

東京大学公開講座

論理

講義要項

論理学とは何か？ 納富 信留

数学を論理で読む 新井 敏康

計算と論理 小林 直樹

AIの論理と倫理 廣野 喜幸

法学の論理、憲法学の論理 小島 慎司

子どもの論理的思考を豊かに育む教育 藤村 宣之

政策とビジネスのための因果推論 渡辺 安虎

物理法則と論理が生み出す情報セキュリティ 小芦 雅斗

動的システムの推論と学習 矢入 健久

2020年秋季

131

11/7 ▶▶▶ 11/28



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

はじめに

第131回 2020年秋季 東京大学公開講座企画委員	3
開講にあたって 時弘 哲治（企画委員長／数理科学研究科長）	4

第1日 11月7日（土）学問としての論理

12:50～13:00 開講の挨拶 時弘 哲治（企画委員長／数理科学研究科長）	
13:00～13:40 論理学とは何か？	6
納富 信留（人文社会系研究科・教授）	
13:55～14:35 数学を論理で読む	10
新井 敏康（数理科学研究科・教授）	
14:50～15:30 計算と論理	14
小林 直樹（情報理工学系研究科・教授）	
15:45～16:35 総括討議	
司会 河澄 響矢（数理科学研究科・教授）	
納富 信留／新井 敏康／小林 直樹	

第2日 11月22日（日）社会の中の論理

13:00～13:40 AIの論理と倫理	18
廣野 喜幸（情報学環・教授）	
13:55～14:35 法学の論理、憲法学の論理	22
小島 慎司（法学政治学研究科・教授）	
14:50～15:30 子どもの論理的思考を豊かに育む教育	26
藤村 宣之（教育学研究科・教授）	
15:45～16:35 総括討議	
司会 沖野 眞巳（法学政治学研究科・教授）	
廣野 喜幸／小島 慎司／藤村 宣之	

第3日 11月28日(土) 論理のフロンティア

- 13:00～13:40 政策とビジネスのための因果推論 30
 渡辺 安虎 (経済学研究科・教授)
- 13:55～14:35 物理法則と論理が生み出す情報セキュリティ ... 34
 小芦 雅斗 (工学系研究科・教授)
- 14:50～15:30 動的システムの推論と学習 38
 矢入 健久 (工学系研究科・教授)
- 15:45～16:35 総括討議
 司会 藤井 康正 (工学系研究科・教授)
 渡辺 安虎 / 小芦 雅斗 / 矢入 健久
- 16:35～16:45 閉講の挨拶 藤井 輝夫 (理事・副学長)

第131回 2020年秋季 東京大学公開講座企画委員

委員長	時弘 哲治	数理科学研究科長
委員	沖野 眞巳	法学政治学研究科・教授
委員	藤井 康正	工学系研究科・教授
委員	鈴木 淳	人文社会系研究科・教授
委員	大越 慎一	理学系研究科・教授
委員	福田 慎一	経済学研究科・教授
委員	鶴見 太郎	総合文化研究科・准教授
委員	藤村 宣之	教育学研究科・教授
委員	河澄 響矢	数理科学研究科・教授
委員	暦本 純一	情報学環・教授
委員	小林 直樹	情報理工学系研究科・教授
委員	宇野 重規	社会科学研究所・教授
委員	年吉 洋	生産技術研究所・教授
委員	中村 尚	先端科学技術研究センター・教授

開 講 に あ た っ て

第131回 2020年秋季 東京大学公開講座企画委員会

委員長 時 弘 哲 治
(東京大学大学院数理科学研究科長)



私たちは日常生活の中で「論理」あるいは「論理的」という言葉をしばしば見聞きしたり使ったりしています。肯定的な意味合いに用いられることが多く、問題の設定から結論まで誰もがその過程を納得できる順序立った考え方や説明を論理的思考や論理的な説明と言います。数学教育の目的の一つに論理的思考力の育成が掲げられ、2022年度から適用される学習指導要領において、国語で実用的な文章を学ぶ「論理国語」が選択科目として導入されたのも、正しく推論し共通の理解が得られるように説明するための論理の重要性が認識されているからだと思います。一方で、勝者の論理という言葉もあるように、論理を展開する前提となる原理や原則によって結論が異なることもありますし、展開の仕方も一意的に定まっているものではありません。

学問としての論理学は伝統的には哲学の一分野ですが、近世になって数理論理学という分野が生まれ、ゲーデルの不完全性定理などで有名な数学の基礎を支える集合論や証明論の発展に貢献してきました。また、数理論理学における重要な理論の一つであるチューリング機械の理論はコンピュータ科学の基礎であり、スマートフォンなどに組み込まれたコンピュータは、論理回路を用いた論理演算を用いて大規模なデータ解析や情報伝達を行い私たちの社会生活を支えています。最近では、従来の0か1の入力に対して0または1を出力する論理回路ではなく、量子状態に量子状態を対応させる量子論

理回路による量子コンピュータの研究が進んでいます。自動運転やスマートシティを実現させ、私たちの生活を大きく変えると考えられている人工知能（AI）は、必ずしも人間と同じ論理で動いていないようです。また、裁判や子供たちの教育といった社会活動においては、機械的に論理を展開することは困難でしょう。今回の公開講座では、こうした題材をもとに、様々な視点から論理のあり方や論理の役割について皆さんと一緒に考えて行きたいと思っています。

