進化論と倫理学の関係

生物学と倫理の間にどのような関係を見つけることができるのか。倫理に対して進化論はどのようなことが言えるのか。スペンサー（Herbert Spencer, 1820-1903）は生物進化、社会進化、そして道徳の進化は宇宙的な進化という単一過程の一部と考える。だが、ムーアは進化的な倫理を自然主義的な誤謬とした。イギリスの道徳哲学は人間の動機の整合的な像を自分への要求や動機と他人へのそれらの間でのバランスによって生みだそうという試みであった。なぜ人間は道徳的か？なぜ道徳的でなければならないか？これらの問いに対する解答は以下のようなものだった。

（１）人間は他人のために行為するのではなく、そのように見えるのは実は自分のためである。
（２）利己的である方が利他的であるより強いが、大半は一致する。要するに、人間は利己的だが道徳的である。

シャフツベリー（Shaftesbury, 1671-1713）は次のような推論をしている。

１誰も自分自身を傷つけたくない、あるいは他人と仲違いしたくない。
２他人を傷つければ、それは自分を傷つけることである。
３他人を助けることは自分に役に立つ。
４それゆえ、利他と利己は一致する。

19 世紀に入って登場するのがダーウィンの倫理思想である。進化論の創始者であるダーウィンは、人間の本性も進化の結果であることから、次のような考えをもった。

1. 道徳の基礎は社会的本能にある。
2. 心と知能の進化は社会的本能の進化へと導かれる。
3. 言語の発達は常識、相互の了解に基礎を置く公共的な評価の発達を促す。
4. 習慣の形成に助けられて道徳は進化する。

このような歴史的経緯をもとに、現代の倫理と生物学の関係を以下に考えてみよう。社会生物学者は倫理について二つの異なるクラスの問題を提起した。一つは、私たちがなぜ倫理的な言明を信じるかである。すべての人間文化において成立する倫理的な信念があれば、進化はそれらの信念がなぜ普遍的かを説明する助けになるだろう。そして、文化毎に異なる価値もまた社会生物学者によって取り上げられた。

［利己性と利他性の生物学］

利他的な行動こそが人間に特徴的な行動であると多くの人は考える。動物の本性が利己的であるという考えは人間性の特別な価値を際立たせる効果を持っていた。進化論は適者生存に基づく理論であり、利己的な行動をとる個体がそうでない個体より一層多くの子孫を残すことが自然の掟であると理解されてきた。そのため、進化論は利己的な個体こそが生存に有利であると考える理論だと受け取られた。利他的な行動のもつ人間に特有な倫理性は規範的なものであって、事実的な進化論はそのことを扱うことができない。実際、この判断は生物的な原理から倫理性が得られないことを適者生存が図らずも物語っている、証明してくれているという結論を誘導する。そして、事実と当為の問題はこれで一件落着ということになる。というのも、人間は適者生存に倫理性を加えた次元で生活しているのであり、したがって、進化論では説明し切れない人間の尊厳が存在すると結論することによって、進化論は倫理的な考察の範囲外にあることの説明に成功したと考えることができるからである。

多くの伝統的な倫理的行動に関する議論では、利己性は人間の生物としての本性とみなされ、利他性は人間の生物的でない本性という立場がとられてきた。このアンバランスが存在と当為、「である」と「べきである」の区別を最初から想定するというお馴染みの結果を生み出すもとになってきた。さらに、行動という観点に立つと、私たちの行動の多くは利己的とも利他的とも分類できない。それは単に私たちが自分の行動について利己的か利他的か意識していないというのではない。真理や美の追求という動機はそれだけでは利己的とも利他的とも言うことができない。そして、それらは人間の非生物的な本性に分類される場合が圧倒的に多かった。真理の追求が生物的な本性であると考える者はまずいない。しかし、不明確、あるいは理解できない動機はしばしば心の病として生物的な本性に由来すると分類されてきた。価値の高いものが非生物的な本性、価値の低いものが生物的な本性という見方が先にない限り、これは理解できない分類である。何ともアンバランスな人間についての見方としか言いようがない。このアンバランスが取り除かれるならば、倫理的な行動に関する議論は伝統的な枠組みから開放されることになるだろう。このような意味で利他的な行動の存在についての生物学的な可能性は重要な役割をもっている。利他的な行動も、利己的な行動と同じように人間の生物的な本性である、という基盤が得られるからである。

