

ベイズ型推論に関する現在の研究の概観と今後の課題

伊藤 朋子

1. 目的

本稿の目的は、主に2001年以降に行われたベイズ型推論に関する研究に焦点を当てながら、現在の視点に立って研究を概観し、ベイズ型推論研究における今後の課題を明らかにすることである。まず2節で、ベイズ型推論課題の説明と、そこにしばしば出現するとされる基準率無視 (base-rate neglect) (Tversky & Kahneman, 1980) とよばれる誤りの説明を、3節で課題の表記法に関する研究の概観を、4節で基準率無視の説明理論 (モデル) に関する研究の概観を行い、5節で先行研究の問題点と今後の課題を考察する。伊藤 (2006a, 2006b) では、基準率無視に関する主に20世紀に行われた先行研究を概観し、今後の課題を展望した。具体的には、伊藤 (2006a) では歴史的視点に立って20世紀の先行研究を概観し、伊藤 (2006b) では現在の視点に立って、主に1980年代以降に行われた先行研究を概観した。近年のベイズ型推論研究では、例えば Kahneman & Frederick (2002) による二重過程理論 (dual-process theories) などに代表されるように、基準率無視が出現する認知過程の説明を試みる理論 (モデル) が盛んに議論されるようになってきている。しかしながら現在においても、ベイズ型推論課題はなぜ難しいのか、という難しさの原因は、未だ解明されていないように思われる⁽¹⁾。したがって本稿の意義は、3節～4節の概観を通じて、伊藤 (2006a, 2006b) において見出された主に20世紀の研究における問題点が、現在のベイズ型推論研究にも見出されるものであるか否かを検討し、ベイズ型推論課題の難しさの原因を明らかにするためには、今後どのような研究が必要とされるのか、という今後の課題 (5節) を明らかにしようとする点にあると考えられる⁽²⁾。

2. ベイズ型推論課題における基準率無視の説明

2節では、「タクシー課題」(Tversky & Kahneman, 1980) とよばれるベイズ型推論課題を用いながら、基準率無視の説明をする。Tversky & Kahneman (1980) は、「緑タクシーが85%、青タクシーが15%走っている町でタクシーのひき逃げ事件が起き、色の識別率は80%、誤認率が20%であるその事件の目撃者が『犯人は青』と証言したときに、その証言の下で真犯人が本当に青タクシーであった確率」を尋ねる「タクシー課題」の結果から、基準率無視とよばれる誤りの存在を紹介した。仮説Hが成立する事前確率 (基準率) $P(H)$ と、その仮説が成立する条件下においてデータDが得られる確率 (尤度) $P(D|H)$ と、その仮説が成立しない条件下におけるデータDの尤度 $P(D|\neg H)$ か

ら、データ D が得られた後の仮説 H の確からしさ $P(H|D)$ を求める「バイズの定理」に基づくと、 $P(\text{真犯人が青} | \text{青と証言}) = (0.15 \times 0.8) / (0.15 \times 0.8 + 0.85 \times 0.2) \approx 0.41$ という規範解が導かれる。ところが多くの被験者は、基準率を用いずに、尤度 $P(D|H)$ のみに基づいて 80% と解答したという。Tversky & Kahneman に代表される Heuristics & Biases アプローチでは、このような現象を、バイズの定理を規範解とする立場から認知的バイアスとみなし、代表性 (representativeness) というヒューリスティック (Tversky & Kahneman, 1974) に基づいてこのバイアスを説明した。代表性ヒューリスティックとは、ある事象と母集団とがどの程度類似しているのかという評価に基づく判断のことである。代表性の高さは事象の起こりやすさとは独立であるので、これに基づく判断はバイアスを生起させるという。すなわち「タクシー課題」では、「青と証言する」という事象 D と「真犯人が青である」という事象 H の間の類似性が強い (代表性が高い) ために、尤度 $P(D|H) = 80\%$ に注意が向き、基準率が無視されやすくなる、という説明がなされた。Heuristics & Biases アプローチでは、こうした基準率無視の誤り以外にも、連言錯誤 (conjunction fallacy) (Tversky & Kahneman, 1983) や、ランダム系列の誤認知 (Tversky & Kahneman, 1971)、サンプルサイズの無視 (Kahneman & Tversky, 1972) とよばれるバイアスに対しても、代表性ヒューリスティックに基づいた説明を行っている (市川, 1996)。

3. 課題の表記法に関する研究

Heuristics & Biases アプローチによる研究以降、バイズ型推論研究では、数多くの論争が展開されてきた。以下に示す「課題の表記法」に関する研究は、その中の代表的なものの 1 つである。