論理学とは何か？

人文社会系研究科・教授 納 富 信 留

論理学（ロジック）というと、数学や自然科学と同様、普遍的な合理性を保証してくれる学問だと考えられています。真理を探究する体系であり、プログラミングなどに必要な道具でもあります。しかし、論理学という学問の成り立ちを歴史的に振り返る時、その特殊性が浮かび上がります。現代の論理学は、紀元前4世紀のギリシアで哲学者アリストテレスが作り上げた推論の体系が、その後西洋哲学の歴史をつうじて整備され、異なる形の論理学が次々と加わることで成立したものです。論理学は古典ギリシア語から作られ、印欧語の世界で発展してきたのです。哲学の歴史においてインドでも中国でも論理学にあたる学問や考察はありましたが、今日私たちが学ぶ論理学がなぜ西洋のものだけなのか、それは完全に中立的で文化や歴史とは独立のものなのかには疑問があります。つまり、論理学とは特殊ギリシア的な学問であり、西洋文明において作り上げられた歴史的産物なのです。ところが、論理学について私たちはわざわざ「西洋論理学」と呼ぶことはありません。それは、論理学が普遍的で文化や歴史から独立な合理性をもつと信じられているからです。この問題を改めて考えてみたいと思います。

論理学とは何かを考えるうえで重要になるのは、私たちが日常に語る言語と論理学の言語（数式と言うべきかもしれませんが）との関係です。しばしば指摘されるように、私たちの日常言語に含まれる論理は、通常大学で教える形式論理学（命題論理と述語論理）からかけ離れた点がいくつかあります。つまり、日常言語を基盤にそこにある論理的思考を形式化して生まれた論理学は、日常言語とは異なる独立した体系を作っているのです。古代ギリシア

で形式化を成し遂げたアリストテレスの仕事を再検討することで、論理学とはどのようなものかを反省します。私たちが言葉を用いて行う思考や議論のうち、内容を伴う具体的で実践的な部分を弁証論（ディアレクティック）や弁論術（レトリック）として切り離すことで、内容を一切考慮しなくても成り立つ純粋な形式、つまり最大公約数的で無内容な部分をとりだして整備したのが論理学です。論理学はしたがって真理を積極的に提示することはありません。むしろ、誤った思考や合理的とは言えない判断を示すことで、絶対に間違いはない領域を確保する控えめな態度の学問だったのです。

その上で、論理学が果たしてギリシアや西洋という文化歴史の限定から完全に独立かどうかを考えます。イスラーム世界に導入された「論理学」をめぐる、アッバース朝ではそれが特殊ギリシア的な学問ではないかという批判が起こり、論理学者と文法学者が論争しました。近代の中国でも、西洋の論理学にあたる学問が古代中国にもあったのかという論争が展開されました。この問題では、西洋外からの視点に加えて、西洋哲学の中で多様な論理学の可能性が展開されてきた経緯も重要となります。たとえば、論理学の基礎として外すことができないと考えられてきた矛盾律と排中律を緩めることで成立する別の論理学（直観主義など）、真と偽という二値で遂行する論理学とは異なる多値論理の可能性なども提案されてきました。また、可能や必然を含む様相論理学も重要な考察対象となっています。そこでは、アリストテレスが当初は切り分けようとした、内容を伴う論理的思考が再度取り入れられる可能性もあり、弁証論など非形式論理学の意義や形式論理学との関係も検討課題となってきます。

本講義ではそのように、哲学の一部門としての論理学を歴史的に振り返ってその豊かさを検討したいと思います。

講師のプロフィール



のう とみ のぶ る

納富信留

人文社会系研究科・教授

専門分野 哲学

最近の主な著書

『世界哲学史』全8巻、共編、ちくま新書、2020年.

『プラトンとの哲学 一対話篇をよむ一』、岩波新書、2015年.

西洋古代哲学・西洋古典学が専門で、プラトンやソフィストを中心としたギリシア哲学を研究しています。最近
は「世界哲学」のプロジェクトも進めています。

Memo

Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines within a rounded rectangular frame.

数学を論理で読む

数理科学研究科・教授 新井敏康

数学は論理的に組み立てられた学問ですが、その組み立てはどのような
されているのでしょうか？ ここでは数学での最も基本的な対象である自然
数を例にとって、組み立てられていくさまを垣間見てみようと思います。

数学に論理は欠かせませんし、数学は論理的な学問であると考えられてい
ます。数学が論理的であることは、数学の厳密さ・正確さ・絶対的な正しさ
の源とみなされています。論理的であることは数学に課せられた要請（のひ
とつ）と言ってよいでしょう。

フレーゲらによって革新された論理学とカントールによって創られた集合
論を用いて、数学の命題を分析すると、命題はいくつかの論理的な言葉（集
合も含めて）と数学特有の言葉によって組み立てられていることが分かりま
す。さらに数学の証明も、その論理的な言葉に関するいくつかの（論理的
な）公理と推論から組み立てられていることが分かりました。こうして取り
出された論理・集合の言葉とそれらを統御する公理・推論規則は一切の曖昧
さのないもので、しかも極めて強力なものです。数学の命題・証明はすべて
これらの文法に則った文章であると考えられます。

数学で論理が強く意識されてきたきっかけの一つは微分積分学（無限小解
析）の基礎にまつわる曖昧さであったと思います。微分積分学では、極限や
連続性、関数の微分といった、ある量の無限に小さい変動が問題になります
から、無限小の概念を用いて微分積分学は説明されていました。そこでこの
怪しげな概念である無限小を微分積分学から追放して、微分積分学を論理的
に組み立てる努力が19世紀を通じてなされました。その結果、微分積分学の

基礎（舞台）である実数を論理的に捕まえることができるようになりました。これはボルツァーノ、コーシー、ワイヤストラス、デデキントらによるものです。

こうして実数の性質はすべていくつかの明確に述べられた公理から論理的に導き出されます。

またこれらの公理を満たす数学的対象は本質的には実数以外にはなく、その意味でこれらの公理は実数を特徴付けていることが分かります。

ここで現代的な数学の考え方が明瞭に現れています。すなわち数学では何かを定義しようとするとき、その性質を公理によって規定します。その際に望ましいことは、その公理が当該の数学的対象をひとつに定めていることです。これを「同型を除いて一意に定まる」という言い方をします。ここで重要なのは、その対象がなんであるかについては数学としては関知しないということです。ただそれらの対象が公理で規定された諸関係にあることのみが、仮定されているのです。

