

## 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25年 5月22日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500837

研究課題名（和文） 科学的方法論を主題とした理系学生の教育プログラム構築

研究課題名（英文） Construction of a methodological program for science students

研究代表者

松王 政浩（MATSUO MASAHIRO）

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：60333499

研究成果の概要（和文）：本研究は、理系学生が、自分の用いる科学的方法について自覚的になるための教育プログラム構築を目的とし、次の3つの成果を得た。まずカンザス州立大学哲学部の協力により、因果マルコフ過程について学ぶ既存ウェブ教材に必要な改良点等を見出した。次に、科学における価値判断について自覚的になるためのポイントを明確にした。最後に、ウイソコンシン大 E.ソーバーの協力の下、基礎的な統計判断に関する日本語教材を出版した。

研究成果の概要（英文）：Our research aims to develop a program for science students to be able to be conscious of scientific methods they use. Through this research we have obtained three concrete results as follows: (1) we have found some important points that should be revised of a well-known e-learning material for causal Markov conditions, with the aid of the philosophy department of Kansas State University. (2) We have made clear some viewpoints necessary for science students to be aware of value judgments, which are inevitably included in a scientific procedure. (3) Finally, with the aid of E. Sober, we have published a textbook for Japanese science students to learn basic ideas and problems of statistics, which seem to be necessary for them to be conscious of their scientific methods.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・科学教育

キーワード：科学教育プログラム・科学と社会・文化

## 1. 研究開始当初の背景

近代の自然哲学者たちは、自然の対象に加え、自らのとる科学的方法そのものの妥当性をつねに問題にしてきた。しかし科学

の専門分化が進み、科学者が各分野のピアレビューに照準を合わせた一定のパターン思考を常態化させていく中で、こうした方法的反省態度は次第に希薄化してきたと考

えられる。この流れを考え直す一つのきっかけを与えたのは、80年代から90年代にかけて盛んになされた、いわゆる「サイエンス・ウォーズ」（科学社会学における社会構成主義者と科学者との科学論争）であるが、この論争は必ずしも科学者一般の基本姿勢の問い直しにまで発展したわけではない。今日、科学者の方法論的態度形成に関わる、より本質的な転機が訪れつつある。環境や健康の問題に直結する予測科学分野を典型として、科学が社会の意思形成に様々な影響をもつようになる中で、科学研究の応用的な社会還元や研究倫理の遵守以外に、同じく「社会的要請」として、科学的方法の妥当性について説明責任を果たすことが科学者に求められてきている。

たとえば、閾値のない発癌性化学物質について実質安全量(VSD)を考える際に、微小領域に線形モデルを適用するか統計モデルを適用するかで評価の厳しさが大きく変わり、モデル選択の社会経済的影響は大きい。米EPAがより評価の厳しい前者を採用したことを受け、その妥当性をめぐって社会を巻き込む激しい論争が繰り返された。あるいは、気候変動科学による温暖化原因の特定と気候感度の評価は世界規模の社会経済的影響をもつが、IPCCが支持する科学的方法への、一部科学者による根強い懐疑はマスコミを通じて拡大し、温暖化対策の政策進行とは別に、IPCC側のより踏み込んだ方法的妥当性の釈明が求められている。こうした社会的要請の範囲は、科学の複合化が進む中で様々な科学分野に及んできており、この要請に応えようとする科学者の側の積極的な動きも出始めている。

しかし問題は、科学者が科学的方法そのものを対象として、その妥当性を基本的な問題群と絡めて、より普遍的な見地から議論する訓練を必ずしも受けておらず、上記の要請に応える上で、かなりの部分で科学者個人のセンスに拠らねばならないことである。本研究代表者はそうした状況に鑑みて、これまで科学的方法論についての専門的な議論が積み重ねられてきた科学哲学の成果を、上記の科学者の実践ならびに今後の科学教育の場に取り入れることが有効であると考え、本研究を着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、上記の背景を踏まえた新たな科学教育を実践するための方法を構築することであるが、この実現に向けて、具体的に次の二つの点を明らかにすることを目的とする。

