

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20500876

研究課題名（和文） 量子力学形成期における解析力学の日本への移入に関する実証的研究

研究課題名（英文） Import of Analytical Mechanics to Japan in the Age of the Birth of Quantum Mechanics

研究代表者

中根 美知代 (NAKANE MICHIO)

立教大学・理学部・特任准教授

研究者番号：30212088

研究成果の概要（和文）：ハミルトン

量子論形成期のハミルトン・ヤコビ理論の発展と、その日本への移入過程を分析した。その結果、分光学の量子論的アプローチの際にハミルトン・ヤコビ理論が有効に使われ、また新しい概念が取り込まれたことが明らかになった。このことは、量子論研究の複合的な性質を例示するとともに、断絶していると捉えがちな量子論と古典論の連続的な側面を示した。日本への移入において重要な役割を果たしたのも、分光学を専門とする杉浦義勝らであった。

研究成果の概要（英文）：

This study examines how the Hamilton-Jacobi theory, which is part of analytical mechanics, was imported to Japan. To clarify, this study at first argues how the theory was first developed, and then further developed using quantum physics. It clarifies the various aspects of the Hamilton-Jacobi theory that worked in spectroscopy, which is related to quantum theory. During this process the theory began to evolve into a new idea. This fact exemplifies one aspect of the complexity of quantum theory and the continuity between traditional physics and quantum physics. Japanese spectroscopists, especially Yoshikatsu Sugiura, played an essential role importing the latest Hamilton-Jacobi theory to Japan.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 2009 年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010 年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011 年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：科学史

科研費の分科・細目：科学社会学・科学技術史 ・ 科学社会学・科学技術史

キーワード：量子力学・解析力学・天体力学・物理学史

## 1. 研究開始当初の背景

解析力学のハミルトン・ヤコビ理論は、量子力学で不可欠な数学的方法といわれる。この理論は、19 世紀を通じて天体力学や数学の中で発展してきたものであった。1910-20

年代に形成された量子論で有用と理解されたため、物理学者のなかで必須な理論となったという経緯を持っている。ところが、ハミルトン・ヤコビ理論が有効に作用する場面が特定できていないのが現状であった。一口に

量子論といってもそのアプローチの仕方はいくつかあるが、その中のどの部分で、ハミルトン・ヤコビ理論は有効に使えるか、この理論のどの面がどのように有効かまでは、明らかになっていなかった。このことは、また、量子論の形成過程に研究の余地があることを示している。学説史の研究に限界があったので、量子論の日本への移入はどうあったかという議論が深まらず、理論の中身よりも、研究者の行き来や研究機関の成立に重点がおかれて論じられる傾向にあった。

## 2. 研究の目的

量子論には「物理学の革命」と称されるような新しい物事の見方を含まれている。しかし、それを扱う研究者は、古典論から連続した問題意識のもとで考察をすすめていた。

ハミルトン・ヤコビ理論は、量子論で重要な数学的方法であるが、基本的な理論の枠組みは古典論のなかでできていた。

この理論を視点に入れることにより、量子論形成の一面を古典論から引き続く文脈のなかで見直していく。また、物理学者のためのハミルトン・ヤコビ理論が日本へ移入された過程を調べることにより、量子論という学問の性質を多面的に捉え、また、日本での伝統的な物理学と新しく移入されたものとの関係を明確にしていく。そのうえで、1940年代にかかれた日本人によるハミルトン・ヤコビ理論の教科書を検討し、量子力学定着の日本における標準的な力学の認識を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1)すでに公刊されている研究者の著書や論文を入手し、分析した。それらの入手にあたっては、国内の大学図書館のみならず、ミュンヘン工科大学やドイツ・科学博物館、パリ第6大学を訪問した。

(2)日本人物理学者の手紙（杉浦義勝：理化学研究所所蔵）・日記（堀健夫：北海道大学所蔵・荒木俊馬：京都産業大学所蔵）を検討した。また、海外に残されていた手紙や日記で（Sommerfeld:ドイツ博物館所蔵）を日本人物理学者に言及しているものを閲覧した。

(3)本研究にかかわる重要な日本人物理学者の渡航の状況を調べるため、出張許可書等を確認した。（木村正路：京都大学所蔵・杉浦義勝：理化学研究所所蔵）

(4)日本にハミルトン・ヤコビ理論を移入した世代から教育を受けた世代の研究者にインタビューし、それぞれの物理学者がどのような文脈で力学を捉え、教育していったかがうかがった。