実数の公理による特徴付けに論理的に先立って、より基礎的な対象である自然数を公理によって特徴付ける必要があります。これはペアノによってつぎのようになされました。

自然数の集合は、ある一つのゼロと呼ばれる要素を持ち、さらに各自然数の後続者と呼ばれる別の自然数を持っていて、後続者はゼロではなく、また異なる自然数の後続者は異なります。しかも数学的帰納法と呼ばれる公理が自然数では成り立ちます。そしてこれらの公理を満たす数学的対象は本質的に一つしかないことが分かります。

さてそれでは例えば自然数上の加法（足し算）はどのように定義されるのでしょうか？ 小学校以来あまりにも明らかに思えるこの問いをあくまでも論理的に答えようとすることは自明ではありません。

本講義では数学を論理的に組み立てる実例としてこの問題を取り上げてみようと思います。

講師のプロフィール



あら い とし やす

新井敏康

数理科学研究科・教授

専門分野 数学基礎論

最近の研究テーマ

証明論

最近の主な著書

『数学基礎論』（岩波書店、2011年）

『集合・論理と位相』（東京図書、2016年）

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

ランダウ『数の体系-解析の基礎』（丸善、2014）

前原昭二『記号論理入門』（日本評論社、2005）

飯田 隆『言語哲学大全 I』（勁草書房、1987）

HP <https://researchmap.jp/tosarai>

「論理」は目に見えず、具体物が無いのですが、なぜか十代から好きでした。その「論理」とつながる「数学基礎論」またの名を「数理論理学」に魅せられてその中の一分野である「証明論」をずっと勉強しています。

Memo

Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines.

計算と論理

情報理工学系研究科・教授 小 林 直 樹

論理学と、コンピュータを対象とする学問である計算機科学との間には深い関係があります。実際、理論計算機科学分野の主要国際会議シリーズの一つに「Logic in Computer Science (計算機科学における論理)」というものがあり、奇しくも今年の会議LICS 2020のプログラム委員長を本講演者が務めています。本講演では、そのような論理とコンピュータにおける計算との間の関係の一端を紹介します。

まず、ハードウェアレベルの計算に目を向けてみましょう。コンピュータの中では「ビット」と呼ばれる0と1の2種類の値からなる2進数で数値を表現しています。ここで、1が論理値の「真」(正しい)、0が「偽」(間違っている)を表すと考え、数値に関する四則演算はすべて、AND (「かつ」)、OR (「または」)、NOT (否定) という論理演算の組み合わせとして表現できることがわかります。数値だけでなく、日本語の文章などの文字列、画像、音声などに関する処理も同様に、すべて論理値に関する演算の組み合わせとして表現できます。これに基づけば、無駄な計算を省いて計算を効率化することは、論理式を簡単化することによって実現できます。

上では、論理における真偽値に着目して、それと計算との関係を見ましたが、真偽値だけでなく、それを導く証明・推論に着目すると、より豊かな対応関係が見つかります。「私は人間である。人間は動物である。よって私は動物である。」のように、「AならばB」かつ「BならばC」から「Aならば

C」を導く推論を三段論法というのはご存知だと思います。言い方を変えようと、「AならばC」を証明するためには、あるBについて「AならばB」と「BならばC」を証明すれば十分だということです。3段論法は、AからCを直接導くのが難しいけれども、AからBを導き、BからCを導くのが容易な場合に使う常套手段です。これと同じようなことを、実は「計算」でもよく行います。例えば、「値 x から $2x+3$ を計算する」という計算手続き（プログラム）を考えてみましょう。すると、これは「 x から $2x$ を計算する」という手続きと「 $2x$ に3を足して $2x+3$ を得る」という手続きに分割できます。これは、先の「AならばC」の証明を「AならばB」の証明と「BならばC」の証明に分割するのに似ていることがわかるでしょう。この例に見られるように、実は、計算手続きを記述する「プログラム」と直観主義論理と呼ばれる論理体系における「証明」との間には、密接な対応関係があるのです。（ここでは論理式を持ち出すのを避けるために厳密な対応関係には触れませんが、興味のある方はプロフィール欄に挙げる参考文献をご覧ください。）優秀なプログラマは、実は優れた数学者になれる素質があり、その逆もまた言えるのかもしれないですね。

講演の中で時間が許せば紹介したいのが、日常生活ではあまり使わないけれども、計算機科学の研究の中で生まれた、あるいは発展してきた論理体系の存在です。そのような論理体系に、時相論理やプログラム論理、不動点論理と呼ばれるものなどがあります。本講演者の最近の研究では、プログラムが期待通りに正しく動作することを検証する問題を、不動点論理における論理式の証明問題に帰着し、後者の問題をコンピュータで自動で解くことによってプログラムの自動検証を実現する、というテーマに取り組んでいます。

講師のプロフィール



こばやしな お き

小林直樹

情報理工学系研究科・教授

専門分野 理論計算機科学

最近の研究テーマ

ソフトウェアの自動検証

最近の主な著書

「プログラム意味論の基礎」(共著、サイエンス社、2020年)

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

萩谷昌己、西崎真也『論理と計算のしくみ』(岩波書店、2007年)

照井一成『コンピュータは数学者になれるのか? -数学基礎論から証明とプログラムの理論へ-』(青土社、2015年)

HP <https://www.kb.is.s.u-tokyo.ac.jp/~koba/>

論理と計算の繋がりの奥深さに魅せられて、理論計算機科学の分野に入り、現在はソフトウェアの自動検証に関する研究を行っています。今回の講座では、論理と計算の関係の面白さの一端をお伝えできればと考えています。

Memo

Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines.

