

世界をORする視線 (28)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(3) コンピュータの発展：コンピュータ科学の 数学的基礎 (続き 15)

住田 潮

(註：本稿は前回からの続きであるので、文献リストは継続し、新たに必要となる分を追加する。)

前回に続き、本稿ではエドワード・オークリー・ソーブ (Edward Oakley Thorp) の生い立ちを追いながら、双方ともに数学者・技術者であったシャノンとソーブの、数学史の中でも希有な例といえる関係を追いかける。その内容の多くは、文献 [126] に拠っている。

1. 高校生物理学コンテスト受験：高校3年生

1948年の夏、高校2年が終り、ソーブは浜辺に座って60冊の偉大な文学作品を読み耽った。主にアメリカ文学で、トマス・ウルフ、ジョン・スタインベック、セオドア・ドライサー、アーネスト・ヘミングウェイなどの作品である。ドストエフスキーやスタンダールといった外国人作家の作品も読んだ。息抜きにボディ・サーフィンをしながら、自分は何者なのか、これからどうすべきか、などと思い悩んだ。

この夏は、ソーブにとって特に難しい夏で、両親は離婚し、父親はロサンゼルスに移った。ソーブは、それ以後、大学に入学するまで、日曜日の朝の数時間だけ、車で迎えに来る父親と会うことができた。離婚するに至った状況はよくわからなかったが、フィリピンから移民してきたカリフォルニアの友人を、真珠湾攻撃の前の夏に訪問した際、母がその夫と不倫をし、その関係が続いていたことに父親が気付いたからだ、と何年も経ってから弟が教えてくれた。

高校3年生になっても、大学進学のためのお金をどう工面するかという問題は、未だ解決していなかった。

化学の試験で勝ち取るはずだった奨学金は手に入らず、親の援助も期待できなかった。あるとき、ソーブは、物理学教員協会が南カリフォルニアの高校生を対象に、化学の試験と同じような試験を実施しているのを知る。物理を本格的に勉強したことはなく、準備に使える時間は数ヶ月しかなかった。物理の先生は全く頼りにならず、過去問題を入手する術もないまま、参加者募集の紙に書いてあった短い説明から試験の内容を推測するしかない状態で、それでも独学で受験することを決意した。電気工学、力学、電子工学の実験は何年も経験してきたので、それが理論を学ぶ助けとなった。

ソーブの人生をかけた試験の日が来た。問題を一瞥して、1,000点満点中、860点分は解答の道筋を見出すことができた。今回は強力な計算尺を用意しておいたので、計算もすいすい捗った。しかし、問題2問、140点分は勉強していない分野から出題された。ソーブは焦りながらも、またしても4位という残念な結果に終わるつもりか、と自身を奮い立たせた。これではないかと推測した公式を用いて、まず、一つの問題を解き、その解法に次元解析という理屈を付けた。もう一つの問題は、その理屈を適用して、取り敢えずやってみただけに終わった。

化学のときと同じように、得点上位15人が晩餐会に招待された。やはり、ロサンゼルス学区でいちばん勉強のできる学校に通う生徒が大半を占めた。そして、結果が発表されると、表彰式の会場全体に驚きが広がった。田舎の職業訓練校の生徒であるソーブが、931点を取って第1位となったのである。2位の生徒に60点近くの差を付け、提供される奨学金の中からはちばん先に選ぶ権利を獲得することができた。ソーブの第1志望はカルテック (カリフォルニア工科大学: California Institute of Technology) であったが、奨

すみた うしお
筑波大学名誉教授

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

学金は学費全額に留まり、寮費や諸々の生活費で年額2,000ドルは必要であった。カルテックの位置するパサデナは物価が高く、家賃も高額であった。第2志望のUCB（カリフォルニア大学バークレー校：University of California, Berkeley）は、年額300ドルの現金が支給された。授業料は70ドルであったが、それは別途、第1次世界大戦に従軍した人の子弟に対する奨学金で賄うことができた。加えて、UCBにはキャンパス近くに食事付きの安い寮があり、また週に4時間の労働をする条件で学生共同住宅協会が月額35ドルと食事付きの部屋を提供してくれるとある。ソープは、カルテックに進学できないことを残念に思ったが、バークレーの蒼い空とキャンパスに溢れる女子大生を思っ て自らを慰めた。

1949年、ソープの高校時代を彩る最後のハイライトは、ウェスティングハウス（Westinghouse Electric Corporation）が年に1回開くサイエンス・タレント・サーチ第8回大会に参加したことであった。この大会は、スポンサーがインテル（Intel Corporation）、次いでリジェネロン（Regeneron Pharmaceuticals, Inc.）へと変わりはしたが、現在も継続している。家のすぐ裏に住んでいる引退した電気技師がソープに目を掛けてくれており、さまざまな電子部品を提供してソープの実験をサポートしたり、ソープのために「サイエンス・ニューズレター」という雑誌を購読してくれていた。この人が、サイエンス・タレント・サーチについて教えてくれたのである。

