

自然の戯れ

Peirce の偶然主義と進化的宇宙論

Jimmy Aames

舞鶴工業高等専門学校
asonosakan@gmail.com

時間・偶然研究会 2022/05/27

Outline

1 Peirce の偶然主義

- 偶然主義とは何か
- Peirce の偶然主義の背景
- 偶然主義が論じられている主なテキスト
- 「必然性の教説の精察」(1892) の議論

2 Peirce の進化的宇宙論

- 進化的宇宙論が論じられている主なテキスト
- 1880 年代～90 年代初頭の宇宙論
- 「推論と事物の論理」(1898) の宇宙論
- Peirce の進化的宇宙論の現代的展開：Smolin の「時間的自然主義」

3 Peirce の偶然主義と現代物理学

- 量子論
- カオス

Peirce の偶然主義

「科学の勝利に関する通俗的な読み物にすっかり心を奪われて、宇宙があらゆる細部に至るまで法則によって支配されていることが、科学によって証明されていると本気で想像している人たちがいる。彼らはおそらく神学者なのであろう」(RLT: 260, 1898)



Figure: Charles S. Peirce (1839–1914)

偶然主義とは何か

- “Tychism”（偶然主義）：ギリシア語で「偶然」を意味する τύκη から Peirce が作った造語
- 「必然主義」(necessitarianism) と対立とする立場
- **必然主義**：「宇宙におけるあらゆる事実が法則によって決定されている」とする考え (EP1: 298, 1892)
- 必然主義によると「ある時点における物事の状態と、いくつかの不変の法則とが併せて、他のあらゆる時点での物事の状態を完全に決定する」 (EP1: 299, 1892)
- 必然主義は、19 世紀末当時、ほとんどの科学者・哲学者が信奉していた → **機械論哲学**

偶然主義とは何か

- 偶然主義は必然主義の否定である：宇宙の事実の中には、法則によって決まっておらず、純粹に偶然的に生じるものがある
- 言い換えると、自然法則は完全に厳密ではなく、法則から逸脱する出来事が存在する
- 偶然主義がその存在を主張する「偶然」は、人間の観測精度の制約などに由来する「主観的」な偶然ではなく、自然そのものに内在する「客観的」な偶然である
- 「**純粹な偶然**」 (pure chance) ないし「**絶対的偶然**」 (absolute chance) とも

Peirce の偶然主義の背景

- Peirce は測地学者 (geodesist) としてアメリカ沿岸・測地学調査所で勤務していた
- 彼の主な仕事は、アメリカ各地で振り子を使って重力の強さの小さな変位を測定し、それに基づいて正確な地形図を作成すること
- 重力測定用の振り子の改良にも携わっていた
- ハーバード大学の天文台で星の光のスペクトルを分析する研究なども



Peirce の偶然主義の背景

- Peirce の偶然主義の背景には、彼のプロの科学者としての仕事があるように思われる
- 科学で行われるどのような測定においても、得られたデータにランダムな「ばらつき」がある
- 測定器や測定方法を改良し、測定をより精密にしていけば、理想的にはこうした「ばらつき」はなくなると一般には信じられている
- しかし実際はこの真逆である：「測定をより精密にすればするほど、法則からの不規則な逸脱はより確実に増えていく」(EP1: 304, 1892)
- したがって「不規則な逸脱」のすべてを測定誤差に帰属させることはできない

Peirce の偶然主義の背景

- Peirce の偶然主義の背景にはさらに、19 世紀後半の科学・思想に絶大な影響を与えた Darwin の進化論と、Maxwell や Boltzmann らの気体分子運動論がある
- 進化論と気体分子運動論はともに、観測されている規則性を、ランダムな現象の蓄積によって説明する理論である
- Peirce はここから着想を得て、この宇宙において観測されるあらゆる規則性（自然法則）が、究極的にはランダム性の蓄積によって徐々に進化してきたとする宇宙論を構想 → 進化的宇宙論