(1) 科学的方法の妥当性の検討を科学教育として行う上で有効と考えられる、科学哲

学上の基本的な問題群を精査・分類し、科学において各群に連なる具体的な系がどのようなものかを明らかにする。問題群は、伝統的には科学モデル構築の文脈と、モデル評価の文脈に分けることができるが、それぞれにおいて個別科学の実践に直接結びつきうる問題を選び出す必要がある。たとえば前者に関し、科学理論の意味論解釈でしばしば議論されるような、集合論による理論モデルの基礎付けに関する問題は科学の実践とは関わりが薄い。科学的対象や条件の違いによるモデル選択に関する問題（シミュレーションにおける仮想的操作問題や統計手法選択の問題を含む）や因果推論の誤謬問題（特に潜在的因果 latent cause 問題）は、多くの科学実践に関わると考えられる問題である。またモデル評価の文脈で、単なる論理的レベルでの未決定性 underdetermination 問題は実践問題と結びつき難いが、モデル選択基準として使用が拡大する AIC（赤池情報量規準）の方法的境界をめぐる問題や、Duhem-Quine テーゼに対する実験装置の優位性をめぐると問題は、きわめて実践的な意味をもつと考えられる。このような科学実践と関連の深い基本問題を、すでに米国等で行われている科学方法論教育の内容を参考にしつつ、現在の科学哲学の議論から精査・抽出する。そして、研究および教育啓蒙の最前線で活躍する科学者の協力を得て、それら抽出した内容を教育に応用する上で、どのような哲学的問題処理と加工が必要となるかを明らかにする。

(2) 上記の教育素材の選定・加工に加えて、具体的にこれらを理系学生の教育に持ち込んだ場合に、本研究が着目する「方法論的反省の態度」がいかに学生たちに養われるかを評価し、その教育的効果を明らかにすることが第二の研究目的である。これには、

① 加工された素材の教授方法としてどのような方法が適切であるか

② 評価そのものをどのように行うか

という2つの問題が含まれる。

方法論的反省の態度は、見方や評価基準に関するものなので、一つずつゼロから積み上げていく知識ではなく、ある程度、科学あるいは科学の方法に関する基礎的知識を前提とした上で、それら知識を対象とするメタ知識である。理系学生と一口に言っても、そうした前提となる知識には当然ばらつきがあると予想される（特に確率や統計の知識）。したがって、具体的な教授法において、このばらつきをいかに処理して、方法論的問題の本質が学生につかめるようにするかが一つの焦点となる。

さらに、知識として理解できることと、実

践に活かせることとの間には隔たりがある。本研究は、この方法論的反省が単に教養として身につくことを目指すのではなく、実際の研究の中で使えようになることを目指すものである。まだ科学の本格的な研究に着手していない段階で、そうした実践能力を測ることは非常に難しいと考えられるが、何らかのモデル的な課題を遂行する能力であれば、評価できる可能性がある。そこで、このような評価をする上で、どのような課題が適当かを見定めることが、(2)におけるもう一つの焦点となる。

### 3. 研究の方法

研究は、以下の項目に従い行う。

(1) 科学哲学がとりわけ科学的方法について個別科学に目を向けつつ議論を展開し始める一つの流れは、H. Reichenbach および R. Grunbaum ら論理経験主義の流れを受けたいわゆる Pittsburgh 学派による確率的因果論（メタフィジカルな因果論だけでなく、Bayes 確率論や統計的連関等を踏まえた因果論）に端を発する。もう一つの流れは、P. Suppes による科学理論の意味論解釈の流れを受けたモデル論（特に B. v. Fraassen の *Scientific Image* (1980) をきっかけとする多様なモデル論論争と、unobservable entity 問題を中心とした「実験」への新たな着眼）を起点とするものである。こうした議論を軸として、まずは北大大学院理学院科学基礎論研究室の大学院生とともに、科学哲学の主要雑誌 (*Philosophy of Science* や *British Journal for the Philosophy of Science* 等) および関連の書籍をもとに、特にこの20年の問題連関についてのサーベイを念入りに行い、基本的なトピックを選定する。

(2) 本研究と同じく哲学系の学生以外の科学哲学教育（科学基礎論教育）に関心のあるアメリカ科学哲学界の知人の協力を得つつ、また日本での連携研究者である2人の科学者の意見を採り入れつつ、(1)で選定されたトピックについて、教育的応用のために必要な条件（哲学的問題の加工処理等）を明確にしながら、方法論的反省を促すための具体的な教育素材を開発する。

(3) (2)の教育素材を具体的な授業の中で適用し、適切な教授方法と評価方法について検討する。対象とする授業は、本研究代表者が北海道大学で担当している理系学生向けの授業を中心としつつ、一方でアメリカの研究者と共同でモデル授業構築を進めながら、渡米して現地大学で実験的に授業を実施し、その事後評価を行う。