コンテストは、科学の筆記試験、先生の推薦状、そして科学に関する小論文に基づいて評価が行われる。先生も聞いたことのないコンテストであったが、物理学教員協会が南カリフォルニアの高校生を対象に実施した試験で第1位を取ったこともあり、推薦状を書くことを快諾してくれた。小論文は教えてくれる人もいないので図書館に通い詰め、当初はベリリウムという金属について学術的な考察を纏めてみることを計画したが、少しも面白くない。そこで、『独自に行うさまざまな推定』というテーマを設定した。最初のテーマは、空に浮かぶ惑星の位置を、楕円軌道を用いる厳密なケプラーの方法ではなく、軌道が円だと仮定してより簡便に近似する方法についてであった。2番目のテーマは、「ガラスのプリズムの屈折率とプリズム内を進む光の相対速度を求める方法」とした。机の上でプリズムを動かし、光の半分を反射、半分を下にある平面へと透過させる角度を見出すことで、三角法と定規を用いて光の相対速度を推定する方法である。全米に散ら

ばる16,000人を超える高校生とコンテストに参加し、試験はうまくいったと思ったが、推薦状と小論文がより重視されると聞いていたので、ソープはあまり期待しなかった。何の音沙汰もなく時が過ぎ、コンテストのことを忘れかけていた春のある朝、ソープは電報を受け取った。電報はウェスティングハウスからで、最終選考対象の40人に選ばれたことを知らせるものであった。数週間後、ワシントンDCまでの電車の切符が送られてきた。

5日間の日程で出掛けたワシントンDCへの旅は、費用は全額主催者持ちで、ソープにとっては初めての電車の旅であった。出迎えの研究者の中には、MRIに使われる核磁気共鳴を発見したことにより1944年にノーベル物理学賞を受賞したイジドール・イザーク・ラービ（Isidor Isaac Rabi）がいた。また、152cmのサイクロトロンを見学する機会が設けられ、さらにホワイトハウスの大統領執務室にハリー・S・トルーマン（Harry S. Truman）大統領を訪問し、彼と握手することができた。コンテストは、10位以内に入ると、上から下へ順番に、1万ドルから1,000ドルまでの賞金が貰え、それ以外は全員が100ドルずつ貰えた。残念ながらソープは10位以内には選ばれなかったが、このワシントンDCへの旅は、青春を彩る誇らしい旅として、長くソープの記憶に残るものとなった。

2. UCBで化学を専攻

1949年8月、17歳になったソープはUCBに入学するべく家を出た。両親は離婚し、母は家売って引越した。12歳の弟は士官学校に入学した。驚き傷ついたことに、ソープが新聞配達で稼いで貯めた戦時公債を、母はすべて売り払い、使い切っていた。これで、大学を卒業できるまで生活していけるか、怪しくなってしまった。奨学金とアルバイト、それに最初の1年間は父親が月額40ドルを送金してくれたお陰で、ソープは何とか生き延びることができた。使えるお金は月額100ドル以下で、それで本、授業料、食事、衣服、寮費のすべてを賄わなくてはならなかった。ソープの寮は日曜日には食事が出なかったので、教会の「いつでも誰でも歓迎」の慈善パーティーに潜り込んで、無料のココアやドーナツで腹を膨らませた。

復員軍人援護法のおかげで、キャンパスは戦争帰りの元兵士で溢れていた。ソープと同じ化学専攻の学生は1,500人おり、それぞれ400人近い四つの組に分かれて講義を受けた。高名な担当教授は自著の教科書を改訂中で、誤りを最初に見つけてくれた学生には1ヶ

所当たり 10 セントを支払うと言明した。ソープが直ぐに 10ヶ所の誤植をリストにしてもって行くと、ちゃんと 1 ドル払ってくれた。それに勇気づけられて、数日後、75ヶ所の誤植リストを提出すると、7.5 ドルを払ってはくれたものの、教授はもはや喜んではいなかった。さらに数日経ってから数百個に及ぶ誤りのリストをもって行くと、「これらは単なる誤植で、誤りではない」と強弁して支払いを拒んだ。後に、ウォール街でソープが出くわすことになる「取り決めに前に遡って一方的に変更する」という手口で、フェアプレイを信条とするソープは、それ以後、間違い探しを止めた。