(5)日本で最も初期に量子力学の体系的な講演を行なった杉浦義勝のもとで研究を進めた人々や彼の門下生にインタビューし、杉浦

の仕事の全体像と量子力学のかかわりをうかがった。

(6)得られた成果の報告・検討の場を、さまざまな分野・規模の研究会で持つように、意識的に進めた。

①研究協力者を含む数理科学の歴史にかんする小規模の研究会。

②天体力学の専門家を中心とする、国立天文台での小規模のセミナー。

③東京天文台での、50人規模の天文学史の研究集会。

④英国とカナダの数学史学会の合同年会

⑤日本科学史学会

⑥日本数学会年会

⑧ マックス・プランク研究所（ベルリン）の量子力学史の研究グループでの公開ロキウムおよびグループ内での非公開セミナー。

①と⑧では、同一の話題に対し複数回の発表を行い、進捗状況を確認してもらいながら構想を膨らませた。

## 4. 研究成果

以下のような結果が得られた。

(1)1919年、Sommerfeld が、物理学を学ぶ上でハミルトン・ヤコビ理論が重要であるとしたのは、ふたつの理由があった。

①ハミルトン・ヤコビ方程式が変数分離形になるとき、数学的にさまざま事柄がわかっているが、量子論の考察上重要な系は、変数分離形に対応するものとなっているため。

②1916年のシュタルク効果の説明において、Schwarzschildと Epstein が、ハミルトン・ヤコビ理論から導かれる作用-角変数を効果的に使ったため。

(2)1902年と1907年に出版されたCharlierの『天の力学』には、ハミルトン・ヤコビ方程式が一定の条件のもとで変数分離するとき準周期運動が生じるといった、ハミルトン・ヤコビ理論と準周期運動との関係がていねいに書いてあった。これは、CharlierがStaupeとStäckelの結果を整理して、教科書に取り込んだものであった。物理学者たちは天体力学の教科書でハミルトン・ヤコビ理論を学んだが、当時の教科書で準周期運動のことが指摘されているのは、『天の力学』だけであった。Bohrの1918年論文で量子論における準周期運動の重要性が指摘されると、Charlierの教科書はより重要視されるようになった。量子論関係の多くの著作でCharlierの著書が取り上げられているのは、そのためである。

(3)作用-角変数が天体力学起源であることはよく知られているが、具体的にどのようにして導かれていたかは明らかになっていなかった。Charlierの『天の力学』を検討し、この変数が導かれる過程を明らかにした。

Charlier は、変換する方程式の中間軌道に伴うハミルトン・ヤコビ方程式の解が正準変換の母関数としてとれることを示した。この定理の例を示すため、Charlier は中間軌道として、ケプラーの楕円をとった。すると、まさしく作用と角変数の組からなる正準変数が登場した。Schwarzschild はこれに着目し、一般化して作用-角変数の定義を導入した。なお中間軌道というのは、天体力学者 Gylden が導入した概念であるが、それをハミルトン・ヤコビ理論と結びつけたのは、Charlier の成果である。

(4) ハミルトン・ヤコビ理論がシュタルク効果の説明に有効に使われたといわれるのはふたつの理由があった。

① Schwarzschild や Epstein が、双曲座標という概念を導入し、対応するハミルトン・ヤコビ方程式を変数分離形にでき、難解な方程式を解くことができたためである。

② この過程では振動数の関係で表現される縮退した系を扱うので、振動数が表に出てくる角変数は好都合であった。すなわち、作用-角変数という正準変数が有効に使われたためである。

なお、Schwarzschild は今日見るような数学形式で角変数を記述しているが、作用変数をそのようにしたのは Epstein であった。

(5) ハミルトン・ヤコビ理論は、正準変換という概念が入るか入らないで、ふたつに分けられる。前者が先にできており、20世紀初めに正準変換の概念が取り込まれた。この二つを区別したうえで、日本への移入状況を見ると、次のことが明らかになった。

① 前者については、田丸卓郎のローマ字の教科書『RIKIGAKU』で展開されている。1935-1937年に出版されたが、遅くも1922年には、東京大学でその内容を講義していた。この水準の内容が講義されているならば、量子力学に必要な数学は準備されているといっておく、正準変換を伴うハミルトン・ヤコビ理論も容易に理解できる。量子力学を学ぶとき、東大出身者は京大出身者より数学的な困難が少なかったといわれている。田丸の講義から、そのことが具体的に示される。田丸の講義の受講者は、先端の量子論の論文を読むことにより、正準変換を伴うハミルトン・ヤコビ理論に出会った可能性がある。

② 正準変換が入るハミルトン・ヤコビ理論は、ボルンの『原子力学の諸問題』で取りあげられる。また、ホイテーカーの『解析力学』では、正準変換と同等の意味を持つ接触変換を伴うハミルトン・ヤコビ理論を紹介している。湯川秀樹・朝永振一郎は、量子力学を学ぶ準備として、これらの本を学んでいた。このような形でも、正準を伴うハミルトン・ヤコビ理論が移入された。すなわち、後者を直接学んだ物理学者もいた。