偶然主義が論じられている主なテキスト

- 「設計と偶然」 (“Design and Chance,” 1883–1884)
- 「謎を解き当てる」 (“A Guess at the Riddle,” 1887–1888)
- 1891–1893 年の『モニスト』形而上学シリーズ
 - 「必然性の教説の精察」 (“The Doctrine of Necessity Examined,” 1892)
 - Paul Carus の反論に対する再反論「必然主義者への反論：ケイラス博士への応答」 (“Reply to the Necessitarians: Rejoinder to Dr. Carus,” 1893)

『モニスト』形而上学シリーズ

- 「理論の建築術」 (“The Architecture of Theories,” 1891)
- 「必然性の教説の精察」 (“The Doctrine of Necessity Examined,” 1892)
- 「精神の法則」 (“The Law of Mind,” 1892)
- 「人間のガラスのような本性」 (“Man’s Glassy Essence,” 1892)
- 「進化的愛」 (“Evolutionary Love,” 1893)
- 「必然主義者への反論：ケイラス博士への応答」 (“Reply to the Necessitarians: Rejoinder to Dr. Carus,” 1893)

「必然性の教説の精察」(1892) の議論：必然主義の歴史

- 必然主義の最初の提唱者は原子論者デモクリトスだが、原子論を継承したエピクロスは、原子がその軌道から自発的に逸脱するという「偏奇」(παρέκλισις; swerve) の概念を導入
- 古代において必然主義を堅持した唯一の哲学の学派はストア派
- 近代になって力学が発見されると、宇宙のあらゆる現象を力学法則によって説明できるという期待が大きくなった
- この考えは当初、自由意志や奇跡の存在と衝突するように見えたが、連合心理学や聖書批評学によって対立は弱まった
- 「現代ほど必然主義が流行した時代はない」(EP1: 299, 1892)

必然主義擁護論 1: 「仮定」としての必然主義

- 必然主義を擁護するやり方の一つは、それが科学的推論の「前提」あるいは「仮定」であるというもの (EP1: 300–3, 1892)
- しかし、ある信念が「仮定」されるからといって、それが真であると考えるべき理由にはまったくならない
- さらに、科学は蓋然的に正しい結論を目指すのみで、宇宙全体に亘って例外なく厳密に正しい結論を目指しているわけではないので、そもそも必然主義が科学の「仮定」であるとは言えない

必然主義擁護論 2: 経験的命題としての必然主義

- 次に Peirce は、必然主義が「自然の観察」に基づく経験的な命題であるという見解を検討する (EP1: 303–5, 1892)
- 「必然主義の立場の本質は、連続量〔粒子の位置や運動量など〕は何らかの厳密な値を持っているという考えにある」 (EP1: 303, 1892)
- しかし、連続量の値を測定によって「誤差ゼロ」で確定することはできない
- したがって「連続量が厳密な値を持っている」という命題は、観察によって正当化できない

必然主義擁護論 2: 経験的命題としての必然主義

- 必然主義者が自説を擁護するために挙げる経験的論拠は、宇宙に「規則性」が存在することを示すものばかりで、その規則性が**完全に厳密**であることを示すものではない
- 厳密性に関しては、観察はむしろそれに反している：「測定をより精密にすればするほど、法則からの不規則な逸脱はより確実に増えていく」(EP1: 304, 1892)
- 以上より、観察に訴えることで必然主義を擁護することはできない

必然主義擁護論 3: 絶対的偶然は現象の説明にならない

- 次に Peirce が検討するのは、「絶対的偶然」の概念は自然現象の説明にならず、それゆえ導入するべきではないという考え (EP1: 306, 1892)
- この議論にはいくつかのバージョンがあり得る：
 - 「どんな観測事実の説明にも、偶然の概念を用いるべきではない」
 - 「偶然の概念を用いないと説明できないような観測事実は知られていない」

多様性・複雑性の起源としての偶然

- 上記の議論に答えるために、Peirce は（少し寄り道をして）自身と必然主義者との対話形式で「賽子を投げる」という事例を考える (EP1: 306–7, 1892)
- Peirce 「賽子の出目は、偶然の典型例であるように思われる。もちろん賽子は力学法則に従うが、それはあくまで近似的な法則で、完全に厳密ではない」
- 必然主義者「“偶然” というのは、未知の原因に対して我々が宛てがう名前ではない。賽子を投げる時、それに働く力学法則は常に同じなので、出目の多様性をもたらすのは法則ではなく、初期状態の多様性である。これが“偶然” という名前と呼ばれている未知の原因である」