［進化論的な利他的行動とはどのようなものか］

進化論の説明の仕方を思い出そう。自然選択は変異の存在を前提にしている。変異があるところに選択が働き、集団全体の遺伝的な分布が変化する。変異は説明されるのではなく、説明する項目である。利他的な行動についても同じで、利他的あるいは利己的な行動が既に存在し、それらがどのように集団の中に保持されていくか(あるいは、消滅していくか)を選択のメカニズムから考えようとするのが進化論である。利他主義そのものがどのように生じたか、生じるかというのではなく、それがどのように進化するかが主題である。それでは利他性や利己性が事前に想定されているという反論がすぐに考えられる。適応的な説明はこの反論に一部答えてくれる。しかし、いつでも説明のもとになる変異の存在が保証されているわけではない。また、私は人間の行動が規範性をもつことと、それが歴史的に進化することとは立派に両立できると考えている。

私たちが日常生活の場面で遭遇する利己性や利他性は心理学的なものであり、進化論の対象ではない。私たちの経験する範囲内での利他性、利己性は、進化論によって考えられてきた利他性、利己性ではない。進化論の対象は集団の進化であり、利他性や利己性も集団的な特徴として理解されてきた。それに対して、心理学的な利他性や利己性は個人の行動についての性質である。したがって、進化論的な利他性、利己性と心理学的な利他性、利己性を同一視することはできない。

100 人ずつの二つの群があり、そこには利己的な行動をする個体と利他的な行動をする個体が存在している。利己的な個体が集団内に 1 しかない場合、適応度 4 をもつとする。その場合、残りの 99 は利他的な個体である。この集団に利己的な個体が増えるに連れ、その適応度は次第に減少していく。なぜなら、一人なら集団内でわがままに行動できたのが、同じ行動をする利己的な個体が増えるにしたがって、そのわがままは制限されていくからである。一方、利他的な個体の適応度は利己的な個体が増えるに連れ、やはり次第に減少する。また、この集団全体の平均適応度は利己的な個体が増えるに連れ、集団の統一が次第になくなっていくということから減少していく。これはまた、進化はいつも集団の平均適応度を高めるように働くのではないという恰好の例である。このような仮定の下で、群の集まりが存在するならば、利他的な行動のほうが利己的な行動よりは適応度が高くなる場合があり、したがって、利他性が集団内に保持され、選択的に有利であることが可能であることになる。これが利他性の存在についての基本的な考え方である。これを表にしてみると以下のようになる。

グループ１	グループ２	総計
1*S*; *W* = 4	99*S*; W = 2	100*S*; *W* = 2.02
99*A*; w = 3	1*A*; w = 1	100*A*; *w* = 2.98

このような結果を別の仕方でまとめてみると、次のようになる。もし、どのような部分集団においても、利己主義は利他主義よりも適応度が高く、適応度の高くない性質はその頻度が低下する、と仮定してみる。ここから、利他主義はその頻度が低下する、と結論することはできない。上の表の総計の数値（*W* = 2.02, *w* = 2.98）がこの推論の結論の反例になっているからである （Simpson’s paradox）。どのような部分集団においても頻度が低下する利他主義者は、全体ではその頻度が高くなることがあり得る。

血縁集団は最初から所属のグループが決定している。生得的に所属が決まっているという点で、グループ固定型といってもよい。個体の適応度の代わりに血縁集団の包括的な適応度を使って、血縁集団に関する利他主義の存在を論証したのはハミルトン（William Hamilton）であった。一方、群選択のほうはウイリアムズ（George C. Williams）の還元主義的傾向の強い遺伝子選択説 (genetic selectionism) の考えによって否定され、ずっと無視されてきた。群選択は血縁選択の場合と異なり、遺伝子の類似性に依存しない。生物学者の中には、血縁選択を群選択の一つと考える者も、（子育てと結びついていることから）個体の適応であると考える者もいる。利他主義の進化を握る鍵は集団の構造にある。以下の論証は、群選択、血縁選択のどれにも適用できる。

［心理的な利己主義と利他主義］

進化と心理の異なる利己性、利他性は、そのような形質を担う遺伝子を想定することで一本のシナリオに纏め上げることができる。ここでドレツキの言う引き金原因と構造化原因の区別を使えば、どうなるだろうか。遺伝子は個体の行動の引き金原因になれるか。環境(あるいは刺激)と遺伝子の共同作業が行動の原因であるとすれば、遺伝子は引き起こされる行動の引き金原因の一部として働いている。そして、その同じ遺伝子はそれをもつ個体がどの程度生存し、子孫を残せるかという適応度を担うものとして、進化の場面でも働いている。これは引き金原因と構造化原因が遺伝子を介して一部重なり合っていることを示している。これは比喩的に近くの原因と遠くの原因と言い換えてもよい。そのどちらにも利己的、あるいは利他的遺伝子が顔を出すことになる。