Gigerenzer (1991) は、頻度情報が豊富な環境で生きてきた人間は本来頻度に適合した頻度論者 (frequentist) である、と考える進化論的解釈の立場から、単一事象を確率判断の対象とする多くのバイズ型推論課題には、そもそも規範解が存在しないこと、したがって、仮に基準率無視の反応が出現したとしても、それは、頻度論者がいう確率論に対する違反とはならないことを指摘した。また Gigerenzer & Hoffrage (1995) は、標準的な確率表記 (probability format) で表されている課題よりも、自然抽出 (natural sampling) に基づく頻度表記 (frequency format) で表されている課題の方が、課題の正答率が高いことを明らかにした。標準的な確率表記とは、例えば、「集団検診を受ける 40 歳の女性が乳ガンである確率は 1%。ある女性が乳ガンであるなら、乳房 X 線写真で陽性が出る確率は 80%」といった表記であり、自然抽出に基づく頻度表記とは、例えば、「集団検診を受ける 40 歳の女性 1000 人のうち 10 人が乳ガンである。10 人の乳ガン女性のうち 8 人に乳房 X 線写真で陽性が出る」といった表記のことである。

課題の表記法を巡るこうした議論は、バイズ型推論研究において、従来から活発に行われてきたのであるが、21 世紀に入ってからこうした議論は継続中である。例えば Sedlmeier & Gigerenzer (2001) は、バイズ型推論を教える新たな方法の提案と検証を行った。そこでは、「表記訓練」と「ルール訓練」の効果を比較した。表記訓練とは、Gigerenzer & Hoffrage (1995) による生態学的なフレー

ムワークに基づいた、頻度表記を構築するよう人々を訓練する、コンピュータを用いたチュートリアル・プログラムで、ルール訓練とは、ベイズの定理に確率を挿入するよう訓練する方法であるという。Sedlmeier & Gigerenzer (2001) は、新たな課題への転移に関しては、表記訓練とルール訓練は共に同程度の効果をもっているが、即時的な学習効果や、長期にわたる時間的な安定性に関しては、前者の方が後者の方法よりも、より大きな効果をもっていることを明らかにした。

また Zhu & Gigerenzer (2006) は、“内容が子どもに適している (content was suited to children)” ベイズ型推論課題を 10 題構成して、結果に及ぼす課題の表記法の影響を調べた。ここでは、例えば、確率表記を用いた「赤鼻課題」と、自然頻度 (natural frequencies) による表記 (自然抽出に基づく頻度表記) を用いた「赤鼻課題」の結果を分析した。前者の課題は、『ピンピンがある小さな村へ行き、道を探ねる。彼が会うこの村人が嘘つきである確率は 10% である。もし嘘つきであるならば、その人が赤い鼻をしている確率は 80% である。もし嘘つきでないならば、その人も赤い鼻をしている確率は 10% である。ピンピンが赤い鼻をした人に村で会うところを想像しなさい。その人が嘘つきである確率はいくらかだろうか?』という課題、後者の課題は、『ピンピンがある小さな村へ行き、道を探ねる。この村人は、100 人につき 10 人が嘘つきである。その嘘つきの 10 人のうち、8 人は赤い鼻をしている。嘘つきでない残りの 90 人のうち、9 人も赤い鼻をしている。ピンピンが赤い鼻をした集団に村で会うところを想像しなさい。これらの人々のうち、何人が嘘つきだろうか?』という課題であった。Zhu & Gigerenzer (2006) は得られた結果から、自然抽出に基づく頻度表記を用いれば、「子どもでもベイズ型推論課題が解ける」という考察をした。

なお Girotto & Gonzalez (2001) は、「可能性や頻度の部分集合 (subset) の表象に頼ることができれば、素人が確率的に推論することは可能」であるとしている。彼らによると、質問形態や課題の構造が、部分集合の関係 (課題の構成要素 (集合) の間にみられる関係) に基づいた直観的な原理を活性化させるように作られていれば、それが確率で表記されていようと、頻度で表記されていようと、素人が課題を解決することは可能であったという。Girotto & Gonzalez (2001) は、自分たちの研究によって得られたこれらの結果を、頻度論者の仮説や進化論的な説明に矛盾するものであると考察している。

4. 基準率無視の説明理論 (モデル) に関する研究

1980 年代以降に展開された一連の論争 (e.g., Gigerenzer, 1991, 1996; Kahneman & Tversky, 1996) の中で (詳細は、伊藤, 2006a を参照)、Gigerenzer (1996) は、Kahneman & Tversky による曖昧なヒューリスティックスによって認知過程のモデル構築が十分になされてこなかったと批判した。そして、Kahneman & Tversky のように規範解からの逸脱のみに関心を向けるのではなく、どのようなときに妥当な判断がなされるのか、また、それはなぜなのかを明らかにするモデル (理論) の必要性を訴えた。Gigerenzer (1996) によるこうした主張は、認知的バイアスの出現過程を説明する理論構築の重要性を唱えるものであり、近年の特徴的な流れであると考えられよう。こうした流れは、連言