AIの論理と倫理

情報学環・教授 廣 野 喜 幸

人工知能の研究は、情報科学の主要テーマの一つであり続けてきました。近代的な情報科学の礎は、ウィーナーやフォン・ノイマン・チューリング・シャノンといった人たちによって、1936―48年頃に築られました。このとき、人工知能の研究も開始されます。たとえば、シャノンによる「チェスのためのコンピュータ・プログラミング」(1949年)は、チェスや将棋などで人間がコンピュータに負かされる事態の出発点を用意しました。

人工知能研究の目標は、人間の知能に匹敵する人工物を作成することです。人工知能の研究史は80～90年にも及びますが、長い間、人間の知能に遙か及ばない事態が続きました。シャノンらの研究によって、迷路探索やパズルを解いたり、チェスを指したりできるプログラムが開発され、1950年代後半～1960年頃、人工知能研究の最初のブームが起こります。しかし、解けるのは、ルールと目標が明確になっている場合のみにとどまり、チェスも人間より弱い状態が続き、ブームは終焉を迎えます。次にブームが起こったのは、1980年代～1990年代初め頃でした。知識を教え込むことによって、病名を特定できるようなエキスパート・システムが実用化されたからです。しかし、実は私たちの知識には、必ずしも明示されないような暗黙の前提があり、また、常識に多分に支えられており、そうした常識を過不足なく明記し、コンピュータに教え込むことは難問であることが分かり、エキスパート・システム路線も頭打ちになりました。

2000年代中頃から、第3次ブームで盛り上がりますが、今度はそれまでと違い、ブームが続いています。と申しますのも、将棋のプロ棋士を打つ負かす

など、いくつかの局面で、人間の知能を上回るような成果をあげ続けているからです。その原動力は、機械学習、そして、デープ・ラーニングというアプローチ方法にあります。特に言及すべきは、それが「教師なし学習」を可能にした点に求められるでしょう。

それまでは、チェスにせよ将棋にせよ、ある局面の評価を人間が与えて、よりよい評価になるように指し手を進めていくという、「教師あり学習」のみがなされてきました。デープ・ラーニングが最初に大きな成果をあげたのは画像認識ですので、画像認識を例に話を進めていきましょう。たとえば、自宅の近所にヒトの死亡まで引き起こすヒアリらしきアリが見つかったとしましょう。それが果たしてヒアリなのか、そこまでの害はない近縁のアカカミアリなのか？ 少数の専門家にしか見分けられないこの区別を、AIがやってくればたいそう助かります。「教師あり学習」の場合、たとえば、ヒアリとアカカミアリの違いというルールと、ヒアリの画像にはヒアリという評価を、アカカミアリの画像にはアカカミアリという評価を与えておきます。そうした上で、疑わしきアリの画像を与えると、AIが精度よく判別してくれる次第です。

一方、「教師なし学習」では、ヒアリとアカカミアリの画像を大量に用意して、ただ与えればよいのです。デープ・ラーニングによって、判別基準をAI自身が生成し、それに基づいて判別してくれるのです。「教師あり学習」は、評価基準は畢竟のところ、人に由来します。しかし、「教師なし学習」では、AIが自律的に判別ルールと作り上げるのです。「教師あり学習」の論理は、“判別基準とデータ（例）を与えよ”でしたが、「教師なし学習」では、“データ（例）を与えよ、そうすればルールを生成してみせましょう”が、その論理となるのです。AIの論理で重要なのは、もちろん、後者になります。

しかし、問題は、AIが生成してみせたルールが、人間には了解不能な場合が見られることにあります。AIはルールを生成してくれますが、説明責任をとってくれません。これは、AIの「黒魔術」などと言われます。人間の行動

を大量にAIに与えると、その善悪を判別するルールを生成してくれるかもしれませんが。しかし、そのルールの意味を人間が分からないままに、それに従う、などという事態に対し、私たちはどういう態度をとればいいのでしょうか。私の講義が、こうした問題を皆さんが考えるきっかけになってくれればいいな、と考えています。

講師のプロフィール



ひろの よし ゆき

廣野喜幸

情報学環・教授

AIが発展して、初期ガンの判別など、人間よりもすぐれた判断をしてくれるようになりました。さらに発展すれば、人間よりもすぐれた道徳的判断をAIが下してくれるようになるのでしょうか？ そうなると、私たちのような倫理学者は失職してしまうのでしょうか？

専門分野 科学史・科学論、科学コミュニケーション、実践倫理学、進化生態学

最近の研究テーマ

ソフトウェアの歴史、人体売買の倫理、ネイチャー・ウォッチング

最近の主な著書

『サイエンティフィック・リテラシー—科学技術リスクを考える』（丸善出版、2013）

『生命倫理学の源流—戦後日本社会とバイオエシックス』（共著、岩波書店、2014）

『安全基準はどのようにできたか』（共著、東京大学出版会、2017）

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

西垣 通『AI原論—神の支配と人間の自由』（講談社、2018）

江間有沙『AI社会の歩き方—人工知能とどう付き合うか』（化学同人、2019）

西垣 通・河島茂生『AI倫理』（中央公論社、2019）

ウォラック&アレン『ロボットに倫理を教える—モラル・マシーン』（名古屋大学出版会、2019）

HP http://hps.c.u-tokyo.ac.jp/staff/_data/hirono_yoshiyuki/index.php

法学の論理、憲法学の論理

法学政治学研究科・教授 小 島 慎 司

最高裁判所の判決文のなかで、憲法学においてよく知られたものの1つに、1972年11月22日に下された、いわゆる小売市場事件についてのものがあります。当日は、配布資料に私が概要を整理したものを載せる予定ですので、何も持参する必要はないですが、ご関心の方はいつでも最高裁のウェブサイトから簡単に入手可能です。私が予定している作業は、この判決の論証を憲法学の論証の具体例と考えて、その特徴を探ってみることです。