多様性・複雑性の起源としての偶然

- Peirce 「その考えを追求すると、我々が“偶然”と呼んでいるものすべて、宇宙の多様性のすべては、宇宙の初期状態に帰着することになる。しかし宇宙の始まりにだけこのような多様化が起きたと考えるのは恣意的で根拠がない。むしろ多様化は、“偶然”という形で常に起きていると考えるべきだ」
- 必然主義の立場では、宇宙の内在的な複雑性は常に一定だが、生命や社会の発達・進化を観察すると、一般に複雑性は増大する傾向にあることが分かる
- 必然主義はこうした多様性や複雑性の増大を説明できないが、自然そのものに「自発性」(spontaneity) が備わっていると認めれば説明できる

規則性の起源としての偶然

- こうした自発性は「法則によって狭い範囲内に拘束されながらも、いたるところで常に働いており、絶えず法則からの微小な逸脱を生み出し、また無限に低い頻度で大きな逸脱を生み出している」(EP1: 308, 1892)
- さらに偶然主義は、「法則の桎梏を緩めることにより」、宇宙の多様性だけでなく規則性（自然法則）がどのように生じたのかも説明できる (EP1: 308) → Peirce の進化的宇宙論 (後述)
- それに対して必然主義者は、法則の存在を、それ以上説明不可能な端的な事実として受け入れるしかできない

自由意志と意識

- さらに、必然主義者は（一貫していれば）「精神」も物理的世界の一部とみなし、その働きもすべて宇宙の始まりから決定していると考えざるを得ない
- そうすると自由意志が否定されるだけでなく、私たちの意識そのものが「幻想」となる
- というのも、私たちがある時点において経験する「質」は、他の時点における質から厳密に計算することは不可能なので、それは物理的世界に付随する一種の「幻想」とみなさざるを得ない
- しかし、因果の完全な厳密性を（たとえ僅かでも）放棄することで、世界の中に精神を戻すことができる

「偶然性」の仮説の経験的検証（？）

- さらに Peirce は、「偶然性・自発性」の仮説から、「観察事実と驚くほど一致する」帰結を、詳細な数学的議論によって導出したと主張 (EP1: 309)
- しかし、「主題や推論方法が新奇であるため、私の論証が、私自身が満足しているのと同程度に他の数学者を満足させられるとは約束できない」(同上) → 公表せず
- 残念ながら上記のような内容の手稿は見つかっていない

偶然主義の論拠：まとめ

- 偶然主義は自然の多様性や複雑性が増大する傾向を説明できるが、必然主義はできない
- 必然主義は、自然のあらゆる多様性の起源を宇宙の始まりに押しやるが、これは恣意的で根拠がない
- 偶然主義は、自然法則の起源を説明できるが、必然主義はその存在を説明不可能な端的な事実として受け入れるしかない
- 偶然主義は、自由意志や意識の実在性を否定しない
- 経験的検証 (?)

必然主義擁護論 3: 絶対的偶然は現象の説明にならない (応答)

- ここで再び Peirce は、「絶対的偶然は現象の説明にならない」という必然主義者側の議論に戻り、応答する
- 「どんな観測事実の説明にも、偶然の概念を用いるべきではない」→ 偶然の概念は、何らかの**特定の**現象を説明するためではなく、**多様性一般**、および**規則性一般**を説明するために導入されている
- 「偶然の概念を用いないと説明できないような観測事実は知られていない」→ 生命や社会の発達・進化に代表される多様性や複雑性の増大がそのような観測事実に当たる

Peirce の宇宙論的プロジェクト

- 「Peirce の宇宙論の要諦は、無法則的な偶然から成る原初的なカオスを仮定し、統計的な推論を活用することで、自然法則の進化に関する仮説的な自然史を構築すること、そしてそれをもとに、自然法則の一般的な形式を説明し、まだ発見されていない法則の一般的な形式を予測することであった」 (T. L Short 2010: 528)
- Peirce の宇宙論は、完成した体系的な「理論」ではなく、絶えず修正を施された一連の仮説からなるリサーチ・プログラムとして理解されるべき

