類の思考の仕方や感覚の仕方を根底から変革してしまった。以前の人道主義的な時代が総じて魂のあるもの、感覚するものを認めていた一方で、我々は残念ながらますますすべてを機械の観点から考察することに慣れてきている。以前には徒歩で旅行する人は、歌いながら森や野をさまよい歩き、駅馬車の中でも、退屈のあまり過度に怒っていなければ、詩を書いたり夢を見たりすることこそがもっとも大切であった^{訳注 27}。今では特急列車や蒸気船の中でも働いたり計算したりしている。かつては御者は人間の言葉で説得することで馬の気持ちを制御しようとした。今は人々は電気モーターや自動車を二三のハンドル操作で黙って操縦している。

けれども、我々は自然の魂という表象から逃れているわけではない。今日の大きな機械、それは意識を持った存在のように働かないのか。機械はシューシューと音を立てて息を切らし、声を轟かせてはめそめそと泣き、呻き声、恐怖の叫び声、警告の声を上げ、労働力が余ったときには甲高い音で笛を吹く。機械はその力の維持に必要な物質を周囲から取り出し、またそこから不必要なものを、我々自身の身体と正確に同じ法則に従って取り除くのである。

次のように想像することは、私には特有の刺激がある。それは、様々な領域で変革をもたらしてきた人物たちは、後継者たちがその精神にならって、様々にその肩の上に立ちながら獲得したものをどれほど嬉しく思うのだろうか——例えば、モーツァルトがいま交響曲第九番やパルジファルの素晴らしい演奏を聴くことができたとしたら感じたであろうこと——ということである。おおそ同じことを、偉大なギリシアの自然哲学者、その中でもまず数学の激情家アルキメデスが我々の今日の技術的成果に対して述べるに違いない。素晴らしいものに対する興奮や感受性には、彼らに欠けているところはないだろう。最高度の興奮を、美しいギリシアの言葉を用いて、今日におい

^{訳注 27} 英訳の解釈 (Boltzmann 1974, p. 148) に従い、nichtを補った。

でもなお熱狂 [Enthusiasmus] と呼ぼうではないか。

しかし、私は本来の対象から少々それてしまったので、もう一度これに戻らねばならない。

私はこれまで常に機械と技術について話していた。しかし、この講義であなたがたに機械製造の技法を解き明かすと期待するならば、それは誤りとなるだろう。それは技術的な力学と機械学 [Maschinenlehre] の問題である。この講義の対象はそうではなく解析力学となるであろう。解析力学の定義は非常に一般的なものである。それは、それに従って運動現象の全体が我々を取り囲む自然において生起するような法則を研究しなければならないものだ。

我々はそこにまず、少なくとも観察される限りでは不変の形を持つ、非常に多くの物体を見出す。したがってその運動はいかなる形状変化もない単なる位置変化と回転であり、解析力学はまずこの位置変化についての法則を述べなければならない。他の物体、すなわち流体（可滴 [液体状] および気体状の）は、運動する間にその形状を常に多彩な仕方で変化させる。いま、この絶え間無い形状変化の直観的な像は、流体が微小粒子から構成されていると考え、それぞれの粒子は硬い物体と同じ法則に従って互いに独立に運動するが、しかし [その運動は] 常に流体の隣合う二つの粒子が常にほとんど同じ運動をするように起きると想定されている。外部からそれぞれの粒子に作用する力に対しては、様々な粒子が互いに及ぼしあっている力を付け加えなければならない。このようにしてまた流体の運動を硬い物体の力学の法則へと還元することができる。

運動現象は、我々がもっとも頻繁に、また直接的に観測する現象である。他のすべての自然現象はより隠れがちである。我々はまた、運動現象を最少の数の概念を用いて把握することができる。運動現象の記述のためには、空間における位置と、その時間的な変化という概念で十分であり、これに対して他の現象においては、温度、光の強度、色、電気的張力^{訳注 28}など、非常に多くの不明瞭な概念が必要とされる。