ソープの第 1 学期の試験と実験の成績はほぼ満点で、ダントツで学年 1 番の成績であった。しかし、別に、正体を知らされずに渡されるサンプルを科学的に分析し、報告書を提出するという課題が毎週出された。学生の一部が、ほかの学生のサンプルをすり替えて報告書の結果が誤りとなるよう妨害すると聞いていたソープは、自分の受け取ったサンプルの一部を保存しておくようにした。そんな妨害を受けても、正しく分析したことを証明できるように準備したのである。その学期の最後の課題で、ソープの答えは間違っていると判定された。ソープは取っておいたサンプルを取り出し、自分の分析が正しいことを証明するために検査してくれるよう申し出た。この申し出に対する対応は、実習を担当する助手の判断に任されていたが、彼は何の行動も起こさなかった。ここで失った点のせいで、ソープの総合成績は、学年で 1 番ではなく 4 番になってしまった。ソープは UCB のような大学でも、他人の成績を下げさせるような妨害を平気で行う学生がいること、それに対して自分は対応措置を講じていたにもかかわらず大学側が何の対応も行わなかったことに烈火の如く腹を立て、2 学期には化学の講義を履修せず、専攻を物理学に変更してしまった。若い頃のソープは、怒りと短気から、人生の道筋を変えてしまうような行動を、度々取ってしまうことがあった。しかし、結果から振り返ってみると、そうした路線変更がかえって良かったと思えるようにしてしまうところが、超一流が超一流であることの証左なのかも知れない。

3. UCLA の物理学科へ

ソープの人生に一貫して見られる特徴は、「二流の場所で超一流の成果を達成すること」への漲る自信である。当時のカリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA: University of California, Los Angeles) は、数学や物理学で UCB と肩を並べるほどの大学ではなかった。

しかしソープは UCB で経験した不快な思いを我慢することなく、1 年生の終わりには UCLA に転校した。カリフォルニア大学の奨学金は UCLA に転校しても継続することができ、何より南カリフォルニアに対しては地元意識があった。ソープは学生が独自に運営している大学住宅協同組合の寮に入った。大恐慌時代、UCLA に通うためにお金を貯めた学生数人が立ち上げた組織で、ソープの入寮時には寮生は 150 人にまで膨れ上がり、まるで国連の縮図であるかのように世界中から学生が集まっていた。

1950 年の秋、18 歳で 2 年生になったソープが最初に出会った友人の 1 人が、やはり 2 年生で 20 歳のヴィヴィアン・シネター (Vivienne Sinetar) であった。彼女の専攻は英文学で、信仰、人種、支持政党が何であろうと人間を平等に扱おうという運動を組織する学生グループで出会った。2 人とも書くことが好きであったので、グループの新聞を発行することにした。UCLA の地域には黒人の髪を切ってくれる床屋が存在しないという問題や、UCLA の専門科目である「南北戦争」を教える教授の「南部連合は、奴隷制度を通して、虐げられていた黒人の人々にとって一種の福祉国家を成していた」という主張などを取り上げ、アジビラを何百枚も刷ってキャンパスでばらまいた。

ソープとヴィヴィアンは、多くの点で似ていた。家族の中で、初めて大学を卒業する人間になろうとしていること、ユダヤ系ハンガリー人の移民であり、ヨーロッパで何世紀にもわたって迫害を受けてきた歴史を受け継ぐ彼女は、ソープに負けないほどの強いフェアプレイ精神をもっていること。そして何より、あらゆることに尽きることのない知的好奇心を発揮すること。2 人はよき友人となったが、付き合いなどとは考えなかった。月日は巡り、それぞれがほかの人と付き合い、やがて再び巡り会って 2 人は結婚することになる。

3 年生のとき、ソープに学生生活の危機が訪れた。女性とのデートも積極的にこなしながら、生活を支えるためのアルバイトにも精を出さなければならなかったソープは、恒常的な睡眠不足に陥っていた。ある日、午前 8 時からの物理学の講義に出たときも、疲労困憊し、寝不足でイライラしていた。担当教授は高名な物理学者の息子であったが、彼自身は凡庸で、講義の内容は毎年変わらず、カードの東に書いたことを黒板にせつせと写し、学生からの質問を恐れてずっと背中を向けている有様であった。退屈したソープは、学生新聞を読み始めた。これに自尊心を傷つけられた教授は立腹し、ソープが新聞に没頭している時を狙って突然、振

り向き、質問を投げかけた。ソープはたちどころに正しい答えを言って、また新聞に戻った。この過程が何度か繰り返されると、教授の心にソープに対する鬱屈した怒りが蓄積された。

ある朝、事態はついに沸点に達するところまで来た。前の晩に遅くまでデートしていたソープは、寮に戻って、そのまま長ったらしい、しかし単純な宿題をやり終えた。宿題は、講義の前に提出しなければならなかった。ソープが教室に入り、宿題を提出するべく階段を急いで降りて教壇に辿り着いた丁度そのとき、始業開始を告げる8回のチャイムの1回目が鳴った。教授はソープを見て、「駄目だね。遅刻だ。受け取れない」と言った。ソープは宿題を机に叩きつけて怒鳴った。「受け付けないうって、どういうことですか!」そこで、ソープの中で蓄積されてきた鬱屈した感情が爆発した。教授の講義に対する批判を滔々と述べ、それから宿題を渡せないまま着席した。ほかの学生はびっくりし、誰も口を開かなかった。やがて講義は、前回と同じように始められた。