この公開講座では、「論理」を共通テーマとしています。まだ始まってもないのですが、数学的な論理学の論証への関心を中核において、それと比較しながら、人文社会科学も含む、他分野の論証のありようを位置づける方向で進んでいくのだらうと予想しています。講座全体に流れる背景的な関心として、発達しつつある人口知能が、社会生活における人間の論証にどのような影響を与えるのか——代替しうるのか、支えられるのか等——を考えたということもあるだらうと思われます。そのなかで、私に与えられた役割は、社会科学の一分野、法律学における論証のありようについて位置づけを行うことなのだらうと思います。

もっとも、この役割を果たすのはとても難しいです。私が論理学の素人であるのは当然ですが、難所はそれだけではありません。加えて重要なのは、法学における論証といっても、一口にはいえないことです。学界での論証なのか、法学部の教室での論証なのか、裁判でのそれなのか、行政機関内部でのそれなのか、文脈に応じて異なると考えることもできます。さらには、法学の分野間でも違いがあると感じられているような印象を受けることがあ

ります。法学部生は（場合によっては法律家も）、私が学んでいる憲法学と、「ザ・法学」ともいえる民法学の間では、違いがある、あけすけな言い方をすれば、憲法学の論証は「ヘン」だと考えているようにも思われるからです。私に与えられた課題をととても重く、その解決を短時間で私が全うすることはなかなか難しいと思う次第です。

そこで、冒頭で述べた裁判における憲法問題についての論証の例を採り上げて、素材と視野を限定し、問題発見的な検討を行うこととします。前半では、小売市場判決の論証が、同じ裁判における憲法問題の論証の時系列的な変化のなかに位置づけると、どのような特徴を持っているといえるのか、を析出します。後半では、そこで得られた特徴が「ザ・法学」の民法学での論証と比べて違いがあるのかどうか、を考えてみます。両者の過程で、論理学という論理的な論証とどう違うのかも適宜考えていこうと思います。これらの検討によって、公開講座全体のなかで私に与えられた役割を少しでも果たすように努めたいと考えています。

講師のプロフィール



こじましんじ
小島 慎司

法学政治学研究科・教授

専門分野 憲法

最近の研究テーマ

制度の憲法学

最近の主な著書

小島慎司『制度と自由』（岩波書店，2013年）

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

平井宜雄『法律学基礎論の研究』（有斐閣，2010年）

高橋文彦『法的思考と論理』（成文堂，2013年）

山下純司ほか『法解釈入門〔補訂版〕』（有斐閣，2018年）

石川健治ほか『憲法訴訟の十字路』（弘文堂，2019年）

HP http://www.j.u-tokyo.ac.jp/faculty/kojima_shinji/

与えられたテーマは、ふだん狭い専門領域で籠城している人間には途方もなく大きなテーマです。あおられてノコノコと野戦に出かけて討ち死にしかねないのですが、公開講座という貴重な機会を生かして少しでも広い視野から考えるように、努力しようと思います。

Memo

Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines.

子どもの論理的思考を豊かに育む教育

教育学研究科・教授 藤 村 宣 之

子どもの論理的思考はどのように発達するのでしょうか。また、その思考は教育によってどのように高めることができるのでしょうか。

発達心理学の領域では、1970年頃まで、乳児期から児童期、青年期にかけて、子どもの論理的思考は段階的に発達することや、その思考の特徴はその時期の子どもの考え方を幅広く規定することが、J.ピアジェなどによる個別面接、行動観察などの方法を用いた研究によって主張されてきました。例えば、具体的な対象が目に見える状況での論理的思考は小学校に入学する7、8歳頃から、現実を超えた可能性についての論理的思考や仮説にもとづく演繹的な思考は小学校高学年以降に対応する11、12歳頃から出現するとされました。一方で、1980年頃から、より統制された条件で実験的な研究を行うことで、子どもの論理的思考の発達が領域によって異なること（思考の領域固有性）や、考える文脈による影響を受けることが示されるようになりました。さらに、1990年前後からは、乳児期の論理的思考を、対象に対する注視時間など言語によらない方法で測る方法が開発されたり、また幼児期以降では、子どもの多様な説明を引き出すような実験・面接課題が工夫されたりすることによって、子どもの論理的思考は、おとなや科学者が行う思考とは異なるものの、思考が対象とする中核領域（物理、生物、心理、経済など）ごとに、日常経験などにもとづきながら、対象領域を区分しながら因果関係などに着目して一貫した枠組みで行われるという意味で「素朴理論」という特徴をもつことが示されるようになりました。例えば、小学生が経済に関わる内容について行う思考には、学校教育では中学校で扱われるような内

容でも、身近な対象や日常経験にもとづきながら、子どもの言葉ではあります。経済学に関わる要因を因果関係に着目しながら多様に関連づける特徴がみられ、その思考が年齢とともに精緻化することが示されています（表1）。

表1 児童期における経済学的思考の発達

ルール名	ルールの特徴	4年生	5年生	6年生
1.需要	クリスマスでケーキに使う→高い	36	21	25
2.供給	あまりとれない→高い	44	42	38
3.供給+価値	あまりとれない→珍しい→高い	4	21	13
4.供給+コスト	あまりとれない→手間がかかる→高い	16	6	33
5.供給+利益	あまりとれない→安いと儲からない→高くする	4	12	42
6.品質(無関連)	おいしい→高い	24	21	21
7.その他		4	9	21
平均適用ルール数		1.32	1.33	1.92

○「イチゴの値段が5月（1パック300円）と12月（1パック600円）でどうして異なるか」についての推理（個別面接研究）。数値は、各ルールの利用率（%）

○小学校4年生から、需要や供給などに着目した思考が可能である。

○小学校6年生になると、コストや利益などを組み込んだ因果的思考を展開できる。

出典：藤村宣之（2002）児童の経済学的思考の発達：商品価格の決定因に関する推理。『発達心理学研究』，13，20-29。

一方で、教授・学習心理学の領域では、子どもの論理的思考が、おとなや年長者がヒントを与えたり一緒に取り組んだりすることで、一人で取り組んだ場合に比べて一定の幅で高まること（最近