現在は概して、より複雑なものをより簡単なものから説明する——あるいは、より簡単な現象領域から取られた像によって直観的に [anschaulich] 表現する、と言うのが好まれる場合もある——のが科学の課題である。だから物理学においてもまた、音、光、熱、磁気、電気という運動以外の現象を、この物体の微小粒子の単なる運動現象

訳注 28 F・ノイマンが導入した、二つの閉回路の間に働く電気力学的ポテンシャル（広重 1968, p. 20）のことか。訳注 14 も参照。

に還元することが目指されてきたし、しかも、もちろんすべてではないが、非常に多くの現象においてこのことは大きな成功を収めてきた。これによって、まさしく運動現象の科学、すなわち力学が、残りの物理学的分野の根となり、それらの分野はだんだん力学の特殊な一章へと変貌したかのように見えたのである。

ようやく最近になって、これに対するある反動が現れている。純粋に力学的な磁気・電気の説明が示した困難により、すべてが力学的に説明できるかどうかに関する疑いが生じ、まさに電磁気学が実践のみならず理論についてもますます重要性を増した。最終的には形勢を逆転させて、力学を電磁気学的に説明しようとするほどに、電磁気学の力は強くなった。かつては磁気と電気を物体の微小な粒子の回転運動と振動運動から説明することが試みられてきたが、今や物体の運動の基本法則をまさに電磁気学の法則から導出することが目指されたのである。

力学のもっとも有名な法則は慣性の法則である。ギムナジウムの生徒は誰でも今日これに習熟しているが、ここで私はもちろん物理的な意味での慣性について話しているのである^{訳注 29}。最近まで慣性の法則は、それ自身は説明不可能であるが、すべての現象の説明のために引合いに出されなければならないような、自然の第一の基本法則であると思われていた。現在ではしかし、マクスウェルの電磁気に関する方程式から、次のことが導かれている。それは、運動する電氣的微粒子が、質量や慣性さえ持つことなく、単に周囲のエーテルの作用によって、まさにまるで慣性を持つかのように運動しなければならない、ということである。だから、物体とは慣性質量を持つものではなく、単に質量のない電氣的微粒子すなわち電子から成っており、その慣性はまた周囲のエーテルの作用によって、物体がエーテル中を運動するとき引き起こされる見かけのものである、という仮説が立てられた^{訳注 30}。同様に、力学的な力も電磁気的な現象に還元することに成功した。また、以前にはすべての現象をメカニズムの作用によって説明することが望まれていたが、今日ではエーテルが、もちろんそれ自身では完全に不明瞭であるが、すべてのメカニズムの作用を説明するようなメカニズムなのである。今やすべてを力学的に説明することは目指されず、むしろすべてのメカニズムの説明のためのメカニズムが求められているのだ。

ところで、あるメカニズムを完全に正しく理解するとはどういうことだろうか。その実践的な規準がその正しい取り扱い方を知っていることにある、というのは誰で

訳注 29 Trägheit には「慣性」の他に「怠惰」の意味もある。

訳注 30 1881年にJ・J・トムソンが導入した電磁質量と呼ばれる概念のことであろう。訳注16も参照せよ。

も知っている。しかし私はさらに先を行き、これはあるメカニズムの理解の唯一維持できる定義である、と主張しよう。ここではもちろん、ある人があるメカニズムの扱い方を理解することすらなく習得することが考えられる、という反論があるだろう。しかしこの反論は確固たるものではない、我々はただ、その人はメカニズムを理解していない、なぜならその扱い方の知識が規則的な働きに制約されているからだ、と言う。メカニズムに何かの故障が生じたり、機能が損なわれたり、あるいは見たこともないような障害が生じたりするやいなや、その人にはもはや自力で切り抜ける方法が分からないのである。これに対して我々は、ある人がメカニズムを理解しているとは、こうしたすべての場合において正しいやり方を知っているような人について言うのである。だから、この事情が理解の定義を真に構成するものに思われる。我々がいかにしてその概念を構成するかは、定義することが不可能であるし、また常に正しい扱い方に至るのであれば、実際にはまったく重要ではない。