1週間後、ソープは学生部長に呼び出され、彼の不敬な行動に対するさまざまな措置が検討されており、それは退学も含む旨を告げられた。この年、1951年には朝鮮戦争が戦われており、退学になれば1S登録(学生の特権として与えられる徴兵猶予)を失い1A登録になる。真っ先に徴兵されるグループであり、UCLA近くの徴兵委員会に呼び出され、数週間後には入隊することになると予測された。ロサンゼルスでも、UCLAの界限では、兵士不足から1S登録の学生でも戦争に駆り出されるようになっていた。ソープは父親が住んでいた地域の徴兵委員会の管轄下にあり、その界限には学生がほとんどおらず、1A登録の若者が沢山いたので、1S登録であれば学生生活を続けられる可能性は高かった。

ソープの一件は、制裁の推奨付きで学生部長補佐に回された。ソープにとって幸運なことに、学生部長補佐は驚く程に同情的であった。話し合いの結果、

- ① 研究室に向向いて教授に面接し、謝罪を述べる
- ② 今後は、全力で良好な態度を保持する
- ③ 学生自治団体の役職には立候補しない

という取り決めが成された。3年生が終了するまでは執行猶予の身分で、破れば再び退学の危機に見舞われることになる。

教授に対して、不敬について謝罪することに関しては、ソープに何のためらいもなかった。それは、彼が自分でも不敬であったと感じていたからである。しか

し、彼の講義内容を批判したくだりについて謝罪することは、ソープにとっては良心の問題であった。一方、これを取り消すことなしに、自尊心を傷つけられた教授がソープを許すとは思えなかった。そこでソープは、次のような“謝罪”を案出した。

「先生の教え方は、独特であるのだとわかりました。学生である自分には、なかなか理解できませんでした。先生のような力量の教授は、まず、おられないと知りました。」

ソープは思ったとおりのことを口にしているのだが、教授はソープが企んだ方の解釈を選んだ。ソープが研究室を退出するときには、教授は輝くばかりの笑顔を見せた。

流石のソープも、この肝を冷やすような経験から、しっかりと教訓を導き出した。執念深い敵を作りたくなければ、そういう相手の自尊心を決して傷つけてはならない。そういう連中は、可能な限り避け、それが叶わないなら、適当にあしらってやるのがよい。そして、怒りを感じて行動する前に、

- ◇ こうするのは、どうなってほしいからだ?
- ◇ こうすると、どうなると思う?

と自問すること。

4. 物理学専攻から数学へ

1952年の夏、卒業直前にソープは当時の彼女と泣く泣く別れることになった。彼女の両親はユダヤ系で、プラスチック事業で成功を収めていたが、信仰もお金も将来の見込みもない学生に過ぎなかったソープは、彼らのお眼鏡に適わなかったのである。そのまま物理学専攻の修士課程に進学したソープは、傷心を抱えて、卒業前の6週間、彼の古ぼけたセダンを運転して、友人の一人と一緒にニューヨークのマンハッタンへ出掛けた。

アメリカ大陸横断の旅は、学生の貧乏旅行そのものであった。夜は車で寝て、お金は食べ物とガソリン代に充てるだけの余裕しかなかった。第1泊目にラスベガスを選んだことは、その後のソープの人生にとって予兆的であった。二人は車で寝ていても警官からおとがめを受けない場所を探し、見るからに打ち捨てられた、だだっ広い公園に辿り着いた。トイレの横に車を止め、蛇口からホースで水を引いて、自分の車のヘッドライトの中、素っ裸になって身体を洗った。そのとき、公園は宿なしの人々で溢れていることに気づき、中には家族連れもいて、ギャンブルで財産を失った人々だと一目で知れた。

翌朝、大胆にも目抜き通りに並んだカジノの一つに行き、二人でプールサイドをぶらぶらしていると、3人組の女の子たちに出会い、小銭を渡されてスロットマシンをやってよと頼まれた。ソープは未だ21歳になっていなかったためギャンブルをすることは違法であり、少しドキドキしたが、始めて直ぐにちょっとしたジャックポットを出した。鐘が鳴り、ライトがピカピカ点滅して、硬貨がマシンの受け皿に降り注いだ。ここで初めて、5人は手に入れた賞金で食べ物と飲物を買込んだ。この経験を通して、ソープの頭には鮮烈な光景が焼き付いた。目抜き通りに並ぶカジノでは、働きもせずに大金を手に入れる機会が転がっている。そしてもう一方では、大きく賭け過ぎて大金を失い、破産して路頭に迷う公園で見掛けた人々がいる。このときには、将来、数学を駆使して自分が彼らに大逆転の方法論を提供することになるとは思いもしなかった。

マンハッタンから戻ると、ソープは仕事と研究の日々に戻った。修士の2年間が終わる前に博士課程の講義をすべて取り終え、資格試験にも合格して、最後の関門である学位論文を書き上げ口頭試問に合格すれば博士号が取得できるまで到達していた。無論、修士号はおまけで付いてくる。原子核の殻構造をテーマにしたが、複雑な量子力学の計算を完成させるためには、もっと数学を学ぶ必要があった。高度な数学を突き詰めて学ぶのであれば、数学で博士号を取ることも可能な気がした。UCLAの物理学科では、博士課程の学生が学位を取得するまでに10年以上かかることも珍しくはなかったため、ソープは物理学より先に数学で博士号を取得する選択肢を心の中に留めた。