錯誤やランダム系列の誤認知に関する研究などでもみられるようになってきている（連言錯誤に関しては e.g., Macdonald & Gilhooly, 1990, ランダム系列の誤認知に関しては e.g., Alter & Oppenheimer, 2006）。

近年のベイズ型推論研究では、例えば Kahneman & Frederick (2002) に代表されるように、二重過程理論 (dual-process theories) とよばれる理論が、盛んに議論されるようになってきている⁽³⁾。Kahneman & Frederick (2002) のこの理論では、2つのシステム（直観的操作を司る迅速で労力の少ない自動的な System1 と、反省的操作を司る時間と労力を要する制御された System2）を想定する。これによると、バイアスが出現するのは、直観的な判断を司る System1 が System2 の監視をくぐり抜けて優位になるためであるという。Kahneman & Frederick (2002) は、こうした二重過程理論の中で、代表性ヒューリスティックに基づく様々なバイアスを、属性代用 (attribute substitution) という単一のメカニズムで説明し直した。属性代用とは、判断対象の標的となっている属性 (target attribution) の評価を、手に入りやすいその対象の別の属性 (heuristic attribution) の評価によって代用することをいう。すなわち代表性ヒューリスティックとは、問われている確率の評価を、手に入りやすい代表性の評価によって代用することであるとされ、単一理論構築の重要性が唱えられた。以下では、近年の傾向を把握するために、基準率無視の説明理論（モデル）に関する研究を概観する。

Villejoubert & Mandel (2002) によると、人の判断の規範解からの逸脱は、基準率無視が原因であると考えられる説 (Bar-Hillel, 1980; Kahneman & Tversky, 1973) の他に、 $P(H|D)$ を $P(D|H)$ と混同する inverse fallacy が原因であると考えられる説 (Koehler, 1996) があるという。Villejoubert & Mandel (2002) は、『Vuma とよばれる惑星を訪ねるところを想像しなさい。この惑星に住んでいるのは2つの目に見えない2タイプの生物だけである。100万の Glom と 100万の Fizo がいる。あなたは無作為に12の生物に出会うだろう。とりわけ彼らのアイデンティティを推測することに、あなたは興味をもっていると想像しなさい。目に見えない生物の一つに出会うときにはいつでも、あなたは、それが Glom であるか Fizo であるかを知りたくなる。あなたは、それが特徴を持っているかどうかをそれぞれの生物に尋ねる通訳者と歩いている。あなたには毎回、標的となる特徴をもっている Vuma 上の Glom と Fizo のパーセンテージが与えられる。その生物は真実を言わずにはいられないので、正しい答えを得ることをあなたは確信でき、その答えはあなたに、その生物のアイデンティティに関する何らかの情報を与えるだろう』という課題を出題し、その生物の答えに基づくそれが Glom (Fizo) である可能性は100のうちどれだけかを頻度で推定するようもとめた。分析結果から Villejoubert & Mandel (2002) は、被験者の判断と規範解等との間のずれは、inverse fallacy による解と規範解との間のずれによって予測が可能であるとし、基準率無視の出現は inverse fallacy が原因であると考えた。

また Osman & Shanks (2005) は、因果的学習と意思決定との間の関係について調べている。そこで用いられた課題の中には、『あなたは医者であると想像しなさい。指に赤い発疹のある、ある患者があなたのところにやって来る。その患者が "Digirosa" という病気にかかっているかどうかを診断

するためにあなたはどんな情報がほしいだろうか。以下に、診断に関連していたり、していなかったりする可能性のある4つの情報がある。診断を下すのに必要な情報の下にある四角に印をつけなさい。但し、そうする必要のある情報のみに印をつけなさい。1. Digirosa にかかっていない赤い発疹のある人々のパーセンテージ, 2. Digirosa にかかっている人々のパーセンテージ, 3. Digirosa にかかっていない人々のパーセンテージ, 4. Digirosa にかかっている赤い発疹のある人々のパーセンテージ』といった「病気課題」(Doherty & Mynatt, 1990) などのベイズ型推論課題があった。彼らは分析結果から、基準率情報に対する重み付けは個人によって異なるが、その重み付けの方法は、因果的学習に関する課題と意思決定に関する課題との間で首尾一貫していること、また、因果的学習と意思決定は構成過程を共有していることなどを指摘した。