ある計算結果が正しいかどうかは、それを習得した学校教育のせいにする場合よりは、数そのもののしくみを使う場合が多い。しかし、それは学校教育による説明がいつも誤りということを意味してはいない。場合によっては学校教育のせいにする方が正しい場合もある。2＋3＝5 の正当化の文脈と 2＋3＝5 の説明の文脈は異なる。近くの原因、遠くの原因はこの説明の文脈が二つ以上あることを示している。求められているのはこの説明の文脈における進化と個人の役割の解明である。進化は遠くの原因、心理は近くの原因である。遠くの原因の存在は近くの原因を無視してよいということにはな

らず、逆に近くの原因は遠くの原因を忘れてはならない。因果的な責任は両方にある。(因果的な責任を一部に含む倫理的な責任に関しても同じように主張できる)。正当化は知識内容の正当化であって、その知識の対象に関する正当化ではない。対象に関する正当化は説明の適切さである。知識の対象としての進化的、心理的な利己性、利他性は上の二つの説明文脈を注意深く見分けることによって、統一的に扱うことが期待できる。しかし、同時にこれは次のような厄介な問題を含んでいる。

「氏か育ちか」を考えてみよう。氏は遠くの原因であって、その人の正当化の理由ではない。育ちは近くの原因である。実際その人となりは遠くの原因と近くの原因の混合である。では、この混合は二つの原因に分解できるか。力学の変化はその原因を局所的に分解できるが、変異の原因は分解できない。したがって、ある人をその氏と育ちに分解することはできない。これは「氏か育ちか」という問いそのものが無意味なことを意味している。実際の人為選択の問題は自然と人為の混合である。したがって、そこに自然と人為の区別ができなくなることを不可避的に想定しなければならない。心理的な利己性、利他性と進化的なそれらの間での区分ができないことは、人為選択に対して基本的な事柄である。このことをまとめると次のようになる。

（１）進化的、心理的な利己性、利他性は概念的には独立している。
（２）人為選択の際の利己性、利他性は心理的な性質である。
（３）その性質が自然、人為の選択の過程を通じて進化的な利己性、利他性に影響する。
（４）その結果、進化的、心理的な利己性と利他性は実際には互いに区別できなくなる。

確率：その歴史と概念

既に第 3 章、「3 帰納的な推論－仮説の正当化」において、ヒュームの議論に関連してベイズ主義について述べ、信念の度合いとしての確率の主観的解釈を説明した。確率・統計の実際の利用は量子力学、進化論でも随所に見られた。また、20 世紀の知識論が確率･統計的な知識を多く含み､それを考慮しなければ成立しないことも述べた｡このようなことを考えれば､確率・統計についての独立した章が必要なのは自明のことかもしれない。そこで十分に述べることはできないが、確率・統計について、その歴史、統計力学での確率概念、確率とそれが適用される背景の例に分けて概略だけをまとめてみよう。

17 世紀中葉、賭けに関する好奇心からパスカル（Blaise Pascal, 1623-1662）とフェルマー（Pierre de Fermat, 1601-1665）は確率に関する数学を考え始め、二人の書簡のやり取りを通じて確率論の基本原理が初めて明らかにされた。ホイヘンス（Christian Huygens, 1629-1695）はこのやり取りを整理し、確率に関する最初の本（*De Ratiociniis in Ludo Aleae*、1657）を出版した｡確率論は次第に普及し､18 世紀にはベルヌーイ（Jakob Bernoulli, 1654-1705）やド･モアブル（Abraham de Moivre, 1667-1754）が研究をさらに進展させた。1812 年ラプラースは新しい考えと数学的な手法を導入し、それまで偶然的なゲームの分析だけに使われてきた確率論を科学的な問題にも適用した。確率論の応用として誤差論、そして統計力学が 19 世紀に研究された。20 世紀に入ると量子力学、集団遺伝学での利用も始まり、現在では社会科学を含めたあらゆる領域に及んでいる。

確率の数学的理論をつくり上げる際の問題は数学的な使用に対して十分なほど正確で、かつ適用範囲が広い確率の定義を与えなければならないことだった。このような条件を満たす定義を手に入れるのにほとんど 300 年を費やしたが、20 世紀に入り、確率の公理を与えることによってその形式的な定義が得られた。1933 年ロシアの数学者コルモゴロフ（Andrei Kolmogorov, 1903-1987）は確率の測度としての公理を与えることによって、確率論の概略を示した。（*Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*）現在では確率論はより一般的な測度論（measure theory）の一部となっている。その基本的な内容を確認してから確率の基礎に関する歴史に話を移そう。

確率は不確かさを量的に表現する数学的言語であると言われる。確率を使った統計的推論は観察できるものから観察できないものへの推論であり、予測、分類、評価等に広く使われている。確率空間あるいはサンプル空間 S は実験や試行における可能な結果の集合である。 $s \in S$ は基本的な結果を表し、出来事は S の部分集合として表現される。