研究に打ち込んでいると、恋愛や友人との付き合いとは自然に疎遠になったが、修士2年のクリスマスに、突然、ヴィヴィアンからクリスマスカードが届き、「他人の振りをしないでよね」と書かれてあった。直ぐに彼女に電話を掛けると、ヴィヴィアンは未だ独身で、二人の交際は復活することになった。内向的で、何でも深く考えることを大切に、学究の生活を楽しむ点で、二人は共通していた。ヴィヴィアンは明快で論理的な考え方ができる一方、文学、心理学、演劇を好む。ソープは、合理的で科学的な考え方で自然界を見ることに能力を発揮した。ヴィヴィアンはソープに人間を教え、ソープは彼女に物の理を教えた。二人は惹かれ合い、自然と結婚を意識するようになった。1955年6月、ソープは物理学修士号を修め、ヴィヴィアンに結婚のプロポーズをした。ヴィヴィアンも同意し、彼女の両親も学究者の安月給しか稼げないソープを喜ん

で受け入れてくれた。そして1956年1月、二人は正式に結婚した。

結婚後、博士課程に進学していたソープは、本格的に数学の勉強を始めた。基礎知識として必要な学部専門課程レベルの数学は独習し、直接、大学院レベルの講座を取り始めた。生活を支えるべく、ヴィヴィアンは働いてくれていたが、夏になって、どうしても追加の収入が必要となり、ソープも3ヶ月間、フルタイムで働くことにした。運良く工学部の学生で友人のトム・スコット (Tom Scott) から、ナショナル・キャッシュ・レジスター (NCR: National Cash Register) が専門レベルの現代数学を従業員に教える講師を募集していることを教えてもらった。直ぐに応募して書類審査と面接に合格し、週に95ドル (現在価値に変換すると8~9倍) も貰える仕事にありついた。教科書の選択はソープに任されており、自分の勉強にもなればと、ガーレット・バーコフ (Garrett Birkhoff) とソーニング・マックレーン (Saunders Mac Lane) 著の『現代代数学概論』を選んだ。数学を学ぶ学生が、伝説の教科書と崇める文献である。ソープは毎日、この本で勉強し、翌日、学んだことを講義した。

5. ギャンブルと数学

博士課程進学後、ソープは物理学から数学へと軸足を移し、厳しい研究生活に打ち込む一方、ギャンブルの数学的解析に好奇心を抱き、ブリッジに対する必勝法を編み出すことに力を注いだ。発見した方法をラスベガスで実験的に試し一定の成果を挙げると、友人の勧めもあり、学術論文として出版することを志す。その過程でMITのシャノンと出会い、意気投合した二人は、次にはルーレットの必勝法に取り憑かれ、2年を掛けて世界で初めてのウェアラブル・コンピュータを開発、ラスベガスに乗り込むことになる。少し筆が先走り過ぎたが、もちろん、ギャンブルの数学的解析にのめり込んだ数学者は、ソープが初めてではない。ここで少し遠回りをして、確率論の発展の軌跡とギャンブルとの関わり方について、簡単に振り返っておこう。さらに遡った歴史に興味ある読者は、文献 [127] を参照されたい。邦訳があるものとしては、文献 [128] を挙げておく。

確率論の発展が深くギャンブルに根差していることはよく知られている。長い間、ギャンブルは経験と勘に委ねられていたが、ギャンブルに「比率」の概念を最初にもち込んだのは、ルネサンス期のイタリアの天才ジェロラモ・カルダーノ (Gerolamo Cardano) [129, 130]

である。1501年、レオナルド・ダ・ビンチの友人で数学的才能に恵まれた法律家ファジオ・カルダーノ (Fazio Cardano) の私生児としてパヴィア (Pavia) に生まれ、父親の暴力と病弱に苦しむ暗い幼・少年期を送った。1520年、パヴィア大学に入学すると、法律を学ばせようとした父親の意思に逆らって哲学と科学を専攻した。しかし、1521–1526年にわたり、フランス王フランソワ1世とその同盟国ヴェネツィア共和国が、神聖ローマ皇帝カール5世、イングランド王ヘンリー8世、教皇国家に抗して戦われた第3次イタリア戦争により、1524年、パヴィア当局によってパヴィア大学は終戦まで閉鎖された。