また Teigen & Keren (2007) は、『フレッドは毎時間に1回だけ出発するバスで仕事に行く。フレッドは、約10%の場合バスは時刻表よりも前に、80%の場合時刻表よりも0~10分後に、10%の場合10分よりも遅れて到着することに気がついた。フレッドはある日、時間ちょうどにバス停に到着する。彼がバスに間に合う確率はいくらか。別の日に彼は10分遅れて到着する。彼がバスに間に合う確率はいくらか』のような「バス課題」(Falk, Lipson, & Konold, 1994) を16条件で出題した。その結果、基準率無視や基準率の過小評価に関する典型的な研究と比べて、事前確率(基準率)の方が拡張され case information (※データ) の方が無視される、という逆の基準率錯誤があることを示している。

Reyna & Brainerd (2008) は、数量的思考能力(numeracy)とよばれる数学的な熟達は、日々の生活において健康でいたり、社会的判断を行ったりするうえで不可欠であると述べた。彼らによると、多くの大人は、分数や割合、リスクや確率を含む幅広い比率の概念に問題を抱えているという。また、こうした問題の背後にある心理学的なメカニズムは、ファジー・トレース理論(fuzzy-trace theory)などの二重過程アプローチによって描写されるという。ファジー・トレース理論とは、たとえ人が情報の逐語的な(verbatim) (例えば、量的な) 詳細を記憶することができていたとしても、一般に人は、情報の曖昧(fuzzy) で質的な要点・大意(gist) の記憶に頼って、推論や意思決定を行っていると思定するものである。こうしたファジー・トレース理論による説明は、例えば包含の量化(class inclusion) における錯誤や連言錯誤など、様々な錯誤に対して行われている(Reyna, 1991)。

また近年は、以下に示すような、入れ子状集合の仮説(nested set hypothesis) に関する議論も、盛んになってきている。Sloman, Over, Slovak, & Stibel (2003) は、Casscells, Schoenberger, & Grayboys (1978) による「医学的診断課題」——『罹病率が1/1000であるある病気を発見するための検査が、もし、5%の偽陽性率をもっているならば、その人の症状や兆候についてあなたが何も知らないと思定した場合、結果が陽性であるとわかったある人が実際にその病気にかかっている可能性はいくらか』という課題——をもとに実験を行った。そこでは、明瞭に述べられた単一事象確率の枠組みを用いたり、課題解決にとって決定的な課題の「入れ子状集合(nested-set)」の関係を明瞭化する図を用いたりすることによっても、基準率無視が減らせることを報告した。ここでいう入れ子状集

合の関係とは、例えば「医学的診断課題」の場合を例にとると、「全ての可能性（全ての人々）」の集合の中に「ある人に、その病気に対して陽性の検査結果が出る可能性（その病気に対して、陽性の検査結果が出る人々の数）」の集合があり、さらにその中に「ある人がその病気にかかっている可能性（その病気にかかっている人々の数）」の集合がある、といった入れ子状の集合関係のことをいう。Sloman et al. (2003) は、頻度によって成績が促進されるのは、頻度表記を用いることで、課題の確率の解釈が明瞭になり、事例という観点からの表象、つまり、課題の構成要素の間にみられる入れ子状集合の関係が明白になるような枠組みが誘導されるからだと考察した。そして、こうした入れ子状集合の関係による説明の方が、従来の頻度表記に基づく説明よりも、課題成績の促進を説明するうえで、より一般的であると述べた。

こうした入れ子状集合の仮説は、Barbey & Sloman (2007) によっても提唱されている。彼らは、自然頻度の表象に依存したベイズ型推論に関する理論に異議を唱え、データを最もよく説明するためには、二重過程モデル (dual process model) という観点からの枠組みを用いるべきだと主張している。彼らによると、二重処理システム (dual processing systems) の一方は、体系的な誤りの原因となっているのに対して、もう一方のシステムでは、自然頻度ばかりでなく、あらゆる種類の集合表象間の関係について推論することが可能であるという。こうした二重過程モデルでは、基準率無視の出現は、課題内の集合の構造を適切に表象できない連想的な判断ストラテジー (associative judgment strategies) によるものであると説明された。彼らは、ベイズ型推論課題に内在する集合の構造（※入れ子状集合の構造）が明らかになるように課題が表象されたときに、基準率無視が減少すると述べた。

なお、こうした Barbey & Sloman (2007) の研究に対して、Fantino & Stolarz-Fantino (2007) は、自然頻度表記による基準率情報の提示は、基準率に対する感度を高めるうえで役立つことがあるけれども、課題の表記法は万能薬ではないとする Barbey & Sloman (2007) の主張を支持する研究を紹介している。

また Butterworth (2007) は、数学的認知 (mathematical cognition) の領域から、人間などの脳は、頻度 (numerousities of sets) を表象し操作するための分化したメカニズムを生まれながらもっていること、こうした能力は、共通した祖先のシステムから遺伝的に受け継いできたように思われること、このような生得的システムに依存しているという意味で、自然抽出もまた自然であると考えられること、つまり、頻度は事実自然であるのに対して、基準率 (base-rates) はそれらが率 (rates) であるために無視されてしまうこと、などを主張した。Butterworth (2007) によるこうした主張は、連言錯誤研究における Cosmides & Tooby (1996) などと同様に、進化論的解釈に基づいた近年の特徴的な見解の一つと考えられよう。