（例）コインを二回投げると、その確率空間は S ＝｛HH, HT, TH, TT｝（H：表、T：裏）で、最初のコインが表という出来事は A＝｛HH, HT｝であり、二回目が表という出来事は｛HH, TH｝である。

（問）このコイン投げを三回投げたらどのような確率空間ができるか｡また､無限回続けたら､どのような確率空間ができるか。

集合に関する基本的な演算には次のようなものがあった。A の補集合は $A^c = \{s \in S; s \notin S\}$ 、A と B の和は $A \cup B = \{s \in S; s \in A \text{ or } s \in B\}$、$A$ と B の積は $A \cap B = \{s \in S; s \in A \text{ and } s \in B\}$ である。$A_1, A_2, \ldots$は、 $Ai \cap Aj = 0\,(i \neq j)$ のとき互いに疎である。$A_1, A_2, \ldots$が互いに疎で、$\bigcup_{i=1}^{\infty} Ai = S$ のとき、S の分割である。これらの関係を使って確率の公理を述べて

みよう。

（コルモゴロフの確率の公理）

出来事 A に実数値をもつ確率測度 $P(A)$を指定する。確率であるために P は次の公理を満たさなければならない。

（公理 1）どんな A に対しても、$P(A) \geq 0$。

（公理 2）$P(S) = 1$。

（公理 3）$A_1, A_2, ...$が互いに疎なら、$P(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i)$。

これらの公理から、確率とは何かという問いに対し、それは抽象空間の部分集合からなる σ-代数の上に定義された、正規化された可付番加法的な測度である、と答えることができる。だが、この解答は何かが欠けているという印象を与える。その理由は、公理が確率の意味を与えるというより、その尺度、物差しとしての条件を与えているからである。空間が有限なら解答は次のようになる。確率は 0 から 1 までのいずれかの実数で、二つの出来事が同時に起こらないなら、いずれか一つが起こる確率は二つの出来事のそれぞれが起こる確率の和である。これで確率の意味がわかったと思う人はいないだろう。確かに、道具・装置として確率を使うためには上の公理で十分かもしれないが、確率は何を意味しているかという問いには十分に答えられないだろう。（第 4 章で科学的知識は道具であるという道具主義に満足できなかった人が多くいるはずである。実際、上の確率の公理は抽象的な尺度という道具としての条件を述べたものである。）

初期の確率論は有限の場合だけを対象にしており、確率の計算規則は原理上単純だった。複雑な出来事は基本的な出来事からなり、その確率は基本的な出来事の確率の和である。複雑な出来事の確率を決めるには基本的な出来事の確率がわかっていなければならない。計算の仕方は基本的な出来事を対称的なものとして扱うことに基づいていた。つまり、m 個の基本的な出来事に同じ確率 $1/m$ を与えることである。ゲームの結果の対称性はそのゲームが公平であることを意味している。有限の古典的確率計算は「確率の古典的解釈」に基づいており、ある場合が他の場合より起こりやすいということがなければ、それらは同じように可能であると判断され、したがって、等確率である。（これは無差別原理と呼ばれている。）

古典理論が想定する、同じように可能な場合という絶対的な対称性は現実の世界にはない。公平でないゲームを扱うには古典的な確率では不十分である。1900 年頃からこの不十分さを扱うことができるように確率概念は拡張され、新しい理論は数学的な無限概念を使ってつくられた。実際に無限の出来事を扱う理論をつくったのはルベーグ（Henri Lebesgue, 1875-1941）だった。実数と実数値関数の集合の測度論的性質と自然数の系列の漸近的性質とは、実数をそのような系列と同じとみなすことを通じて結びつけられる。（小数を使った実数の表現を思い出してみよ。）だから、相対的頻度の極限の振る舞いについての確率の問題は実数の集合の測度に関する問題として表現できた。実数の特別な場合である有理数の直観的考えはポアンカレによって正確に与えられた。三体問題の研究で彼は確率 1 の結果を証明した。これは後にポアンカレの再帰定理と呼ばれることになる。定理で述べられた再帰運動への反例は可能だが、それは例外的である。同様の場合として、実数が有理数であることは例外的な「確率 0」である。だから、無限の可能な場合には確率 0 は不可能性を意味しないし、確率 1 は確実性を意味しない。

（問）確率 0 が不可能ではなく、確率 1 が確実でもない例を挙げ、なぜそのようなことが可能なのかを説明せよ。

確率と統計力学

1. ラプラス後の統計力学

1859 年マックスウエル（J. C. Maxwell、1831-1879）は 誤差論を「多くの数の粒子が多くの衝突をした後で、速度が一定範囲にある粒子の平均数」を見出すという問題に適用した。（“Illustrations of the Theory of Gases.” [1]）彼の結論は誤差の分布を表すのと同じ法則によって粒子の中の速度分布を表すことができるというものだった。