すると、有名で魅力的ではあるが誤った推論は、いわゆる独我論である。これは、世界は実在せず、夢に現れる像のような単なる我々の幻想の産物である、という見解である。私もまたこの奇妙な考えに没頭し、その結果実践的にかつ正しく考察することを怠り、それによって損をしてしまった。私にとっては非常に喜ばしいことに、それから私は外界の存在の求められていた証明を見出した。その証明はもっぱら、この[外界の]存在を疑うときにはあまり正しい行動ができなくなる、ということに存する。

私がすでに言及した力学についての最初の講演を33年前に行ったとき、当時のグラーツの同僚のひとりがこう言って私をからかった。「どうやったらその純粋なメカニズムのようなものだけに限りあつていられるのか」彼が意図していたのは、もちろんただの言葉遊びだけである。しかし私は彼の言うことに引っかかってしまい、いきり立って力学はメカニズム的なもの[Mechanisches]ではないと言ってしまった。しかし、その困難にも関わらず、また何世紀にもわたって偉大な学者たちがその発展のために明晰さを無限に消費してきたにもかかわらず、それでもメカニズム的なものは重要なのである。

慣性の概念については既に話したが、力学の二番目の基礎概念は仕事概念である。力学のもっとも重要な法則はおよそ次のように表現できるだろう——自然はすべてのことを、最少の仕事の消費でもって行う。ここで、自明な裏の意図が頭に浮かばないということがあろうか。仕事概念は、自然科学全体にとってと同様に、実践にとってはもっとも重要で謎に満ちたものではないのではないのか。楽園から追われた最初の夫婦はすでにその仕事に最大の神罰を見ているが、他方では人類は仕事なくしては

人類ではないだろう。絶え間のない仕事を、人類はもちろん鞍馬や、それどころか人類自身によって制作された命のない機械と一緒に。けれども勤勉さは、君主から日雇いの労働者に至るまで、皆のもっとも美しい性格として讃えられている。

最後に私は、次の質問を投げかけたい。人類は、文化と技術の進歩すべてによって、より幸せになったのだろうか。実際これは微妙な問題である。確かに、人間を幸福にするようなメカニズムというのはまだ発明されていないのだ。幸福は、個々人が自身の胸のうちに求め、見出さなければならぬ。

しかし、幸福を邪魔するような有害な影響を取り去ることは、科学と文明は成功してきた。これは、雷の危険、民族的悪疫、個人の病気を克服することを知ることに多くの場合豊かな成果を収めてきたことによる。科学と文明はさらに、我々の美しい地球の上を容易に歩きまわってそれを経験し、天体の構造を生き生きと描写し、自然全体の永遠の法則を少なくともおぼろげにほめかす手段を提供することによって、幸福を見出す可能性を増大させてきた。だから、それらは人類に対して、その身体や精神の力をますます拡大させ、自然の残り全体に対する支配を強化することを可能にし、内的な平和を見出したような人に対しては、より生気を高めながら、より完全に、その平和を享受することを可能にしたのである。

出席者の諸君、私はあなたがたにこの講演において非常に多くのこと——複雑な定理、最高度に洗練された概念、複雑な証明——を提示する課題を有していた。今日、そのすべてのうちほんの少ししか達成できなかったとしたらお赦しいただきたい。私は、然るべきであるように、私の科学すなわち理論物理学という概念を定義することも、理論物理学をこの講義で論ずるつもりであった計画を展開することすらもしていない。それらすべてをあなたがたに今日与えることはしない。私が思うに、我々は後に仕事が進むうちにそれらについてよりはっきりとわかるようになるであろう。今日私はあなたがたに、むしろわずかなこと——すなわち私にとってはもちろんこれに反して自分が持っていることすべてなのだが——つまり私自身、私の考え方と感じ方すべてを与えたかったのである。