一方 Barton, Mousavi, & Stevens (2007) は、Barbey & Sloman (2007) による二重過程モデルを、漠然としたものであると述べている。そこでは、ベイズ型推論課題における統計的な情報を、①単一事象確率か、頻度か、②%表記か、分数表記か、実数表記か、整数のペアによる表記（例、「100

のうち20の可能性」や「100人のうち20人」といった表記)か、③標準化された表記か、連言による表記か、といった3つの側面に分類し、これらを概念的に混同し誤った結論を導いているとして、Barbey & Sloman (2007) に異議を唱えている。

また Gaissmaier, Straubinger, & Funder (2007) は、自然頻度と同様に、ある種の図は複雑な情報を伝達するうえで特に役立つ方法のようだと述べ、精神にはもともと、こうした「生態学的に構造化された情報」(予めもっている知覚・認知能力とマッチする方法で表記された情報)を取り入れられるような準備性があると主張している。彼らは、2つの認知システムを想定する必要はないとし、こうした「生態学的に構造化された情報」の原理によって、基準率の適切な利用が容易になったり、基準率が過度に利用されたりする場合をも説明できると述べている。

また Brainerd (2007) は、(a) 説明が領域固有的な考え方よりも一般的な認知理論に基づいているという点、(b) 課題構造が推論エラーの主要な源泉として扱われている点、(c) 入れ子状の集合関係を基準率無視の原因とみなしている点、の3つの水準において、Barbey & Sloman (2007) によるモデルは、Reyna (1991) らによるモデル (denominator neglect model) と類似しており、Reyna (1991) らによるモデルの方が先であったと述べている。但し Brainerd (2007) は、Barbey & Sloman (2007) による枠組みは、直観を思考のプリミティブな形態として扱う伝統的な System1/System2 アプローチであるのに対して、Reyna (1991) らによる枠組みは、直観を思考の高等様式として扱うファジー・トレース理論であるとし、両モデルの背後にある二重過程の枠組みは異なっていると述べている。

また Hoffrage, Gigerenzer, Krauss, & Martignon (2002) は、最近の研究 (Evans, Handley, Perham, Over, & Thompson, 2000; Girotto & Gonzalez, 2001; Gigerenzer & Hoffrage, 1999; Macchi, 2000) で蔓延している2つの誤解——(i) 標準化された頻度が自然抽出に基づく頻度と間違われていることや、(ii) その結果として、「入れ子状集合の構造 (nested set structure)」や「部分集合の原理 (subset principle)」といった用語が、まるで新しい説明であるかのように提案されていること——を指摘し、こうした新たな用語は、自然抽出に基づく頻度のもっている基礎的な特性に対して曖昧なラベルづけをしているに過ぎないと述べている。標準化された頻度とは、例えば、「1000人の患者のうち40人が感染している。感染している1000人の患者のうち750人に陽性反応が出る。感染していない1000人の患者のうち125人にも陽性反応が出る」といった表記のことである。Hoffrage et al. (2002) は、こうした表記と、自然抽出に基づく頻度表記 (例、「1000人の患者のうち40人が感染している。感染している40人の患者のうち30人に陽性反応が出る。感染していない960人の患者のうち120人にも陽性反応が出る」) とを区別している。また Gigerenzer & Hoffrage (2007) においても、Barbey & Sloman (2007) による入れ子状集合、分割頻度 (partitive frequencies)、内側・外側視点 (inside-outside view)、二重過程といった用語は、自分たちのオリジナルの分析 (Gigerenzer & Hoffrage, 1995, 1999) に混同以外ほとんど何も加えていないという批判をしている。

なお Whitney, Hinson, & Matthews (2007) は、Barbey & Sloman (2007) の論文は、「現実世界」の決定における情緒的なプロセスの基本的な役割を考慮しておらず、情緒無視 (affect neglect) を犯し

ていると述べている。そこでは、例えば、もし人々が囚人の釈放について推薦をするよう求められたとしたら、「100人のうち10人よりも多くの人が再犯をするだろう」と言われるよりも、「再犯の可能性は10%ある」と言われた場合の方が、はるかに釈放の推薦をするだろうという例を出している。これは、頻度表記（前者の表記）の方が、「実際の人々が現実の犯罪をする」といった情緒的な帰結を連想させやすいからだという。このように Whitney et al. (2007) は、情緒的な影響が意思決定にとっていかに必須のものであるかを説明し、二重過程モデルは、推論における熱くて冷たい認知 (hot and cold cognition) を理解するうえでいかに有用な枠組みとなりうるのかを考察した。