### 4. 研究成果

まず本研究の第一段階である、科学哲学研究から必要なトピックを選定する作業の結

果、大きく次の3つのトピックが教育応用上、適切であるとの判断に至った。1つは、J. Peal に始まり、カーネギーメロン大の R. Scheines ら3人の科学哲学者によって詳細な検討がなされた因果マルコフ過程（あるいはベイズネット）を中心とする統計的因果推論に関する議論である。因果性の判断基準が科学の方法論的反省において重要であることは明らかだが、80年代までの科学哲学が因果性の根本的定義を主眼としていたのに対して、統計的因果推論では実践的な因果性判断の適不適を厳密に行うことを目指す。教育応用上は後者のトピックがより相応しいと考えられる。2つめのトピックは、科学における価値判断に関する科学哲学上の議論である。これは1950年代から半世紀に及ぶ長い議論の歴史をもつが、特に近年、リスク判断に関して価値判断と科学的判断の関係をどう捉えるかの議論が活発化している。科学者の対社会的責任という点で重要なトピックであり、これを取り上げることとした。最後の3番目は、1番目とも関係するが、科学的方法の一つの柱となる確率・統計の判断に関する哲学的議論である。そもそもの確率・統計の考え方によって手法適用の結果は大きく変わる可能性がある。しかし科学者はこうした違いに必ずしも自覚的ではない。学生に方法論的反省の目を養う上で、これに関連した哲学的議論は非常に重要だと考えられるので、このトピックをもう一つのトピックとして取り上げた。

これら3つのトピックに沿って、本研究により得られた成果は次のとおりである。

(1) まず因果マルコフ過程に関しては、カーネギーメロン大の3人の哲学者の頭文字をとった SGS 方法論と呼ばれるものに注目し、これに関して過去20年間になされた哲学的論争を整理するとともに、SGS 方法論を教育実践に組み入れているカンザス州立大学哲学部の B. Glymour と連絡を取り合い、共同でモデル授業の構築を行った。モデル授業は、北大科学基礎論研究室の学生を標準的な日本の理系学生と見立てて、彼らを対象とした特別講義をカンザス州立大学で行った。

すでに SGS 方法論はカーネギーメロン大でウェブ教材として開発され公開されているが、モデル授業はこれを叩き台にしつつ、背景的な因果性一般に関わる講義（事前学習を含む）と、理解度を試すための課題とをセットにして構築した。実際に授業を行い、事前の哲学的分析と併せて、次のことを明らかにした。

① 哲学的議論において論じられる SGS 方法論の種々の適用限界は、必ずしも SGS が他の方法に置き換えられるべきことを示唆せず、この方法論は科学的な因果推論として一定の普遍性をもつ。また補助的教

材により、学生はこのことを十分理解することができる。

② 因果マルコフ条件は、たとえば物理学専攻の学生などが直接研究に用いることのできる手法ではないにしても、「隠れた共通原因」をつねに意識しつつ実験計画を立てるなどの発想の訓練になるものであり、総じて分野を問わず思考を鍛える効果が期待できる。

③ 既存のウェブ教材では、公衆衛生学や社会科学の事例が多く用いられており、これらは学生の専攻分野に関わらず与しやすいものであるが、実践的な力をつける上ではより各学生の専門に近いところでの事例を挙げる必要性が強く感じられた。SGSの実例データベースづくりが教育応用上も、また哲学的議論をさらに深める上でも必要であることが示唆された。

以上の成果は国内学会で口頭発表し、研究代表者の研究室ウェブページにおいても公開している。

(2) 次いで、2番目のトピックである科学における価値判断については、まず1950年代にR. RudnerとR. Jeffreyの間でなされた有名なvalue free論争(科学は価値判断から独立かどうかの論争)から現在のH. Douglasらの「科学における価値役割論」に至る50年の論争をおよそ整理し、特に現在注目を集めているD. Douglasの議論について哲学的検討を加え、その教育的応用を試みた。Douglas以前の議論は、科学における価値を「認識論的価値」と「社会的価値」に分け、科学が前者にのみ関わるのか両方に関わるのかをめぐって争われてきたが、Douglasは新たに価値の「役割」という視点を持ち込み、こうした議論がより科学者の規範を考える上で有益であることを主張する。そして価値の直接的役割、間接的役割が科学の一連のプロセスのどこで適切に果たされるかを整理している。

本研究では、まずDouglasの方法を哲学的議論として批判的に検討し、その問題として、Douglasの方法では科学の体系だった手続きの必要性が強調されるあまり、不確実性判断において必要と思われる科学者の価値判断について十分に扱えないことなどを指摘した(国際学会において口頭発表)。

このトピックに関連する教育的応用の試みとしては、研究代表者が北海道大学で担当する科学リスクの授業において、リスク判断に関する具体的な事例の考察に織り交ぜる形で採り入れた。哲学的には「価値役割論」はまだ詳細を詰める必要があると考えられるものの、論点の整理には非常に有効である。授業では、Douglasも詳細に論じているダイオキシン類のリスクアセスメントを取り上げ、化学物質のリスクアセスメントの一般的