誤差論の議論は 100 年以上も前に始まったが、理論をつくり、その適用を示したのはラプラスだった。彼は確率論を一般的なものとし、観察の誤差論を力学を補正するものとして、その特別な場合と考えた。彼には力学は物体が運動する客観的な記述を与えるもので、誤差論は観察が誤差を含む場合でも有用な予測を与えるための実践的方法だった。この古典的見解に反して、マックスウェルの誤差論の応用は新しい性格をもっていた。彼の応用によって、確率は運動するシステムの性質を客観的に記述するという目的で、科学の一部となった。

[1] *Phil. Mag*. 4 (19) (1860). Reprinted in *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, ed., W. D. Niven, Dover, 1963. p.380.

マックスウェルはハーシェル（John Herschel, 1792-1871）がケトレー（Lambert A. J. Quetelet, 1796-1874）の理論を紹介した論文を読み、確率を自分の研究に使った。[2] ケトレーの紹介で興味深かったのは、誤差が偶然的な要素を含む過程の結果と見ることができる点だった。

マックスウェルは粒子の平均速度が $2\alpha/\sqrt{p}$ で、平均平方測度が $3\alpha^2/2$ だと結論した。だが、彼はこの導出に満足しなかった。導出では v_x の知識が v_y と v_z の確率に影響を与えないという仮定が使われていた。だから、1886 年の二番目の論文（“The Dynamic Theory of Gases”）で彼は速度分布の二番目の導出を試みた。

マックスウェルは次の二つの仮定から平衡分布を導出しようとした。

1. 衝突する分子の速度は相関していない。それゆえ、$P(v_1, v_2)$ が衝突する分子の対がそれぞれ速度 v_1 と v_2 をもつなら、$P(v_1, v_2) = P(v_1)P(v_2)$である。ここで $P(v_1), P(v_2)$はそれぞれの速度をもつ分子をランダムに選ぶ確率である。
2. 衝突前の分子の対のそれぞれの速度をv_1, v_2 とし、衝突後の速度をv'_1, v'_2 としてみよう。マックスウェルの二番目の仮定は、衝突する対は速度の変化$v_1, v_2 \rightarrow v'_1, v'_2$ を起こす確率が速度変化$v'_1, v'_2 \rightarrow v_1, v_2$の確率と同じであるというものだった。つまり、逆向きの運動が元の運動と同じ確率で起こる。[3]

これらの仮定から彼は次の式を導出した。

$$P(v_1) = (N/\alpha^3 p^{3/2})e^{-(v_2/\alpha^2)}$$

マックスウェルの二つの仮定はどのようなものなのか。仮定の背後には位置と速度はランダムにすることができるという考えがある。さらに、分子はランダムなままでいることが仮定されている。だが、謎が残る。これらの仮定がなぜ正しいのか。

気体運動論の次の展開はボルツマンの 1868 年の論文である。[4] ボルツマンの導出はマックスウェルの仮定と同じ仮定からスタートする。彼は後に自分で分子混沌の仮定（*Stosszahlansatz*またはmolecular chaosの仮定）と呼んだものの問題を自覚するようになった。彼は生涯この仮定の純粋に力学的な正当化を見つけようと努力した。

1868 年の同じ論文で、ボルツマンは気体分子が一定量のエネルギーをもつと仮定して平衡速度分布を導出し、異なる分子間でこの量を分割する場合の数を表そうとした。衝突の本性に関する古い仮定はもはや必要なかった。すべての異なる可能性は同じように確からしいという純粋に確率的な仮定によって置き換えられた。この仮定はエネルギーの最も確からしい分布がマックスウェルーボルツマン分布に対応しているという数学的証明に十分だった。

この組み合わせ的な導出の後でさえ、ボルツマンは原子論的モデルをもつ気体の運動論のより力学的な表現を追求し続ける。彼は分子を基にしたモデルを擁護した。このことでボルツマンは物理学者のグループから批判された。あるグループは、科学は特定の思弁的仮定や虚構に頼るべきではないと信じていた。別のグループは彼の不可逆性の導出を批判した。（Loschmidt, Zermelo, and Poincaré）