これを受けて、カルダーノはパドヴァ (Padua) 大学に移り、1525年、医学博士号を取得した。ミラノのような大都市で開業することを望んだが、エクセントリックで戦闘的気質の悪評が広まり、私生児であったことも不利に働いて、なかなか開業認可が下りなかった。それでも、小さな田舎町のピオヴェ・ディ・サッコ (Piove di Sacco) でライセンスなしで開業、結婚して3人の子供を授かり、幸せな日々を送ることができた。その後、数少ない有力な友人の紹介でミラノ大学で数学を教える職を得、また、ついにミラノでの開業ライセンスを取得したカルダーノは、数学と医学を教えつつ、瞬く間に頭角を現し、1536年には、医学で十分な収入を得ることができるようになり、もはや数学を教える必要はなくなった。1543年、最初に入學したという意味では母校であったパヴィア大学の医学部教授に招聘されて故郷に戻り、複数の分野で多岐にわたる業績を積み上げ名声を確立した。

カルダーノの数学における貢献については、1545年に出版された3次方程式、4次方程式の解に関するラテン語の著作『大いなる術 (Ars magna de Rebus Algebraicis)』が最もよく知られている [131]。解の式そのものは、それぞれ、シピオーネ・デル・フェットロ (Scipione del Ferro) とカルダーノの弟子であったルドヴィコ・フェラーリ (Ludovico Ferrari) によるものであったが、この著作以前は数学的発見は秘密結社のべールに包まれ、公表されることはなかった事実があり、この壁を打ち破ったという意味で、『大いなる術』は近代代数学の扉を開いたといわれている。また、この著作では、根と係数の関係や、初めて虚数を用いた根の示し方などが示されている。16世紀においては、代数学と魔術の間には親近性が認められており、『大いなる術』という言葉は、カルダーノ以前からすでに代数学の別称として用いられていた。

カルダーノは悪名高い浪費家であり、常に金欠病に悩んでいることで知られており、チェスやギャンブルで稼いでは負債を返す生活を繰り返していた。1564年頃には、『偶然性を伴うゲームについて (Liber de ludo aleae)』を執筆した。彼の死後、1663年になるまで出版されなかったこの本で、サイコロを投げるゲームを例にとり、世界で初めて原初的な確率論の体系を論じた。期待値、平均、頻度表、確率の可算的性質、 n 回の試行で k 回成功する場合の組合せの計算、さらには、後世になって大数の法則として知られるようになる内容に関しても、その概略を論述している。また、ギャンブルにおける効果的なイカサマ法についても言及している。1570年には、より学術的な著作である「比率の新展開 (Opus novum, De Proportionibus numerorum, motuum, ponderum, sonorum, aliarumque rerum mensurandarum. Item de aliza regula)」(註：これ自体としての和訳を見つけないことができなかったため、著者によるラテン語辞書を用いた切り貼り和訳である) を著わし、確率論の確立に大きな影響を及ぼした「比率」の概念を初めて導入、さらに2項係数と2項定理を論じている。

カルダーノの著作は、ギャンブルの形態を本質的に変えた。偶然について何も意を払わない無知のプレイヤー同士の対決から、有利な期待値を利用して長期的に堅実に勝つプロや胴元が中心となる対決へと変化し、社交場としての賭博部屋や酒場が、プロや胴元が運営するビジネスとしてのカジノへと変容、17世紀におけるギャンブルの爆発的な隆盛をもたらした。

カルダーノの死後、半世紀を経て、ギャンブルのビジネス化にさらに貢献したのが、かのガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei) である。ガリレオは、公平なサイコロを3回投げてその目の和を推測するギャンブルについて、賭博師から次のような相談を受け、考察した結果を小論文として著わした [132]。

「サイコロを3回投げたとき、その和が11になる組合せを目の出る順番を無視して書き下すと、(1, 4, 6), (1, 5, 5), (2, 3, 6), (2, 4, 5), (3, 4, 4), (3, 3, 5) の6通りである。その和が12になるのも (1, 5, 6), (2, 4, 6), (2, 5, 5), (3, 3, 6), (3, 4, 5), (4, 4, 4) の6通りである。しかし、経験から言うと、11に賭けた方が、多少ではあるが有利に思える。それは、なぜか？」

ガリレオが気付いたのは、「目の出る順番を無視して書き下すこと」に潜む盲点であった。サイコロを3回投げて出る目の可能性は $6 \times 6 \times 6 = 216$ 通りある。

その中で、(1, 4, 6) は目の出る順番を考慮すると 6 通りあるが、(1, 5, 5) は 3 通りである。以上を考慮すると、和が 11 になる確率は、

$$\frac{6 + 3 + 6 + 6 + 3 + 3}{216} = \frac{27}{216}$$

となる一方、和が 12 になる確率は、

$$\frac{6 + 6 + 3 + 3 + 6 + 1}{216} = \frac{25}{216}$$

である。したがって、相談した賭博師の経験則は正しかったことになる。

ガリレオは、場合の数を数える際に、基本事象の集合としての標本空間を正しく設定することの重要性を指摘した。カルダーノは、起こり得る結果の蓋然性を比率に基づいて評価できることを示したが、比率を表わす基礎となる母集団に関して考察が行き届いていなかったことになる。