進化的宇宙論が論じられている主なテキスト

- 1880 年代の宇宙論
 - 「設計と偶然」 (“Design and Chance,” 1883–1884)
 - 「謎を解き当てる」 (“A Guess at the Riddle,” 1887–1888)
- 1890 年代初めの宇宙論
 - 『モニスト』 形而上学シリーズ (1891–1893)
- 1890 年代末頃の宇宙論
 - 1898 年ケンブリッジ連続講義「推論と事物の論理」 (“Reasoning and the Logic of Things”)
 - 上記連続講義の初期草稿群

自然法則を説明する

- Peirce の宇宙論は、二つの問いに答えることを目指す：
 - 自然法則は、なぜ他の形ではなく現に持っているような形をしているのか
 - そもそもなぜ自然法則が存在するのか
- 例：なぜ重力は逆 2 乗則に従うのか？

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

引力の法則はあくまで統計的な法則で、距離の 2 乗よりも高いべき乗に反比例して引き合う物質は宇宙空間に放り出されたり合体したりしてしまい、長期的には逆 2 乗則に従う物質だけが残ったのかもしれない (EP1: 223–24, 1883–1884)

はじめにカオスありき

- 自然法則の進化が何らかの法則に従うとすれば、その高次の法則に対しても「どのように生じたのか」と問うことができるのではないか？ → **メタ法則の問題**
- 宇宙の始まりには一切の法則が存在せず、ただ純粋なカオスだけがあったと仮定することでメタ法則の問題を回避できる → **偶然は説明は要求しない**
- この原初のカオスから法則がどのように生じたのかを説明するのが、Peirce が「**習慣化の原理**」(principle of habit-taking) と呼ぶものである

習慣化の原理

- 「あらゆるものは習慣化の傾向性を持っている。原子にせよその部分にせよ，分子や分子の集まりにせよ，想定可能なあらゆる実在的対象は，過去の類似した状況における振る舞いと同様の振る舞いをする可能性がより高くなる」(EP1: 277, 1887-1888)
- 例：Hebb の学習則 (“Neurons that fire together, wire together”)
- こうした習慣化の傾向性は生命に顕著に見られるが，Peirce にとってそれを生命にとまらず，宇宙のあらゆるものを支配する根本的な原理である

客観的観念論

- 「物質は退化した精神であり，凝り固まった習慣が物理法則になる」(EP1: 293, 1891)
- 精神を物質から区別する特徴の一つはその**自発性**，つまり法則に縛られずに振る舞う能力である
- しかし習慣化の原理によって，ある環境条件に対してある応答が結び付けられるようになると，それ以後，同様の環境条件に対して同様の応答をほとんど機械的（一意的）に選択するようになる場合がある．こうしたプロセスを経て，精神は徐々に自発性を失っていく
- 自発性をほとんど完全に失い，どんな条件に対しても機械的に振る舞うようになった精神を「物質」と呼び，またそのような精神を支配する習慣を「**物理法則**」と呼ぶ

原初のカオスから精神の「結晶化」へ

- 習慣化の原理は明らかに法則だが、それはどこから来るのか？
- 1880 年代～90 年代初めの宇宙論では、習慣化の原理は原初のカオスから生まれる
- ほんの僅かな萌芽であれ、習慣化の傾向性がひとたび原初のカオスから偶然に生じると、それ自身が習慣なので自己強化していく
- 宇宙は純粹な自発性である原初のカオスに始まり、習慣化の原理によって精神の自発性が徐々に失われていき、無限に遠い未来において精神は完全に「結晶化」(crystallise) する (EP1: 297)

