

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K13045

研究課題名（和文）「研究と教育」から見た量子統計力学の形成過程の研究

研究課題名（英文）Research and pedagogy in the history of quantum statistical mechanics

研究代表者

稲葉 肇（Inaba, Hajime）

明治大学・政治経済学部・専任准教授

研究者番号：00793093

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：量子統計力学は、熱力学に支配されるマクロな物質の性質を、量子論に支配されるミクロな電子や分子が多数集まった集団の統計的性質として理解することを目指す物理学の一分野である。本研究では、20世紀初頭から中葉にかけてのその発展過程を、とくに「研究と教育」の相互作用という観点から理解することを目指した。その結果、研究論文レベルで発案された計算手法（たとえば分配関数）が教科書に取り込まれ、さらにこの教科書がその後の研究を駆動していく際の参照源となる過程を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究と教育の相互作用は近年の科学史で話題となるテーマであり、その相互作用が観察される場としてしばしば教科書が目される。本研究によれば、教科書という媒体は、既存の成果を整理して論理的に分かりやすくまとめるだけのものではなく、それに続く研究者たちにとってのマニュアルとして、さらなる研究の源となる。それゆえ、研究だけでなく、教科書の執筆という教育にかかわる事柄にも、十分な意義が認められて然るべきである。本研究ではそのことを、量子統計力学の発展という事例に即して明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Quantum statistical mechanics is a field of physics that aims to understand the properties of macroscopic matter governed by thermodynamics as statistical properties of large groups of microscopic electrons or molecules governed by quantum theory. This study aimed to understand the development process of this field from the early to mid-20th century, particularly from the perspective of the interaction between research and education. As a result, it revealed the process by which calculation methods (such as partition functions) developed at the research level were incorporated into textbooks, which in turn became a reference source for further research.

研究分野：科学史

キーワード：物理学史 統計力学 分配関数 ダーウィン ファウラー プランク トルマン

## 1. 研究開始当初の背景

科学史研究において、研究と教育の関係を理解することは重要な課題である。トマス・クーンは『科学革命の構造』(1962年)の中で、科学者集団の形成における教育の役割を指摘していた。近年の物理学史では、とりわけ教科書という媒体に注目することの意義がシモン(J. Simon, “Physics Textbooks and Textbooks Physics,” in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, ed. J. Buchwald and R. Fox (Oxford: University Press, 2013), Ch. 21) やバディーノら(M. Badino and J. Navarro eds., *Research and Pedagogy: A History of Quantum Physics Through its Textbooks*, Berlin: Edition Open Access, 2013) によって強調されている。後者の論集によれば、教科書は単なる知識の伝達手段であるにとどまらず、知識体系の変化や旧来の理論との接合、さらには新しい計算技法の普及を含んだきわめて創造的な媒体である。

この「研究と教育」という視点は、統計力学の歴史的展開についても有効であると考えられる。統計力学は大きく古典統計力学と量子統計力学に分かれ、前者の形成過程については報告者の研究により解明が進んでいる一方で、後者の形成過程についてはほとんど手つかずと言ってよいだろう。ここで、古典統計力学の集大成であるギブス『統計力学の基礎的諸原理』(J. W. Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, New Haven: Yale University Press, 1902) の理論が、研究の文脈では量子統計力学そのものの形成に寄与する一方で、その成果が教育の文脈、とくに教科書に取り入れられて普及し、それがまたさらなる研究成果を生み出すことに貢献したと予想される。そこで、量子統計力学の形成過程を、研究と教育の相互作用という観点から、教科書という媒体を軸に探究するという課題が設定できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、1902年から1946年にかけてのアンサンブル理論を中心とした量子統計力学の理論体系の展開を「研究と教育」という観点から探究することで、具体的に問題を解くための計算技法である状態和(分配関数)の考案という研究の文脈と、その教科書への統合という教育の文脈のあいだの相互的な影響関係を検討し、教科書の理論体系の変遷に知識体系の変化が見て取れること、教科書を通じて新しいアイデアが普及したこと、教科書が専門家の研究にとっても有用なリソースとなったことを示し、教科書の持つ創造性を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

文献読解による。状態和の方法の導入にあたって非常に興味深いのは、プランク(Max Planck, 1858-1947)の『熱輻射論講義』第2版および第4版(*Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, 2. Aufl., Leipzig: Barth, 1913; 4. Aufl., 1921. 第3版は第2版のリプリント)である。それはこの本が、当時発展途上にあった量子論の教科書としての役割を果たしただけでなく、当の量子論の発展にともなって大きくその構成を変えているからである。本研究では、この第2版と第4版の異同、とくに状態和の導入過程を検討する。