接発達の領域）や、与える教材を発達段階に応じて「翻案」することによって、ピアジェらが主張したよりも早い年齢で論理的思考が出現することなどが、L.S.ヴィゴツキーやJ.S.ブルナーなどの古典的な研究によって主張されてきました。また、1980年頃からは、子どものもつ思考の枠組みと矛盾するような事実を示すことで認知的な葛藤を生起させ、思考の枠組みを変化させることをめざした研究も行われるようになりますが、一方で、認知的葛藤の生起だけでは思考の高まりに至らないことも指摘されています。そのような背景のもとに、2000年頃からは、「学習科学」という、教授・学習心理学を含んだ学際的な研究領域のもとで、対等な仲間との「協同」や学習者自身の「探究」のプロセスを重視した学習についての研究が進められています。そこでは、様々な領域における論理的思考を高めるためには、協同や探究のプロセスを通じて多様な知識が関連づけられることや、子ども自身が自分の説明の枠組みを漸進的に変化させていくことなどが有用であることが示され

てきています。

以上の心理学研究にもとづいて考えると、子ども一人ひとりの「素朴理論」を生かせるような、思考の多様性や探究や協同のプロセスを重視した学習過程を組織することで、子どもの論理的思考を豊かに高めることができるのではないかと考えられます。参加者の皆さんと、今後の教育のあり方などについて考えることができましたらと思います。

講師のプロフィール



ふじむらのぶゆき

藤村宣之

教育学研究科・教授

子どもの思考の発達やそれを促進する授業について心理学の視点から研究を進めてきました。子どもはおとなに比べて知識の量は少なくても、知識を柔軟に組み合わせながら論理的に思考を構成できます。多様な他者と関わることによる思考の広がりや深まりを探究しています。

専門分野 教育心理学、発達心理学、数学・科学教育

最近の研究テーマ

探究と協同を通じた児童・生徒の思考や理解の深まり

最近の主な著書

『数学的・科学的リテラシーの心理学:子どもの学力はどう高まるか』(有斐閣、2012年)

『協同的探究学習で育む「わかる学力」:豊かな学びと育ちを支えるために』(共著、ミネルヴァ書房、2018年)

『発達心理学:周りの世界とかわりながら人はいかに育つか [第2版]』(共著、ミネルヴァ書房、2019年)

『新しい時代の教育方法 [改訂版]』(共著、有斐閣、2019年)

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

藤村宣之・橘春菜・名古屋大学教育学部附属中・高等学校(編著)『協同的探究学習で育む「わかる学力」:豊かな学びと育ちを支えるために』(ミネルヴァ書房、2018年)

子安増生・楠見孝・齊藤智・野村理朗(編)『教育認知心理学の展望』(ナカニシヤ出版、2016年)

氏家達夫・陳省仁(編)『発達心理学概論』(放送大学教育振興会、2011年)

藤村宣之、「児童の数学的思考に関する日中比較研究」、(『教育心理学研究』、日本教育心理学会、2004年)

藤村宣之、「児童の経済学的思考の発達:商品価格の決定因に関する推理」、(『発達心理学研究』、日本発達心理学会、2002年)

HP <http://www.p.u-tokyo.ac.jp/gs/c9/staff>

政策とビジネスのための因果推論

経済学研究科・教授 渡 辺 安 虎

ビジネスや政策の現場において、施策や政策の効果を把握することの重要性は広く理解されていると思います。例えばビジネスの文脈では、限られた予算をどのようなマーケティング施策に回し、どれだけの金額を物流の効率化に投資するのか？これはマーケティング施策や物流投資がもたらす効果の測定と直結します。政策の文脈では、定額給付金の2回目をもし考えるとしたら、どのような設計にすべきなのか？その答えは1回目の定額給付金の効果が所得水準や職種が異なる人々でどのように異なっていたのかをどこまで正確に計測できるかに大きく依存するでしょう。

これらのビジネスや政策の現場での問いは、一昔前まではおおまかな数字と担当者の経験と勘で行われてきましたし、今でもそのような現場が大多数なのかもしれません。一方で一部の企業や一部の国・政策分野によっては、個々の顧客や国民の行動に関する詳細なデータが収集可能になっており、これらのデータをデータサイエンティストや経済学者のチームが分析し、企業のビジネス施策の意思決定や政府の政策改善に直接関与しています。では、データをどのように集め・分析することで、どのように施策や政策の効果を把握することができるのでしょうか？

この講座では「(ビジネスと政策のための) 因果推論」と題して、施策や政策の効果測定のために開発されてきた因果推論の道具（のごく一部）と、それがなぜ経済学者によって用いられることになったかについてお話をしたいと思います。

そもそも、「なぜ因果推論について経済学者が話をしているのか」につい

て疑問に思われる方も多いかもしれません。これは経済学が歴史的にはほとんど実験を行えなかったことと関連します。たとえば、「最低賃金の引き上げは雇用にどのような影響をもたらすか？」という労働経済学で最も重要な問いの一つを考えてみましょう。

最低賃金に関するデータと雇用に関するデータは多くの国・地域で収集されています。しかし、そこから観察できるのはあくまで相関関係だけです。景気が良く最低賃金を上げる政治的な合意が得られやすい時に最低賃金が上昇しやすいのであれば、データ上は最低賃金の引上げは雇用の増加をとまなうように見えるでしょう。しかし、これは相関関係ではあっても因果関係なのかは不明です。