ギブス（Josiah Gibbs, 1839-1903）は、私たちが多くの自由度をもったシステムの粒子の位置と運動量に依存する変数の値を計算するとき、そのシステムがもつことが確からしいような値の区間$[A - a, A + a]$ がある、ということを思い出させる。たいていの場合、最も確からしい値は平均値である。彼はこの点がもつ抽象的な特徴を強調して、それが誤差論の結果だと考えた。彼は誤差論を使ってさまざまな力学的パラメータの値の計算を簡単にした。単純化の過程は次の証明からなっていた。実際には変数は無限に多くの値をもつが、私たちはそれらが平均値に等しいかのように振舞うことができる。より詳細な記述のために、ギブスは「アンサンブル」という概念を定義した。（ボルツマンが導入した概念は「エルゴード（Ergode）」と呼ばれる。）アンサンブルとはパラメータが想定する特定の値が互いに異なる同種のシステムの集合である。さまざまな区間内にあるパラメータをもつアンサンブルに属するシステムの相対的な比率は密度関数を決定する。正

---

[2]確率・統計革命(1820-1900)は 1820 年代に始まる社会についての数量的研究に端を発している。確率が含まれる統計的な理論を正当化する通常の数学的手法は大数の法則であるが、これは既に 19 世紀には知られていた法則である。統計集団の安定性、つまり、平均値の安定性はケトレーが 1820 年に宣言した社会物理学という科学の基礎であった。その中心となる概念は「平均的人間（*l'homme moyen*）」であった。平均的人間は社会物理学の道具として考えられ、天体力学の法則と同じように、社会における法則の認識を助けるよう考えられた。マックスウェルやボルツマンは物理学にも統計的な法則という考えが使えると信じ、気体法則の統計的な解釈を試みた。(*The Empire of Chance*, Gigerenzer and others, Cambridge, 1989.)

[3] See Maxwell’s “On the Dynamic Theory of Gases,” *Phil. Trans*. 157(49) (1867).

[4] “Studien ueber das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten,” *Sitzungberiche, K Akademie der Wissenschaften, Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse* 58(1868), pp. 517-560.

規化された密度関数は確率関数である。ランダムに選ばれたシステムが与えられたパラメータに対してある区間内にある特定の値をもつという出来事に数的な確率を指定する。マックスウェルは一定数の粒子と一定のエネルギーをもったシステムの速度分布を計算した。ボルツマンは同じタイプの分布が力が働く場合に得られることを証明した。ギブスは二つの仮定をさらに考えた。それらは次のものである。

(1) どんな実在するシステムも完全には孤立していないので、それが完全に固定したエネルギーをもつと考えることはできない。
(2) 多くの文脈では粒子の数は固定しているという仮定は制約を受ける。彼の目標はこれらの条件がある場合でも平衡分布を得ることだった。彼の最初のステップはエネルギーが変化するシステムのアンサンブルを考えることだった。システムがエネルギー準位 E をもつ確率は e^{-bE} に比例すると考えられた。（ここで $b = 1/kT$ である。）そのようなアンサンブルは *canonical ensemble* と呼ばれた。

彼は、粒子の数が無限になると、この分布はマックスウェルーボルツマン分布と一致することを証明した。（彼はこの分布に対し *microcanonical distribution* という用語を使っている。）そして、彼は粒子の数が変わるようなシステムのアンサンブルを考えた。N 個の粒子をもつシステムの数は e^{-mN} に比例すると仮定された。（m は化学的ポテンシャルである。）そのようなアンサンブルは *grand canonical ensembles* として知られている。再び、この分布はマイクロキャノニカル分布に一致する。

ギブスの結果を厳密に証明しようとすれば、中心極限定理が必要となる。この定理を使ってキンチンは粒子間のエネルギーの初期分布の細部は説明される必要がないことを証明した。

ラプラスの確率に関する見解は彼の決定論に基づいている。ある時刻の世界の状態が他の時点の状態を決定するという見解は確率過程や客観的な統計的概念の余地を一切認めない。多くの研究者は彼の結論からスタートする。つまり、彼らは確率が無知からくる主観的態度であり、客観的な意味はないと考える。そのような立場の代表がジェーンズ（Edwin T. Jaynes, 1922-1998）で、論文「情報理論と統計力学（“Information Theory and Statistical Mechanics.”[5]）」で統計力学の主観的見解を展開した。彼は統計力学の予測能力がその力学の決定論的性格から独立であることを示そうとした。確かに、Tolman（1881-1948）はジェーンズより前にエルゴード的方法と自分の方法の間に大きな違いがあることに気づいていた。Ter Haar は統計力学が正しい予測のための装置と見なされるべきであると主張した。だが、最初にTolmanが統計力学に導入した先験的確率を主観的確率と見なしたのはJaynesである。彼は又、ter Haar が統計的推論として記述したものを一般的な予測過程と呼んだ最初の人である。[6]