また Uhlmann, Brescoll, & Pizarro (2007) も、動機づけの観点から、基準率の利用や基準率無視を説明している。

5. ベイズ型推論に関する先行研究における問題点と今後の課題

ここまで3節～4節において、主に2001年以降に行われたベイズ型推論に関する先行研究を概観してきた。これらの研究を捉え直すと、これまでのベイズ型推論研究には、以下に示すような幾つかの問題点が残されているように思われる。

第1に、先行研究は、大人を対象とするものが大部分で、依然として発達の視点に乏しいように思われる。もちろん Zhu & Gigerenzer (2006) の研究は、子どもを対象に行われたものであり、子どもを対象とする研究が皆無というわけではない。しかし Zhu & Gigerenzer (2006) の研究は、「赤鼻課題」などの“内容が子どもに適している”ベイズ型推論課題を出題し、自然抽出に基づく頻度表記を用いれば「子どもでもベイズ型推論課題が解ける」と考察するものであり、そのような表記を用いていないオリジナルのベイズ型推論課題（例、「タクシー課題」(Tversky & Kahneman, 1980)）が難しいのはなぜか、というベイズ型推論の難しさの原因は、未だ解明されていないように思われる。伊藤（印刷中）では、サイコロふりに関する基礎的な確率課題を出題し⁽⁴⁾、確率量化操作（確率の数量化に関わる知的操作）の発達について、確率量化以前の段階0、基本的な1次的量化が可能な段階ⅠA、加法的合成を伴う1次的量化が可能な段階ⅠB、基本的な2次的量化が可能な段階ⅡA、加法的合成を伴う2次的量化が可能な段階ⅡB、基本的な条件付確率の量化が可能な段階ⅢA、ベイズ型条件付確率の量化が可能な段階ⅢBという段階が見出されること、中学生の多くは段階ⅠAにとどまるが、大学生の多くは段階Ⅱ以上にあり、両者の水準が異なることなどを明らかにした。このような「知的操作の発達」という視点⁽⁵⁾をベイズ型推論研究にも取り入れることによって、出現する様々な判断タイプのレベル分けが可能になるのではないかとと思われる。これによって、ベイズ型推論の難しさはどの過程にあるのか、という難しさの本質的要因が解明されるのではないかとと思われる。

第2に、先行研究で用いられていた課題は、例えば「乳房X線写真に関する課題」(Gigerenzer & Hoffrage, 1995) や、「赤鼻課題」(Zhu & Gigerenzer, 2006)、「惑星 Vuma 上の生物に関する課題」(Villejoubert & Mandel, 2002) や、Teigen & Keren (2007) が用いていた「バス課題」(Falk et al., 1994)、Osman & Shanks (2005) が用いていた「病気課題」(Doherty & Mynatt, 1990)、さらに

Sloman et al. (2003) が用いていた「医学的診断課題」(Casscells et al., 1978) のように、課題内容（文脈）に富んだものが多く、課題解決者にとっても、結果を分析する側にとっても、多様な解釈を生み出す可能性があったように思われる。例えば、Zhu & Gigerenzer (2006) の研究のように「確率表記」と「自然抽出に基づく頻度表記」の効果を検討するのであれば、用いる課題の内容は可能な限り単純化して、形式的構造の明瞭な課題を用いる必要があるだろう。そのような課題を用いることによって、調べようとする要因以外の影響は可能な限り削ぎ落とし、対象とする要因に焦点を絞って、その影響を明らかにできると考えられるからである。

第3に、近年のバイズ型推論研究では、基準率無視の出現過程の説明を試みる理論（モデル）に関する議論が、盛んに行われるようになってきている（e.g., Kahneman & Frederick, 2002; Sloman et al., 2003; Barbey & Sloman, 2007）。だが、人の認知システムを説明する包括的な理論（モデル）の構築には、未だ成功していないように思われる。例えば System1 と System2 という2つのシステムを想定した Kahneman & Frederick (2002) の二重過程理論も、先に提唱した代表性ヒューリスティックの再記述にとどまっていた、System2 の監視はなぜ脆弱なのか、なぜ属性代用とよばれるメカニズムが生じるのか、といった点は、依然、解明されていないように思われる。また Sloman et al. (2003) による研究でも、「入れ子状集合の関係による説明の方が、頻度表記に基づく説明よりも、バイズ型推論課題の成績の促進を説明するうえで、より一般的である」といった説明がなされているが、それではなぜ入れ子状集合の関係を把握することは容易であるのか、入れ子状集合の関係を明白にした課題は果たして本来のバイズ型推論課題の性質を備えているのか、といった点に対しては、十分な解答を出せていないように思われる。