方法論とともに、Douglas的な価値介入の考え方を、問題をオープンにしながら解説した。その教育的効果については、学生たちに行われたグループディスカッションの成果発表、ならびに個々に提出させたレポートにおいて評価した。その結果、まず例外なく学生は、こうした視点がふだんの専門授業の中では得られない点に触れており、なおかつこれほどのくらい普遍性のある議論かを積極的に論じようとしていた。実践力の育成までにはまだ道りがあるが、非常に学生たちの印象に残る問題提起になることは確認できたと思う。

なお、この科学における価値の問題は、さらに独立したテーマとして考察を深めていく必要を感じ、現在、新たな科研費研究課題として、これに取り組んでいる。

(3) 最後に、確率・統計の基礎に関わる哲学的議論とその応用については、ウィスコンシン大のE. Soberの協力の下に研究を進めた。具体的には、生物学の哲学の権威であると同時に統計の哲学についても先駆的な業績が数多くあるSoberの著作(Evidence and Evolution, 2008)における統計哲学に関する議論を叩き台に、Soberと一年に及ぶ哲学的議論を重ね、最終的にこの本を研究代表者による膨大な訳註と併せて、テキストとして出版するという形で研究を進めた。

Soberは明確に尤度主義の立場に立っており、その立場から他のベイズ主義や頻度主義を批判する形で議論を行っている。Soberとの哲学的議論においては、①Soberが尤度主義とベイズ主義の比較のために用いている単純な「グレンリン仮説」(二階で物音がしたときに、それがグレンリンの仕業である、との仮説)についての確率判断をめぐり、具体的に尤度主義的な判断がどこまで進むのか、②実験をどの段階でやめるのが適切かをめぐる統計的な論争(Stopping rule論争)について、ベイズ主義と頻度主義の最も基本的な争点はどこにあるのか、③モデル選択理論としてのAICの制約が、ソーバーの挙げる宝くじの例でどこまで厳密に適用されるのか、などについて詳細に明らかにした。そしてこの議論の結果、Sober自身が原著の一章分を翻訳書のためにまるまる書き換えることにもなった。

この翻訳(邦題『科学と証拠—統計の哲学入門』名古屋大学出版会)は、理系学生が統計的手法について十分方法論的反省ができるようにと、上記の哲学的議論の結果に加えて、確率・統計の基礎知識に関わる膨大な註をつけて出版したものだが、これまで日本語で書かれた確率・統計の哲学書がほとんどなかったことから、この本は先駆的なものだと各方面から評価の声をもらっている。特に統計学者からの反応が大きく、この本が一つの

きっかけとなって、代表的な統計学者との、統計学の基礎に関する研究会が立ち上がった。

なお、このテキストは研究代表者が北大で担当する科学哲学系の授業で実際に使用し始めており、今後その教育的効果についての評価を行う予定である。

## 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)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 松王政浩、温暖化科学論争への応用哲学的視点、応用倫理、第5号、2011、pp. 1-24、査読有

[学会発表] (計3件)

- ① Matsuo, Masahiro. Where the Opposition to Value Free Science Should Be Revised, 14<sup>th</sup> Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science (CLMPS), July 21, 2011. Nancy University, Nancy, France.
- ② 松王政浩、科学基礎論教育としての科学教育、科学基礎論学会講演会、2011. 6. 5、愛媛大学
- ③ Matsuo, Masahiro. 'A Possible Reformation of Science Communication with the Aid of Philosophy of Science', Society for Social Studies of Science, August 27, 2010. The University of Tokyo.

[図書] (計2件)

- ① 松王政浩 (訳)、名古屋大学出版会、『科学と証拠 -統計の哲学 入門』(エリオット・ソーバー著)、2012、244
- ② 松王政浩 (共著、黒田光太郎 他編)、名古屋大学出版会、誇り高い技術者になろう 工学倫理ノススメ (第2版)、2012、269 (執筆箇所: 141-160)

[その他]

ホームページ等

<http://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/kisaron/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松王 政浩 (MATSUO MASAHIRO)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 60333499

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

鈴木 久男 (SUZUKI HISAO)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 20192619

江守 正多 (EMORI SEITA)  
国立環境研究所・地球環境センター・室長  
研究者番号: 80300846

### (4) 研究協力者

BRUCE GLYMOUR  
Kansas State University, Professor  
ELLIOTT SOBER  
University of Wisconsin, Professor