因果の向きが（最低賃金⇒雇用）なのか（雇用⇒最低賃金）なのか、一番簡単に知る方法は新薬の治験と同じように、企業をランダムに統制群と処置群に分けて、統制群の最低賃金は変更せずに処置群の最低賃金だけを上昇させ、それぞれ統制群と処置群の企業の雇用を調べるという方法です。しかし、当然ながらそのような実験が許される経済社会はほぼ存在しないでしょう。そこで、実験のできなかった経済学者はなんとか実験のできない観察データから統計的に因果関係を抜き出すために知恵を絞らざるを得ず、その結果として因果推論の道具を発達させてきました。そして、この道具立ての有用性が詳細なマイクロデータの利用可能性が大幅に広がると共に一部の企業等に強く認識され、この10年で米中の多くのIT企業が経済学者を大規模に抱えはじめました。

相関関係のあるデータから因果関係を区別することは容易ではありません。この講義では経済学的な因果推論の道具でどのように因果関係を推論するのかについて、ランダム化対照実験、差の差（Difference-in-difference）、回帰不連続（Regression discontinuity）、マッチング推定といった基本的な道具とその実際のビジネス上及び政策効果測定上の応用例について、時間の許す範囲内で話をしたいと思います。

講師のプロフィール



わた なべ やす とら

渡辺安虎

経済学研究科・教授

昨夏東大に着任するまで、アマゾンで経済学者をしていました。まさに因果推論の道具を用いてビジネス課題に挑戦する日々でした。今も東大CREPE（政策評価研究センター）にて企業や官庁の内部マイクロデータを用いた研究をしています。

専門分野 実証マイクロ経済学、計量マーケティング

最近の研究テーマ

企業でのマイクロデータを用いた価格付け

最近の主な著書

「Voter Turnout and Preference Aggregation」（共著、『American Economic Journal: Microeconomics』, American Economic Association, forthcoming）

「Effectiveness of Product Recommendation under Time and Crowd Pressures」（共著、『Marketing Science』、Informs、2019）

「Do Risk Preferences Change? Evidence from the Great East Japan Earthquake」（共著、『American Economic Journal: Applied Economics』、American Economic Association、2018）

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

伊藤公一郎『データ分析の力 因果関係に迫る思考法』（光文社新書、2017）

中室牧子・津川友介『「原因と結果」の経済学——データから真実を見抜く思考法』（ダイヤモンド社、2017）

安井翔太（2020）『効果検証入門～正しい比較のための因果推論/計量経済学の基礎』（技術評論社、2020）

HP <https://sites.google.com/view/yas-watanabe>

Memo

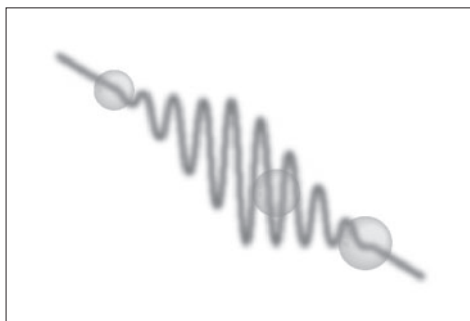
Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines.

物理法則と論理が生み出す情報セキュリティ

工学系研究科・教授 小 芦 雅 斗

私たちの住むこの世界は、究極的には量子力学という物理法則に支配されていると考えられています。日常の世界でこの量子力学特有の性質に直接出会うことはありませんが、ミクロの世界の実験をすると、その不思議な顔が見えて来ます。例えば、私たちが物を見るのに役立っている「光」は、電波やマイクロ波と同じ電磁波の仲間です。通常の光の性質は「波」として説明できます。しかし、光をどんどん弱くしていくと、きまった大きさのエネルギーの塊、つまり「粒子」のような性質が顕れます。この粒は光子と呼ばれますが、波としての性質を失ったわけではないので、光の真の姿は、波と粒子の性質を合わせもつことになります。

これだけでも十分不思議だと感じる方も多いと思いますが、量子力学の神髄は、実はもう一歩先のところにあるのです。例えば図のように、光の姿はこれです、というスナップ写真が撮れるなら、はじめは不思議に思えても、そのうち見慣れてしまうでしょう。科学者たちも、当初はその真の姿を必死に描こうとしていたのですが、前世紀の後半になると、ある衝撃的な事実に気がつきます。それは、「どんなに頑張っても真の姿は描けない」ということです。光が空中を自由に飛んでいる時は、そもそも決まった姿を持ちません。測定器を使って光を測定すると、その時はじめて、まるでサイコ



口を振るように細かいことが決まるのです。

面白いことに、この奇妙な性質は、量子力学が本当に正しいかどうか、とは無関係に成り立ちます。実験事実と、論理の力を組み合わせると、サイコロのような仕組みが自然に備わっていることが導けます。講義では、簡単なギャンブルの話を変えて、その直感的な理由をお話したいと思います。

さて、測定にサイコロが関わってくるとなると、超精密な測定器を開発しようとしても、そこには超えられない限界が生まれることになります。これだけ聞くと、負の側面に聞こえますが、暗号の世界では話が逆転します。つまり、解読や盗聴をしようとする人がどんなに進んだ技術を持っても、そこに自然法則から生まれる限界があるなら、それをうまく利用しない手はありません。それが量子暗号、あるいは量子鍵配送と呼ばれる技術です。光の粒子としての性質が顕著になるくらい微弱な光を用いて通信を行うと、そこに自然のサイコロを組み込まれます。誰も出目を予想できないそのサイコロの性質をうまく使い、通信相手だけに秘密を伝える仕組みを設計するので

す。

量子暗号の最大の特長は、装置をちゃんと作りさえすれば、盗聴者がどんなに進んだ技術を持っても、事実上破れないという点です。数学に基づく従来の暗号は、何十年か先の進んだ計算機や新しい手法によって解読されてしまうリスクを排除できませんが、量子暗号では解読できないことが「証明」できるのです。通信回線を流れる光に対する盗聴装置は千差万別なので、いくつかの盗聴法を選んで耐性試験のようなことを繰り返しても、証明にはなりません。何をされても大丈夫という証明には、論理の力が活躍します。講義では、まるで詰め将棋のように、仮にこうしたとすればああなるはずなので、そうすれば云々、という理屈を積み重ねていく様子をご紹介します。