ここで、ギャンブルにおけるオッズ (odds) の考え方を示しておこう。オッズが m 対 n であるとは、負ける場合が m 通り、勝つ場合が n 通りで、どれもチャンスが等しいという意味である。母集団を正しく測定し、そこである事象が起きる確率を p とすると、その事象が起こらないことに関するオッズは $(1-p)/p$ であり、その事象が起こることに対するオッズは、その逆数 $p/(1-p)$ で与えられる。 $p=1/3$ とすると、その事象が起こらないオッズは 2 対 1、起こる事象に対するオッズは 1 対 2 である。逆に、ある事象が起こらないことに対するオッズが m 対 n であるとき、その事象が起こる確率は $p=n/(m+n)$ となる。

ここでガリレオの指摘がさらなるギャンブル・ビジネスの隆盛を招いた理由を見てみよう。公平なサイコロを 3 回振って目の和が 5 未満であれば客の勝ち、そうでなければ胴元の勝ちというギャンブルを考える。目の和が 5 未満になる基本事象は、

(1, 1, 1), (1, 1, 2), (1, 2, 1), (2, 1, 1)

の 4 通りである。したがって、客が負ける数学的なオッズは、 $(216-4)/4 = 53/1$ である。すなわち、長期的な平均を見れば、客は 54 回賭ければ 1 回、勝てることになる。これに対して胴元が、1 回につき賭け金 1 ドル、客が勝ったら 50 ドル払うという賭けを申し出た場合、長期的な平均で見れば 54 ドル回収して 50 ドルを払うというサイクルを継続することになる。すなわち、胴元はワンサイクルごとに 4 ドルの利益を得ることができ、長期的には非常に高い確率で利益を蓄積できることになる。ギャンブルがビジネス化した所以である。50 ドルを 51~53 ドルまで引き上げても、利

幅は減るが同じ構造を保つことが可能で、設定は賭けに乗る客数に対する胴元の判断で決まる。

ギャンブルに関連して確率論をさらに精緻化したのがブレイズ・パスカル (Blaise Pascal) [7] とピエール・ド・フェルマー (Pierre de Fermat) [7] である。文献 [128] によれば、1654 年、ある寒い冬の日の午後、有名な貴族でギャンブラーとして悪名高いシュバリエ・ド・メレ (Chevalier De Mere) が、帰宅の途中、偶然、友人のアマチュア数学者ピエール・ド・カルカヴィ (Pierre de Carcavi) と出会った。ド・メレはかなりの資産家であったが、最近ではギャンブルで負けが込んで困っていると打ち明け、「『2 個のサイコロを 24 回投げて 1 回以上 6 のゾロ目が出る』という賭けでは、オッズが五分五分以上になると経験から知っており、以前はかなり稼いでいたのだが、最近はこの経験則がサッパリ働かない。この経験則に対する数学的説明を知らないか」と質問した。ド・カルカヴィは前出のカルダーノの著作『Liber de ludo aleae (偶然性を伴うゲームについて)』を知っていて、この本が手掛かりになるかも知れないと伝え、共通の友人であるパスカルに相談することにした。

パスカルはカルダーノの著作の写しを手に入れて、そこに書かれている二つの問題に関して検討を始めた。

問題 1: 2 個のサイコロを何回投げれば、1 回以上 6 のゾロ目が出る確率が $1/2$ 以上になるか

問題 2: 2 人で行っているゲームがある回数残っているときに中止する場合、公平な評価をどう行うべきか (たとえば、A と B がサイコロでギャンブルをし、偶数であれば A の勝ち、奇数であれば B の勝ち、先に 8 回勝った方が同額拠出された賞金を総取りするというゲームで、A が 5 回、B が 3 回勝った状態で中断を余儀なくされたとき、どのように賞金を分配すれば公平か)

パスカルはカルダーノの分析に疑問を抱き、友人の弁護士で数学者のフェルマーにこれらの問題を手紙で知らせた。その年、パスカルは春夏を通して病に倒れ、床に伏していたが、二人は文通を通して分析を進めた。

問題 1 に関しては、 n 回投げて 1 回もゾロ目が出ない確率を計算した方が早いと気づき、その確率 $(35/36)^n$ から、求める確率 $f(n) = 1 - (35/36)^n$ を異なる n について計算した。 $f(24) = 0.491$, $f(25) = 0.506$ となるので、24 回投げて 1 回以上 6 のゾロ目が出る確率は二分の一より僅かに小さく、25 回投げた場合は二分の一より僅かに大きくなることを証明した。

問題 2 に関しては、中止の時点からさらにゲームを

続行した場合、それぞれのプレイヤーが勝つ条件付き確率を求め、その確率で求まる期待値に基づいて賞金を分配すればよいと結論した。

パスカルとフェルマーの一連の往復書簡によって、近代的な確率論の基礎が体系化された。パスカルは確率論にとって運命的な年となった1654年、書簡の内容を小論文として纏めた。その中で、組合せ問題に威力を発揮するパスカルの三角形が論じられている。この小論文は、彼の死後3年を経た1665年まで出版されることはなかった。