以上より、伊藤 (2006a, 2006b) で見出された主に20世紀の研究における問題点は、現在のバイズ型推論研究にも見出されるものであったように思われる。バイズ型推論課題の難しさの要因を解明し、基準率無視の出現過程を説明する包括的な理論（モデル）の構築を行うためには、課題内容を可能な限り単純化し、形式的構造の明瞭な課題を用いた、発達の研究を行うことが重要ではないかと思われる。

注(1) Zhu & Gigerenzer (2006) によると、母集団から逐次的に事例を抽出する自然抽出による頻度表記を用いれば、課題が易しくなり「子どもでもバイズ型推論課題が解ける」という。しかし、そのような表記を用いていない例えば「タクシー課題」(Tversky & Kahneman, 1980) などのオリジナルのバイズ型推論課題が大人にとっても難しいのはなぜか、という問いは、今も未解決であるように思われる。

(2) 20世紀と21世紀の研究は、研究史的には連続性をもつものであるが、バイズ型推論研究における今後の課題を明らかにするうえで、伊藤 (2006a, 2006b) において検討された主に20世紀の研究を対象とする問題点が、それ以降の現在のバイズ型推論研究にも当てはまるものであるか否かを検討しておくことが重要と考えられたことから、本稿ではこのような目的を掲げた。

(3) Evans (2008) によると、二重過程理論は、認知・社会心理学において30年以上前から存在してきたが、System1 や System2 という用語が一般によく使われるようになってきたのは、最近の約10年以内であるという。また、これによると、最近まで、判断や意思決定の領域における二重過程理論の役割は、推論や社会的

認知研究の場合よりも、例外はあるものの、ずっと小さかったとされている。

- (4) 伊藤（印刷中）では、従来の課題と比較して形式的構造が明瞭で確率課題であることが明確な、かつ、判断タイプの分析が容易であると考えられる確率推論課題として、「サイコロ課題」を出題した。
- (5) 本稿の立場では、学校教育による学習経験の影響を認めながら、確率学習を行っていない幼稚園児や小学生の結果にも年齢差が見られる（e.g., 中垣, 1986; Itoh, 2008）ことから、そのような学習の成立にも、知的操作の発達を前提としている面があるのではないかと考えた。

文献

- Alter, A. L., & Oppenheimer, D. M. (2006). From a fixation on sports to an exploration of mechanism: The past, present, and future of hot hand research. *Thinking and Reasoning*, 12(4), 431-444.
- Barbey, A. K., & Sloman, S. A. (2007). Base-rate respect: From ecological rationality to dual processes. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 241-297.
- Bar-Hillel, M. (1980). The base-rate fallacy in probability judgments. *Acta Psychologica*, 44, 211-233.
- Barton, A., Mousavi, S., & Stevens, J. R. (2007). A statistical taxonomy and another “chance” for natural frequencies. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 255-256.
- Brainerd, C. J. (2007). Kissing cousins but not identical twins: The denominator neglect and base-rate respect models. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 257-258.
- Butterworth, B. (2007). Why frequencies are natural. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 259-260.
- Casscells, W., Schoenberger, A., & Grayboys, T. (1978). Interpretation by physicians of clinical laboratory results. *New England Journal of Medicine*, 299, 999-1000.
- Cosmides, L., & Tooby, J. (1996). Are humans good intuitive statisticians after all? Rethinking some conclusions from the literature on judgment under uncertainty. *Cognition*, 58, 1-73.
- Doherty, M. E., & Mynatt, C. (1990). Inattention to $P(H)$ and to $P(D | \neg H)$: a converging operation. *Acta Psychologica*, 75, 1-11.
- Evans, J. St. B. T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 255-278.
- Evans, J. St. B. T., Handley, S. J., Perham, N., Over, D. E., & Thompson, V. A. (2000). Frequency versus probability formats in statistical word problems. *Cognition*, 77, 197-213.
- Falk, R., Lipson, A., & Konold, C. (1994). The ups and downs of the hope function in a fruitless search. In G. Wright, & P. Ayton (Eds.), *Subjective probability* (pp. 353-377). Chichester, UK: Wiley.
- Fantino, E., & Stolarz-Fantino, S. (2007). Enhancing sensitivity to base-rates: Natural frequencies are not enough. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 262-263.
- Gaismaier, W., Straubinger, N., & Funder, D. C. (2007). Ecologically structured information: The power of pictures and other effective data presentations. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 263-264.
- Gigerenzer, G. (1991). How to make cognitive illusions disappear: Beyond “heuristics and biases”. *European Review of Social Psychology*, 2, 83-115.
- Gigerenzer, G. (1996). On narrow norms and vague heuristics: A reply to Kahneman and Tversky (1996). *Psychological Review*, 103, 592-596.
- Gigerenzer, G., & Hoffrage, U. (1995). How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats. *Psychological Review*, 102, 684-704.
- Gigerenzer, G., & Hoffrage, U. (1999). Helping people overcome difficulties in Bayesian reasoning: a reply to Lewis and Keren (1999) and Mellers and McGraw (1999). *Psychological Review*, 106, 425-430.
- Gigerenzer, G., & Hoffrage, U. (2007). The role of representation in Bayesian reasoning: Correcting common misconceptions. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 264-267.