講師のプロフィール



こ あし ま さ と
小芦雅斗

工学系研究科・教授

専門分野 量子情報・量子光学

最近の研究テーマ

量子暗号のセキュリティ理論

最近の主な著書

『量子暗号理論の展開』（共著、サイエンス社、2008年）

『Principles and Methods of Quantum Information Technologies』（共著、Springer、2016年）

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

小芦雅斗、「量子の世界に潜むお化けの話」、(『応用物理』、82巻9号 p. 781、応用物理学会、2013年)

佐々木雅英・根本香絵・池谷瑠絵、「量子元年、進化する通信」、(丸善出版、2014年)

HP <http://www.qi.t.u-tokyo.ac.jp/>

量子情報という研究分野は、この世界の物理法則がどうしてこんな姿をしているのか、という根源的な問いと、情報セキュリティなどの応用課題が隣り合わせになっています。そんな魅力に憑りつかれ、ずっと研究を続けています。

Memo

Handwriting practice lines consisting of 20 horizontal dashed lines.

動的システムの推論と学習

工学系研究科・教授 矢 入 健 久

私は人工知能の研究者です。もう少し細かく言うと、動的システムの学習、異常検知、データ駆動型健全性監視などを専門としています。そこで、この公開講座の主題である「論理」について、そのような専門性を持った一人の人工知能研究者の立場で考察してみたいと思います。最初に断らないといけないのですが、伝統的な人工知能では、しばしば「論理」とは一階述語論理などに代表される「記号操作」を意味しますが、ここではもっと広く意味を取って、科学者や工学者にとっての「論理」を考えることにします。つまり、世界の様々な現象（自然現象、人間の経済活動、機械のメカニズム、等）を説明する数理体系、すなわちモデル（表現）と推論手段としての「論理」です。ここで、「現象」とは、時間・空間における変化の事象・パターンであり、それを数理的に表現する最も基本的手段が、常微分／偏微分方程式です。そこで、やや乱暴ですが、ここでは、「論理（の一つの形態）＝微分方程式」と考えて先へ進みます。

さて、我々人類は「論理＝微分方程式」のお陰で、様々な自然・人工システムの未来や過去の状態や未経験の場所の様子を予測することができ、その恩恵を享受しています。つまり、「論理」は人間の知能を語る上で必要不可欠なものです。一方、人工知能研究者としては、「人類はどうやって「論理」を手に入れたのか?」、「機械は「論理」を学習することができるのか?」という2つの問題に興味があります。これらを「動的システムの推論と学習」という観点から考えてみましょう。まず、第一の問題については、人間は様々な自然現象や人間自身の活動を観察し、そのダイナミクスの規則性を理

解し、利用しようとするために「論理」を獲得したのではないのでしょうか。つまり、絶えず変化する環境で生存する上で「論理」を持つことが有利だったということです。自明ではありませんが合理的な仮説とは言えるでしょう。

次に、第二の問題「機械も人間のように「論理」を獲得することができるか？」について考えましょう。これが今日の本題です。出発点として、「人間によって与えられた論理」を用いて機械が推論することは既に実現していることを指摘しておきたいと思います。つまり、人間が立てた各種の微分方程式を計算機は高速に数値的に解くことができます。数値計算を推論と呼ぶことには異論もあるでしょうが先へ進みます。次に、データから機械が「論理＝微分方程式」を学習することも、工学では「システム同定」、理学では「データ同化」などの分野で盛んに研究され、実用化されています。例えば、「リンゴが落ちる」という現象について、各時刻のリンゴの高さ座標がデータとして与えられれば、自由落下（+空気抵抗を考慮した）運動を表す常微分方程式を推定すること自体は容易です。しかし、ここにトリックがあります。リンゴが落ちるという事象から、「高さ座標」という本質的な状態量を、人間が天下りの的に与えているから容易なのです。本当の意味で「論理」を獲得するというのは、リンゴが落ちる様子を機械が見て万有引力の法則を見つけることです。つまり、動画像のような低レベルな知覚情報から、位置や速度というこの事象にとって本質的な状態量を見つけることが、機械が「論理」を獲得するための鍵と言えます。実は、今まさに動的システム学習の分野では、深層学習などの技術も取り入れてそのような研究が行われています。現在までのところ、機械が論理を学習する試みはまだ初歩の段階ですが、将来、人工知能が自ら獲得した「論理」を駆使して科学者・工学者の仕事を完全に代替する日が来るのでしょうか？ 研究者としては、もちろんそうなって欲しくないのですが、ここでは結論を急がず皆さんとじっくり論理的に議論したいと思います。

講師のプロフィール



や いり たけ ひさ

矢入 健久

工学系研究科・教授

人工衛星や航空機の制御を研究したいと思って航空宇宙工学専攻に入ったのに、なぜか人工知能の研究に進んで四半世紀が経ちます。現在のAIブームとは少し違う視点から話題を提供したいと思います。

専門分野 人工知能、機械学習、確率的推論、動的システム学習

最近の研究テーマ

人工衛星等大規模人工システムのデータ駆動健全性監視

最近の主な著書

今回お話しする「動的システム学習」に関する書籍を来年刊行予定で執筆中です。

今回のテーマを深めたい人のための参考文献

矢入健久, 「機械学習とシステム同定: 動的システム学習研究の動向」、計測と制御, 計測自動制御学会、2019年

矢入健久, 「典型例で眺める機械学習の様々なタスク」、日本ガスタービン学会誌, 日本ガスタービン学会、2019年

HP <http://www.ailab.t.u-tokyo.ac.jp/members/yairi/>

〒113-8654 東京都文京区本郷7－3－1
東京大学本部社会連携推進課 公開講座担当
E-mail : ext-info.adm@gs.mail.u-tokyo.ac.jp