状態和に関しては、ファウラー(Ralph Fowler, 1889-1944)の『統計力学』(*Statistical Mechanics*, Cambridge: University Press, 1929)という教科書も重要である。この本は分配関数を中心とした統計力学の理論体系を提示しているが、分配関数はすぐに状態和と同一視され、その後の統計力学の基本的な計算法となるからである。

その他、当時の統計力学の教科書として、トルマン『統計力学の諸原理』(R. C. Tolman, *The*

*Principles of Statistical Mechanics*, Oxford: Clarendon, 1938), ランダウとシフシツの『統計物理学』(Lev Landau and Evgeny Lifshitz, *Statisticheskaya fizika*, Moscow: GTTL, 1938), スレーターによる『化学物理学入門』(J. C. Slater, *Introduction to Chemical Physics*, New York: McGraw-Hill, 1939)などが挙げられる。これらの内容を比較することで、どのような統計力学の理論体系が普及したかが明らかになるだろう。

もちろん本研究においては、これら教科書のみならず、その教科書の成立に寄与し、またそれから影響を受けた研究論文をあわせて検討することで、研究と教育の相互作用を明らかにすることに留意する。また教科書に対する書評や反応を検討することで、それに対する当時の物理学者たちの評価も考察する。

#### 4. 研究成果

プランクの『熱輻射論講義』第2版と第4版のあいだの異同については、以下の点を明らかにした。状態和そのものは、1912年のポワンカレの論文「量子論について」にその萌芽が認められる。彼はプランクの量子仮説が黒体輻射の法則を導くための必要条件であることを示すのだが、そのために、共鳴子の平均エネルギーを分配関数に相当する関数で表現したのである。プランクはこの成果を引き継ぎ、1921年に公刊された「アンリ・ポワンカレと量子論」の中で、ポワンカレの熱力学的特性関数を計算するために有用であることを指摘した。

他方でデバイ(Peter Debye, 1884-1966)も1913年のヴォルフスケール講義の中で、固体の性質を統計力学的に論ずる際に「非常に簡単な処方」として状態和を導入し、ヘルムホルツの自由エネルギーを計算している。プランクがデバイの成果を知っていたのかどうかは判然としないが、1915年以降のプランクは積極的に状態和を用いて量子理想気体の性質を考察するとともに、1921年の『熱輻射論講義』第4版を第2版から大きく改訂し、状態和を中心とした熱力学的特性関数の計算法を前面に押し出した。その際プランクは、状態和から系の熱力学的性質を特徴づけるエントロピーやヘルムホルツの自由エネルギーなどの特性関数の計算が行えること、それゆえさまざまな問題の解決がひとえに状態和の計算に帰着されることを強調した。以後、『熱輻射論講義』第4版は、物理学者たちにとっても頻繁に参照され、計算マニュアルという役割を果たすようになった。

分配関数は、ファウラーがダーウィン(Charles Galton Darwin, 1887-1967)とともに1922年、プランクの黒体輻射の法則の導出過程を厳密化するという動機のもと、共鳴子のあいだのエネルギーの「分配」を定める関数として導入したものである。これは早くから状態和と等価であることが気付かれていたが、歴史的に言うならばその導入の動機付けには、熱力学的特性関数の計算をゴールとするのか、黒体輻射の法則の基礎づけの厳密化をゴールとするのか、という点に大きな違いがあることに注意が必要である。またファウラーは、統計力学が熱力学から独立であるという見地に立ち、熱力学的特性関数の統計力学による計算についてはプランクとは異なる見解を取るが、分配関数それ自体は研究論文のみならず教科書『統計力学』においても積極的に問題解決の技法として採用した。『熱輻射論講義』の場合と同様、ファウラーの『統計力学』も広く読まれ、分配関数の技法が普及する大きな要因になったと考えられる。なお、今日の統計力学では分配関数(partition function)に対して状態和(Zustandssumme)に由来すると思われる $Z$ という記号を当てることが多いように思われるが、その一例はシュレーディンガーの『統計熱力学』(*Statistical Thermodynamics*, Cambridge: University Press, 1946)に見られる。