原初のカオスから精神の「結晶化」へ

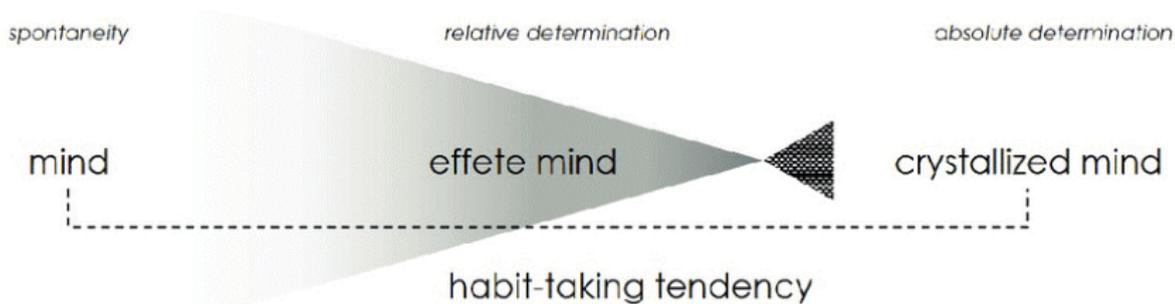


Figure: Peirce の 1880 年代～90 年代初頭の宇宙論の図式化 (Image Source: Feodorov 2018)

カテゴリー論

- Peirce の生涯を通して、彼の哲学全体の中核を成すのが「カテゴリー論」である
- 当初、Peirce にとって「カテゴリー」は、私たちの思考を構成する最も基本的な要素であった。しかし 1880 年代半ば以降、カテゴリーは思考の基本的要素にとどまらず、宇宙そのものの最も根源的な原理に拡張される → **カテゴリーの存在論的転回**
- 第一性 (Firstness) : 質, 情感, 偶然, 潜在性, 可能性
- 第二性 (Secondness) : 作用・反作用, 反発, 抵抗, 現実性
- 第三性 (Thirdness) : 法則, 連続性, 媒介, 代表 (representation), 習慣化, 必然性

「推論と事物の論理」(1898) の宇宙論

- 1880年代～90年代初めの宇宙論では、第三性（習慣化の原理）が第一性（偶然）から生じるとされていた。しかし、これは Peirce のカテゴリー論と相容れない
- 三つのカテゴリーの間には論理的な依存関係があり、第一性は第二性と第三性なしにはあり得ない。他方で、第三性から第一性と第二性が生じることは可能
- 1898年「推論と事物の論理」の宇宙論では、宇宙の始まりにあったのは偶然（第一性）ではなく、「質の連続体」（第三性）であったとされる
- 無法則の状態からの法則の出現を説明する当初の宇宙論のプロジェクトを放棄？

「推論と事物の論理」(1898)の宇宙論

- 「現実存在の宇宙は、その恣意的な第二性を含め、アイデアの世界、プラトンの世界的世界の分枝ないし恣意的な限定であると想定しなければならない」(RLT 258, 1898)
- 「進化の過程は、単に現実存在の宇宙が進化する過程ではなく、プラトンの形相そのものがこれまで発展し、現在も発展している過程である〔…〕存在は進化の一段階である」(Ibid)
- 「我々が現在経験する色、匂い、音、あらゆる種類の感覚、愛、悲しみ、驚きは、すべて太古の昔に滅びた諸々の質の連続体の残骸であると考えざるを得ない。ちょうど廃墟のそこかしこに遺された円柱が、かつてはそこに広場があり、バシリカ聖堂や寺院が壮麗なアンサンブルを成していたことを証言するように」(RLT 258-59, 1898)

Peirce の進化的宇宙論：まとめ

- 1880年代～90年代初頭の宇宙論は、宇宙の始まりに無法則的な「カオス」を仮定し、そこからどのように自然法則が進化したかを説明しようとするプロジェクトだった
- 1898年「推論と事物の論理」では、宇宙の始まりに「カオス」(第一性)ではなく「質の連続体」(第三性)を仮定 → 無法則の状態からの法則の出現を説明しようとする当初のプロジェクトを放棄？
- Short (2010) の見解：Peirce の宇宙論のプロジェクトは失敗し、彼自身も最終的に放棄した → 私は懐疑的
- Peirce の進化的宇宙論は、きわめて思弁的な仮説群に留まり、体系的な「理論」とは言い難いのは間違いない