- Giroto, V., & Gonzalez, M. (2001). Solving probabilistic and statistical problems: a matter of information structure and question form. *Cognition*, 78, 247-276.
- Hoffrage, U., Gigerenzer, G., Krauss, S., & Martignon, L. (2002). Representation facilitates reasoning: what natural frequencies are and what they are not. *Cognition*, 84, 343-352.
- 市川伸一. (1996). 確率判断. 市川伸一 (編), *認知心理学:4 思考* (pp. 61-79). 東京: 東京大学出版会.
- 伊藤朋子. (2006a). 確率的推論におけるバイアス (基準率の無視・連言錯誤) に関する先行諸研究の概観と今後の課題. *早稲田大学大学院教育学研究科紀要 (別冊) 第13号(2)*, 早稲田大学, 東京, 1-11.
- 伊藤朋子. (2006b). 基準率の無視に関する現在の研究水準の概観と解明すべき課題. *早稲田大学大学院教育学研究科紀要 (別冊) 第14号(1)*, 早稲田大学, 東京, 23-33.
- Itoh, T. (2008). Developmental study on conservation of probability. *Abstracts of the XXIX International Congress of Psychology*, 101.
- 伊藤朋子. (印刷中). 確率量化操作の発達の研究: 「サイコロ課題」を用いて. *発達心理学研究*.
- Kahneman, D., & Frederick, S. (2002). Representativeness revisited: Attribute substitution in intuitive judgment. In T. Gilovich, D. Griffin, D. Kahneman, & D. W. Griffin (Eds.), *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment* (pp. 49-81). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1972). Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3, 430-454.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1973). On the psychology of prediction. *Psychological Review*, 80, 237-251.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1996). On the reality of cognitive illusions. *Psychological Review*, 103, 582-591.
- Koehler, J. J. (1996). The base rate fallacy reconsidered: Descriptive, normative, and methodological challenges. *Behavioral and Brain Sciences*, 19, 1-53.
- Macchi, L. (2000). Partitive formulation of information in probabilistic problems: Beyond heuristics and frequency format explanations. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 82(2), 217-236.
- Macdonald, R. R., & Gilhooly, K. J. (1990). More about Linda or conjunctions in context. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2(1), 57-70.
- 中垣 啓. (1986). 子どもは如何に割合の大小を判断しているか? —その発達の研究. *国立教育研究所研究集録第13号*, 国立教育研究所, 東京, 35-55.
- Osman, M., & Shanks, D. R. (2005). Individual differences in causal learning and decision making. *Acta Psychologica*, 120, 93-112.
- Reyna, V. F. (1991). Class inclusion, the conjunction fallacy, and other cognitive illusions. *Developmental Review*, 11, 317-336.
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (2008). Numeracy, ratio bias, and denominator neglect in judgments of risk and probability. *Learning and Individual Differences*, 18, 89-107.
- Sedlmeier, P., & Gigerenzer, G. (2001). Teaching Bayesian reasoning in less than two hours. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(3), 2001, 380-400.
- Slooman, S. A., Over, D., Slovak, L., & Stibel, J. M. (2003). Frequency illusions and other fallacies. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 91, 296-309.
- Teigen, K.H., & Keren, G. (2007). Waiting for the bus: When base-rates refuse to be neglected. *Cognition*, 103, 337-357.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1971). Belief in the law of small numbers. *Psychological Bulletin*, 76(2), 105-110.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185, 1124-1131.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1980). Causal schemes in judgments under uncertainty. In M. Fishbein (Ed.), *Progress in social psychology*. Vol. 1 (pp. 49-72). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1983). Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability

- judgment. *Psychological Review*, 91, 293-315.
- Uhlmann, E. L., Brescoll, V. L., & Pizarro, D. (2007). The motivated use and neglect of base rates. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 284-285.
- Villejoubert, G., & Mandel, D. R. (2002). The inverse fallacy: An account of deviations from Bayes's theorem and the additivity principle. *Memory and Cognition*, 30(2), 171-178.
- Whitney, P., Hinson, J. M., & Matthews, A. L. (2007). Base-rate respect meets affect neglect. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 285-286.
- Zhu, L., & Gigerenzer, G. (2006). Children can solve Bayesian problems: The role of representation in mental computation. *Cognition*, 98, 287-308.