同様に、私は講義が進むうちにまたあなたがたに、緊張した注意、鉄のような勤勉、不屈の意志力など、様々なことを要求しなければならないだろう。しかしどうか赦してほしい。これらすべてのことに先立って、私にとってもっとも重要なことをいくつか——あなたがたの信頼、好感、愛情、一言で言えば、あなたがたが与えることのできる最高のもの、すなわちあなたがた自身を請うたとしても。

参考文献

- Blackmore, John, ed. 1995. *Ludwig Boltzmann: His later life and philosophy, 1900–1906: Book Two*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Blackmore, John. 1999. Boltzmann and epistemology. *Synthese* 119: 157–189.
- Boltzmann, Ludwig. 1905. Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit. In *Populäre Schriften*, pp. 198–227. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth. [邦訳: 「理論物理学の方法の軌近における発展について」『世界の名著 現代の科学 I』(中央公論新社, 1970), 443–476 頁]
- . 1974. On the principles of mechanics. In *Theoretical physics and philosophical problems*, ed. B. McGuinness, tr. Paul Foulkes, pp. 129–152. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Broda, Engelbert. 1982. Boltzmann and Darwin. In *Ludwig Boltzmann: Internationale Tagung anlässlich des 75. Jahrestages seines Todes 5. – 8. September 1981*, ed. R. Sexl and J. Blackmore, pp. 129–142. Graz: Akademische Druck- u. Verlagsanstalt.
- Brush, Stephen G. 1986. *Statistical physics and irreversible processes*. Bk. 2 of *The kind of motion we call heat: A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*. Amsterdam: North-Holland.
- D’Agostino, Salvo. 2000a. A foundation for theoretical physics in Hertz’s introduction to *Die Prinzipien der Mechanik*. In *A history of the ideas of theoretical physics: Essays on the nineteenth and twentieth century physics*, pp. 187–199. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- . 2000b. On Boltzmann’s mechanics and his Bild-conception of physical theory. In *A history of the ideas of theoretical physics: Essays on the nineteenth and twentieth century physics*, pp. 201–216. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- De Regt, Henk W. 1999. Ludwig Boltzmann’s *Bildtheorie* and scientific understanding. *Synthese* 119: 113–134.
- Höflechner, Walter, ed. 1994. *Ludwig Boltzmann: Leben und Briefe*. Graz: Akademische Druck- u. Verlagsanstalt.
- Jungnickel, Christa and Russell McCormach. 1986. *The now mighty theoretical*

- physics, 1870–1925*. Vol. 2 of *Intellectual mastery of nature: Theoretical physics from Ohm to Einstein*. Chicago: University of Chicago Press.
- Schiller, Friedrich von. 1999 年. 「デメートルウス(上)」『影』(海老澤君夫訳) 第41 卷, 65–91 頁.
- Tanaka, Setsuko. 1999. Boltzmann on mathematics. *Synthese* 119: 203–232.
- Wilson, A. D. 1993. Boltzmann's philosophical education and its bearing on his mature scientific epistemology. In *Proceedings of the international symposium on Ludwig Boltzmann, Rome, February 9–11, 1989*, pp. 57–69. Graz: Verlag von Österreichischen Akademie.
- 稲葉肇. 2010 年. 「オストヴァルトのエネルギー：熱力学の物理化学への導入との関係において」『科学哲学科学史研究』第4号, 85–103 頁.
- 広重徹. 1968 年 a. 『物理学史 I』東京：培風館.
- . 1968 年 b. 『物理学史 II』東京：培風館.
- 福谷茂. 2007 年. 「カント」加藤尚武責任編集『哲学の歴史 第7巻 理性の劇場』75–176 頁. 東京：中央公論新社.