Smolin の時間的自然主義

- Smolin は、Peirce と同様、「なぜ自然法則が現に持っているような形をしているのか」という問いに答えることを目指す
- 従来 of 物理学は、「初期状態」を不変の法則に入力することで、結果の状態が出力されるというパラダイムの中で行われてきた。このパラダイムは、宇宙の部分系に対してはうまく行くが、一つしかない宇宙全体を対象とする宇宙論ではうまくいかない
- Smolin は代わりに、「法則の作用を受ける物理状態」と「作用する法則」の区別をなくし、統一的に扱う枠組みを提案
- 「物理法則」は、宇宙の構成要素のうち、変化速度が相対的に遅い部分であり、「物理状態」は変化速度が相対的に速い部分である

Peirce の偶然主義と現代物理学：量子論

- Peirce が執筆していた 19 世紀末～20 世紀初頭は、決定論（必然主義）が支配的だったが、20 世紀中葉以降、決定論を支持する科学者は少なくなってきた。この転換をもたらしたのは、量子論の発見である
- 量子論には様々な解釈があり、中には決定論的な解釈もある（Everett の多世界解釈など）が、標準的な解釈では、量子論は非決定論的である
- 物理量を測定する際、可能な値のうちどれが実際に観測されるかは確率的にしか決まらない

Peirce の偶然主義と現代物理学：量子論

- また Kochen-Specker の定理により、量子論では、すべての物理量が測定によらず確定した値を持つことができない → 「必然主義の立場の本質は、連続量は何らかの厳密な値を持っているという考えにある」 (EP1: 303, 1892)
- Peirce の偶然主義が現代物理学によって裏付けられた？
- 反論：Peirce の偶然主義は、物理法則から逸脱する出来事が存在するという立場だが、量子論の法則はそれ自体が統計的で、そこから逸脱する現象が存在するわけではない
- 再反論：Peirce にとって法則から逸脱する出来事は、全くランダムというわけではなく、量子論と同様、統計的な規則性を持つ → 「ある程度規則的な自発性」 (EP1: 310, 1891)

Peirce の偶然主義と現代物理学：カオス

- 量子論のほかにもう一つ、20 世紀に発見された科学理論で Peirce の偶然主義にかかわるのが、**カオス理論**である
- 1963 年、数学者・気象学者の Edward Lorenz が、コンピュータ・シミュレーション上で偶然、カオス的な振る舞いをする力学系を発見
- **カオス**とは：初期条件に対する鋭敏性を示す決定論的な系における、非周期的な長期的振る舞い (Strogatz 2015: 331)
- **初期条件に対する鋭敏性**：初期状態の微小な変化が、その後の系の振る舞いに大きな影響を及ぼす現象
- 「不安定な平衡点の近傍では、非常に微細な原因が、驚くほど大きな結果を生み出す場合がある」 (EP1: 348, 1892)

カオスの例：Lorenz 系

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - \beta z \end{cases}$$

$$(\sigma, \rho, \beta > 0)$$

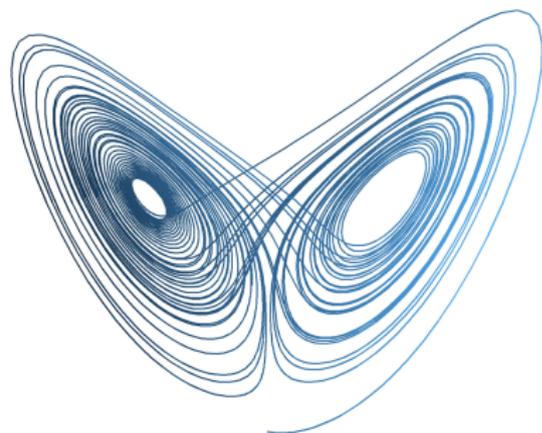


Figure: Lorenz アトラクター

初期条件に対する鋭敏性

- カオス系は**決定論的**：初期状態を決めればその後の系の状態はすべて一意的に決まる
- しかし，初期条件に対する鋭敏性のため，カオス系の長期的な振る舞いの予測は不可能
- 初期状態の微小な摂動は，時間に対して指数関数的に増大する．初期状態において近くにある2つの軌道が， δ_0 だけ離れているとすると，時間 t 後の2つの軌道の隔たり $\delta(t)$ は

$$\delta(t) \sim \delta_0 e^{\lambda t}$$

のように増幅する (λ は **Liapunov 指数**)