ギブスの実用主義的な統計力学の研究に代わる二つの方法がある。それらはエルゴード的方法と予測的方法である。前者は統計力学の謎に力学的な説明を与えようという伝統的な方法であり、後者は改訂主義的方法で、一般的な力学的考察にのみ頼る説明を与えようというものである。予測的方法の主要な考えは大きな数の自由度が平衡現象に関連しているというものである。数の変化が新しい物理的考察をもたらすようには見えないため、自由度だけが異なる類似のシステムが物理学によって区別されなければならないというのは奇妙である。だから、多くの物理学者は予測的方法をより広い方法論的な視野の中で示す必要を感じた。Jaynes は彼の一般的な方法論として主観主義を選んだ。彼は一般的に予測の問題だけに関心をもった。それゆえ、確率が主観的な条件つき確率として解釈されるとき、システムの振舞いに関する客観的な力学的問いからシステムについて人が予測できるものに関する問題に変化することが明白な動機をもつことができる。この変化は科学的概念を認識的な用語で把握し直す主観主義的傾向の一例と見ることができる。主観主義的枠組が導入されると、予測的方法は大きな数の自由度が予測の能力に影響するためにより自然に見える。

Jaynesによれば、決定論的仮定は予測という目的には何の本質的役割も演じない。このような消去的なプログラムはド・フィネッティによって明瞭に主張された。彼は決定論に関する問題は予測に関する問題と分離されるべきだと考えていた。[7]

---

[5] See E. T. Jaynes, *Papers on Probability, Statistics and Statistical Physics*, ed., R. D. Rosenkrantz, Reidel, pp.4-39.

[6] See R. C. Tolman, *The Principle of Statistical Mechanics*, Clarendon, 1938. See also ter Haar, “Foundation of Statistical Mechanics,” *Rev. Mod. Phys.* 27 (3) (1955)

[7] de Finetti, “Probabilism,” *Erkenntnis* 31 (1989), pp. 169-223. さらに、最後に述べておきたいのは、エーレンフェスト（P. and T. Ehrenfest）による統計力学に関する概念的な反省と問題点の指摘である。1912 年に書かれた論文で、それまでの統計力学のまとめをし、より洗練された取り扱いを考察した。最後にギブスの統計力学を批判的に取り上げ、より数学的な基礎を追求している。彼らが重要と考えた問

ヴァールント効果（Wahlund effect）

集団を分割すると、分割された部分集団の間に不可避的にある遺伝的な変化が起こる。ここで遺伝的な変化とは、部分集団の間で異なる対立遺伝子頻度が得られることを意味している。集団の部分構造から出てくる重要な帰結は、任意交配のもとで期待されるものに対してヘテロの遺伝子型の平均比率が減少することである。同じことだが、集団が分割された部分集団ではもとの集団より高い比率のホモ接合が存在する。これがヴァールント効果である。

実際、種は多くの異なる集団からなっている。階層的な集団構造という概念はさまざまなレベルにある部分群の間の遺伝的差異を量的に示すためにライトが研究したものである。集団の部分構造が交配に及ぼす効果を量的に示すために、彼は固定指標（fixation index）と呼ばれるものを定義した。この指標は集団階層のあるレベルで任意交配で期待されるヘテロ接合の減少を表している。

ハーディーワインバーグの原理に対して集団の分割がもつ効果を調べるために、集団が集団 1 と集団 2 に分割され、下の表のような頻度だとしてみよう。

	A の頻度	*a* の頻度
集団 1	0.3	0.7
集団 2	0.7	0.3

遺伝子型	*AA*	*Aa*	*aa*	
頻度	$(0.3)^2 = 0.09$	$2(0.3)(0.7) = 0.42$	$(0.7)^2 = 0.49$	集団 1
	$(0.7)^2 = 0.49$	$2(0.7)(0.3) = 0.42$	$(0.3)^2 = 0.09$	集団 2
平均	$0.58/2 = 0.29$	$0.84/2 = 0.42$	$0.58/2 = 0.29$	

さて、二つの集団が一緒になると仮定してみよう。結合した集団での *A* と *a* の遺伝子頻度は$(0.3 + 0.7)/2 = 0.5$ で、ハーディーワインバーグの遺伝子型頻度は次のようになる。

	AA	*Aa*	*aa*
遺伝子型	0.25	0.5	0.25.