状態和(分配関数)は1938年のトルマン『統計力学の諸原理』とランダウ=リフシツ『統計

物理学』, 翌年のスレーター『化学物理学入門』といった広く読まれた教科書でも主要な計算テクニックとして採用されており, その後の世代の物理学者たちにとってはよく知られた手法となったと考えられる. また, これら 1930 年代の教科書は, 古典統計力学と量子統計力学の双方にまたがるものであるが, それにおいてもギブスの統計力学, すなわちアンサンブルの手法が継承されていることは注目に値する. 1902 年に公にされたギブスのアンサンブル理論は古典論の枠内で定式化されたものではあったが, 必要な修正を加えれば, 量子論においても使用可能な計算手法であり, 量子統計の時代においても生き残ったのである.

また本研究では, 量子統計の先立つ古典統計の時代の代表的な教科書として, ボルツマン (Ludwig Boltzmann, 1844-1906) の『気体論講義』(*Vorlesungen über Gastheorie*, 2 Bde., Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1896-98) を取り上げ, その教科書としての特性を検討した. 教科書としての『気体論講義』は, 第一部がマクスウェル=ボルツマン分布とボルツマン方程式を中心としたかなり体系的な構成を取っているのに対し, 第二部はファン・デル・ワールスの状態方程式, アンサンブルの理論, 気体の解離の理論, 多原子分子気体の理論などかなり多様な話題の寄せ集めであることを確認した. また, 第二部には, 気体論という研究プログラムの方法論的擁護がかなり多い. これは, 当時ボルツマンに対して加えられたエネルギー論からの批判を反映していると考えられる. 他方で『気体論講義』には連続的アプローチと離散的アプローチが共存している. このことはプランクによるエネルギー量子の導入(1900)やその後の量子統計力学の展開にとっても有利に作用したと考えられる.

ただし, 本研究計画では, 当初はアメリカ・カリフォルニア工科大学に所蔵されているトルマンの講義ノートや, オランダ・プールハーヴェ王立図書館に所蔵されているプランク書簡等を調査する予定であったが, 新型コロナウイルス感染症にともなう渡航制限等により, 実施することはできなかった. 公刊文献だけからも以上のような成果は得られたが, より立体的な歴史記述を目指すため, 今後折をみてこれら文書館資料についても検討を進めたい.

なお報告者は, 本研究計画で得られた成果をこれまでの結果と総合することにより, 19 世紀後半から 20 世紀前半にかけての統計力学の歴史を記述した『統計力学の形成』(名古屋大学出版会, 2021 年)を刊行した. 出版にあたっては, 科学研究費補助金・研究成果公開促進費(21HP5010)の支援を受けた.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 稲葉肇	4. 巻 48
2. 論文標題 マクスウェルの統計的知識と自由意志	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 現代思想	6. 最初と最後の頁 164-174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲葉肇	4. 巻 47
2. 論文標題 いかにしてアインシュタインは原子論に到ったか	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 現代思想	6. 最初と最後の頁 157-169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲葉肇	4. 巻 23
2. 論文標題 ボルツマンのピアノ、連続と離散	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 窮理	6. 最初と最後の頁 18-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲葉肇	4. 巻 62
2. 論文標題 【書評】ギブス（廣政直彦・林春雄訳）『ギブス 不均一物質の平衡について』（東海大学出版部，2019年）	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 科学史研究	6. 最初と最後の頁 90-91
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 稲葉肇
2. 発表標題 ベルリン大学講義目録における物理学関連科目：創設から第二次世界大戦まで
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲葉肇
2. 発表標題 統計力学の基礎をめぐる力学的アプローチと統計的アプローチ
3. 学会等名 哲学オンラインセミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hajime Inaba
2. 発表標題 The Tool of Sum-over-states: Research and Pedagogy in Quantum Statistical Mechanics, 1902-1944
3. 学会等名 1st Conference of the International Academy of the History of Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 稲葉 肇	4. 発行年 2021年
2. 出版社 名古屋大学出版会	5. 総ページ数 378
3. 書名 統計力学の形成	

1. 著者名 日本科学史学会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 758
3. 書名 科学史事典（項目「熱力学，統計力学：不可逆な世界」を担当）	

1. 著者名 石田 勇治、佐藤 公紀、柳原 伸洋、宮崎 麻子、木村 洋平	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 744
3. 書名 ドイツ文化事典（項目「アインシュタイン」「物理学」を担当）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------