(6) 日本でハミルトン・ヤコビ理論の重要性を訴えたのは、京都大学教授の木村正路であった。彼は、シュタルク効果を研究していた分光学の研究者であるが、ハミルトン・ヤコビ理論を強調するようになったのは、1927年秋に二度目の外遊から帰ってきた後のことである。もともとは実験物理学者であるから、Stark 自身が知らなかったというシュタルク効果の説明がなされた時点で、ハミルトン・ヤコビ理論を重視したとは考えがたい。しかし、量子力学形成期のヨーロッパを見て、態度が変化した。なお、1931年の木村の著書『分光学』には、本報告書(4)-①を生かしたシュタルク効果の説明が書いてある。

(7) ハミルトン・ヤコビ理論と天体力学の関係に注目すると、量子力学にかかわった天文学者である荒木俊馬が注目される。日記類を見る限りでは、彼は、その方面の勉強や講義はしていたようではある。しかし、ハミルトン・ヤコビ理論の重要性を説いたという記録はなく、この理論の普及において、木村以上の影響力は認められなかった。

(8) ハミルトンの幾何光学は、19世紀末からドイツで注目されていた。F. Klein や Sommerfeld はこのような方面からハミルトン・ヤコビ理論の研究を行っていた。幾何光学の方面でも、この理論は進展していた。

(9) ハミルトン光学を波動力学の形成と結びつけたのは、1924年に提出された de Broglie の学位論文においてである。引き続き Schrödinger の業績と合わせた形での波動力学の考え方は、発表後、ほどなく日本に伝えられた。ただし、光学に関するハミルトン・ヤコビ理論と彼らの仕事を関連づけて紹介したのは、1928年2月、杉浦義勝による集中講義『新量子力学と其の応用』であった。量子力学の視点から光学をみなおした Born の業績を体系的に紹介したのも杉浦であった。

(10) 量子力学の日本への移入を考えると、古典的な物理学との断絶性が強調される。しかし、杉浦は、長岡半太郎のもとで研究を始めてから、量子力学の形成期に一貫して原子スペクトルの問題に取り組んでいた。新しい考え方をいきなり受け入れたのではなく、日本国内ではそれなりの準備が進んでいた。仁科芳雄を中心に据えた視点では、このようなことは見て取ることができなかった。

(11) 杉浦のよく知られている仕事は、今日では量子化学の領域に分類されている。一方、彼は物理学でも重要な成果を挙げている。物理学と化学を切りわけて歴史研究を進めてきたことにより、杉浦の業績が見落とされていたことが明らかになった。

(12) 量子力学の日本への移入とその後の発展を見ると、仁科芳雄とその門下生以外の仕事を明確にしていくことの重要性を、ハミ

ルトン・ヤコビ理論の移入の立場から示した。

立教大学・理学部・特任准教授  
研究者番号：30212088

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(2) 研究分担者  
なし

[雑誌論文] (計4件)

- ① 中根美知代：“作用-角変数の形成における C.V.L. Charlier の寄与”，『科学史研究』(査読有)、第51巻 (No.261)、2012年春、pp.10-17.
- ② 中根美知代：“天体力学から量子論へ：作用-角変数の形成”，『第4回天文学史研究会集録』(査読無)、2010、pp.60-66.
- ③ 中根美知代：“C.G.J. Jacobi の“Hamilton-Jacobi 理論”；Jacobi は正準変換を知っていたのだろうか”，『第3回天文学史研究会集録』(査読無)、2009年、pp.27-35.
- ④ 中根美知代：“ハミルトン・ヤコビ理論の形成と19世紀の天体力学”，『第2回天文学史研究会集録』(査読無)、2008年、pp.61-68.

(3) 連携研究者  
植松 英穂 (UEMATSU EISUI)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号：70184968

[学会発表] (計6件)

- ① 森田麻美、雨宮高久、植松英穂：『明治初期の教科書における天文学の変遷、日本物理学会、関西学院大学、2012年3月25日。
- ② NAKANE, Michiyo：“Did Hamilton and Jacobi construct the Hamilton-Jacobi theory as we know it today?” The British Society for History of Mathematics and Canadian Society for History and Philosophy of Mathematics, 5th joint conference, July 18, 2011, Dublin.
- ③ 中根美知代：ハミルトン・ヤコビ理論の受容とシュタルク効果、日本科学史学会、東京大学教養部、2011年5月28日。
- ④ 中根美知代：“作用-角変数の形成過程、”日本数学会、早稲田大学理工学術院、2011年3月20日。
- ⑤ 雨宮高久、田中啓介、植松英穂：“明治・大正・昭和時代の物理学教科書に見る力の単位と計量”、日本計量史学会、2011年2月5日、ホテルグランドヒル市ヶ谷
- ⑥ 中根美知代：“ゾンマーフェルトとハミルトン・ヤコビ理論”、第4回科学史西本大会、龍谷大学深草学舎、2010年12月11日。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中根 美知代 (NAKANE MICHIO)