上の例をより一般化してみよう。二つの部分集団での対立遺伝子 *a* に対するヴァールント効果は次のようになる。集団 1 は遺伝子頻度 q_1 と遺伝子型頻度 q_1^2 を、集団 2 は遺伝子頻度 q_2 と遺伝子型頻度 q_2^2 をもつ。すると、次のような表が得られる。

遺伝子頻度	*AA*	*Aa*	*a*
集団 1	$(1- q_1)^2$	$2(1 - q_1)q_1$	q_1^2
集団 2	$(1- q_2)^2$	$2(1 - q_2)q_2$	q_2^2
平均 *Q*（分離）	$[(1 - q_1)^2 + (1 - q_2)^2]/2$	$[2(1 - q_1)q_1 + 2(1 - q_2)q_2]/2$	$[q_1^2 + q_2^2]/ 2$
平均 *Q*（融合）	$[[(1 - q_1) + (1 - q_2)]/2]^2$	$2[(q_1 + q_2)/2][(2 - q_1 - q_2)/2]$	$[(q_1 + q_2)/2]^2$

aa の平均頻度は次のものによって与えられる量だけ減少するだろう。

$$Q（分離）- Q（融合） = [q_1^2 + q_2^2]/ 2 - [(q_1 + q_2)/2]^2$$
$$= [q_1^2 + q_2^2]/ 2 - q^* \quad (q^* = (q_1 + q_2)/2)$$
$$= (q_1 - q^*)/2 + (q_2 - q^*)/2$$

いには次のものがある。

1. 相空間の同じ領域は同じ確率と見なされるべきだという原理の正当化が二番目の問題だった。（無差別原理の正当化）
2. 分子混沌の仮説：中でもこの仮説が背後の力学法則と矛盾しないかどうかの問題がより重要である。
3. 次の問題はポアンカレの再帰定理の諸結果に関係している。この定理によれば、無限の長さのもとでは力学的システムがその初期状態に任意に近いところまで戻ることはほとんどまったく確からしい。これは熱力学の第二法則に矛盾するように見える。

この他に 4 つ問題が挙げられており、いずれも現在でも追求されている。

$= \sigma^2_q$

（この値の変化はギブスのパラドクスにおけるエントロピーの増大に対応している。）

同様に、P（分離）– P（融合）$=\sigma^2_p$ $(p = 1 - q)$。実際、$\sigma^2_q = \sigma^2_p$ で、いずれかを σ^2 と書けば、集団の融合によるヴァールント効果によるホモ接合の減少全体は $2\sigma^2$ となる。

集団の部分構造の交配効果を量的に示すために、ライトは固定指標（fixation index）を定義した。この指標は集団階層の任意のレベルでの任意交配で期待されるヘテロ接合の減少である。この指標は遺伝的違いの有用な指標となる。部分集団 S の平均ヘテロ接合は H_S と表せる。H_S は $2pq$ で、p と q は対立遺伝子の推定頻度である。すると、F_{SR} は部分集団 S と R の固定指標で、

$$F_{SR} = (H_R - H_S)/H_R$$

となる。

次の関係を簡単に見出すことができる。$(1 - F_{SR})(1 - F_{RT}) = 1 - F_{ST}$ で、$F_{ST} =\sigma^2/(p^*q^*)$である。融合が起こるなら、遺伝子型の頻度変化もわかる。

AA: $p^{*2} + p^*q^*F_{ST}$

Aa: $2p^*q^* - 2p^*q^*F_{ST}$

aa: $q^{*2} + p^*q^*F_{ST}$

上の表現から、明らかに F_{ST} の値がハーディーワインバーグ均衡からのずれの程度を決める。$F_{ST} = 0$ なら、各表現の二番目の項は消え、遺伝子型の頻度はハーディーワインバーグ均衡に帰着する。$F_{ST} = 0$ は問題になっている遺伝子の部分集団での対立遺伝子頻度に何の変異もないことを意味している。反対の場合は $F_{ST} = 1$ で、二つの部分集団が一方の対立遺伝子に対して固定しているときに起こる。この場合、対立遺伝子の平均頻度は各対立遺伝子に対して 1/2 で、*AA*,、*Aa* と *aa* の遺伝子型頻度の平均は 1/2, 0, and 1/2 である。

大きな融合した集団は分割された集団に対して、平均して、より少ないホモ接合をもつ。これは数学的結果である。全集団が一つと考えられた場合に比べ、部分群の間での変異の存在はホモ接合の増大を、ヘテロ接合の減少をもたらす。

シンプソンのパラドクス（Simpson’s paradox）

入学試験での性差を考えてみよう。ビジネススクールとロースクールの志願者数は下のような表の通りである。

ビジネススクール

	合格	不合格
男性	480=80%	120=20%
女性	180=90%	20=10%

ロースクール

	合格	不合格
男性	10=10%	90=90%
女性	100=33%	200=66%

いずれも女性が男性より高い比率で合格している。だが、二つを総計するとどうなるだろうか。

両校の合計

	合格	不合格
男性	490=70%	210=30%
女性	280=56%	220=44%

今度は女性が男性より低い比率で合格しているように見える。

何が起こったのか。これがシンプソンのパラドクスと呼ばれるもので、幾つかの群が合わさって一つの群になったとき、結果が逆転する。