無限情報の前提

- 初期状態をどれだけ正確に指定しても、有限の精度で指定する限り、カオス系の振る舞いの予測はいずれ破綻する → 「無限」の精度で指定すれば完全に予測可能？
- Peirce：「必然主義の立場の本質は、連続量は何らかの厳密な値を持っているという考えにある」(EP1: 303, 1892)
- 言い換えると必然主義は、無限の情報が可能であることを前提としている
- 物理では、この無限情報の想定は、物理量の値を実数で表す習慣に反映されていると言える
- この前提を放棄すればどうなる？

Gisin の「有限情報」の物理学

- 物理学者の Nicolas Gisin は、実数を使う代わりに「有限の情報」しか持たない数を使う、オルタナティブな古典力学の体系を提唱 (Gisin 2021a)
- この古典力学では、方程式が決定論的であるにもかかわらず、初期状態を指定できる精度に限界があるため、カオス系が真に非決定論的になる → 自然における「偶然」をモデル化
- さらに Gisin は、こうした「有限の情報」しか持たない数を扱うための枠組みとして、直観主義数学を使って物理学を再定式化することを提唱している (Gisin 2021b)

まとめ

- Peirce は、ほとんどの科学者や哲学者が必然主義を信奉していた時代に、自然には「絶対的偶然」が存在すると提唱した
- Peirce の偶然主義は、量子論やカオス理論といった 20 世紀の科学によって強力な裏付けを得たと言える
- 同時に、Peirce の偶然主義は、こうした現代科学の理論を解釈するための哲学的枠組みを提供してくれる
- Peirce の進化的宇宙論は、きわめて思弁的な仮説群に留まり、体系的な「理論」とは言い難いが、自然法則の形式や起源について思索しようとする者にとって示唆的であり続ける (e.g. Smolin の時間的自然主義)

最後に：自然の戯れ

- Peirce による神の实在性の論証 (EP2, Sel. 29, 1908) において重要な役割を果たす概念に、「**戯れ**」 (musement) というものがある
- これは、Friedrich Schiller の書簡集『人間の美的教育について』 (1795) に登場する「**遊戯衝動**」 (Spieltrieb) の概念に由来する (Schiller のこの著作は、Peirce が学生時代に初めて読んだ哲学書であった)
- 戯れは、人間における第一性の最も純粋な顕現の一つと言える
- だが人間も自然の一部である以上、自然そのものが「戯れている」と考えるべきではないだろうか

References I

-  Feodorov, Aleksandar. 2018. “Peirce’s Garden of Forking Metaphors.” *Sign Systems Studies* 46 (2/3): 188–215.
-  Gisin, Nicolas. 2021a. “Indeterminism in Physics, Classical Chaos and Bohmian Mechanics: Are Real Numbers Really Real?” *Erkenntnis* 86: 1469–81.
-  Gisin, Nicolas. 2021b. “Indeterminism in Physics and Intuitionistic Mathematics.” *Synthese* 199: 13345–71.
-  Peirce, Charles S. 1992–1998. *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings* (2 Vols.). Indiana University Press. [略記 : EP]
-  Peirce, Charles S. 1993. *Reasoning and the Logic of Things: The Cambridge Conferences Lectures of 1898*, ed. Kenneth Laine Ketner. Harvard University Press. [略記 : RLT]

References II

-  Short, T. L. 2010. "Did Peirce Have a Cosmology?" *Transactions of the Charles S. Peirce Society* 46 (4): 521–43.
-  Smolin, Lee. 2013. "Temporal Naturalism." arXiv:1310.8539
-  Smolin, Lee & Roberto Mangabeira Unger. 2014. *The Singular Universe and the Reality of Time: A Proposal in Natural Philosophy*. Cambridge University Press.
-  Strogatz, Steven H. 2015. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd Edition. Westview Press.