パスカルは早熟・早世の天才で、16歳のときに円錐曲線に関するパスカルの定理を証明し、ほかにもサイクロイドの求積問題、流体の平衡に関するパスカルの原理など、多大な功績を残し、力学・物理学における圧力の単位としてパスカルの名を残している。しかし、晩年は研究を止め、短い生涯の残りを哲学と宗教に捧げた。

パスカルの小論文の出版に先立つこと8年の1657年、パスカルとフェルマーの一連の往復書簡の内容を『運まかせゲームの計算 (Van Rekeningh in Spelen van Geluck)』として最初に出版したのはオランダの物理学者・数学者・天文学者であったクリスティアーン・ホイヘンス (Christiaan Huygens) である。以後、この本は確率論の教科書として広く読まれるようになる。1705年、スイスの数学者ヤコブ・ベルヌーイ (Jakob Bernoulli) が世を去ったが、彼の甥のニコラス・ベルヌーイ (Nicolas Bernoulli) が8年を掛けてヤコブが遺した研究ノートを整理し、1713年、ヤコブ・ベルヌーイ著の『推測法 (Ars Conjectandi, Opus Posthumum)』の出版に漕ぎ着けた。その内容のほとんどは既知のものであったが、現実世界で確率がどのように振る舞うかに関する深い洞察を与える「弱大数の法則」を初めて本格的に取り上げている点が、特筆に値する。この数学的概念に厳密な証明を与えることにより、運は定量化できると信じられるようになり、その確信がギャンブル・ビジネスのさらなる隆盛をもたらした。

参考文献

- [1] H. Goldstine, *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton University Press, 1972. (末包良太, 米口肇, 犬伏茂之訳, 『復刊 計算機の歴史—パスカルからノイマンまで—』, 共立出版, 2016.)
- [2] S. McCartney, *The Triumphs and Tragedies of the World's First Computer*, Walker, 1999. (日暮雅通訳, 『エニアック—世界最初のコンピュータ開発秘話—』, パーソナルメディア, 2001.)
- [3] 坂村健, 『痛快! コンピュータ学』, 集英社, 1999 (文庫版2002).
- [4] 竹内伸, 『実物でたどるコンピュータの歴史—石ころからリングへ—』, 東京理科大学出版センター(編), 東京書籍, 2012.
- [5] 小田徹, 『コンピュータ開発のはてしない物語—起源から驚きの近未来まで—』, 技術評論社, 2016.
- [6] Wikipedia, Francois Viéte, https://en.wikipedia.org/wiki/Francois_Viéte (2021年12月14日閲覧)
- [7] E. T. Bell, *Men of Mathematics Volume 1*, Simon & Schuster, 1937. (田中勇・銀林浩訳, 『数学をつくった人びと上』, 東京図書, 1976.)
- [8] Wikipedia, René Descartes, https://en.wikipedia.org/wiki/René_Descartes (2021年12月21日閲覧)
- [9] E. T. Bell, *Men of Mathematics Volume 2*, Simon & Schuster, 1937. (田中勇・銀林浩訳, 『数学をつくった人びと下』, 東京図書, 1976.)
- [10] Wikipedia, George Boole, https://en.wikipedia.org/wiki/George_Boole (2021年12月14日閲覧)
- [11] P. J. Nahin, *The Logician and the Engineer: How George Boole and Claude Shannon Created the Information Age*, Princeton University Press, 2012, (松浦俊輔訳, 『0と1の話—ブール代数とシャノン理論—』, 青土社, 2013.)
- [12] J. Soni and R. Goodman, *A Mind at Play: How Claude Shannon Invented the Information Age*, Simon & Schuster, 2017, (小坂恵理訳, 『クロード・シャノン—情報時代を発明した男—』, 筑摩書房, 2019.)
- [13] Wikipedia, Claude Shannon, https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon (2021年12月20日閲覧)
- [14] Wikipedia, Alan Turing, https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing (2021年12月20日閲覧)
- [15] B. J. Copeland, *Turing: Pioneer of the Information Age*, Oxford University Press, 2012, (服部桂訳, 『チューリング—情報時代のパイオニア—』, NTT出版, 2013.)
- [16] A. Hodges, *Alan Turing: The Enigma*, Princeton University Press, 2014, (土屋俊・土屋希和子訳, 『エニグマ—アラン・チューリング伝—』, 勁草書房, 2015.)
- [17] 高岡詠子, 『チューリングの計算理論入門—チューリング・マシンからコンピュータへ—』, 講談社, 2014.
- [18] Wikipedia, Galileo Galilei, https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei (2021年12月21日閲覧)
- [19] Wikipedia, Nicolaus Copernicus, https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Copernicus (2021年12月21日閲覧)
- [20] Wikipedia, Marin Mersenne, https://en.wikipedia.org/wiki/Marin_Mersenne (2021年12月21日閲覧)
- [21] Wikipedia, Isaac Beeckman, https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Beeckman (2022年1月2日閲覧)
- [22] Wikipedia, Adrien Baillet, https://en.wikipedia.org/wiki/Adrien_Baillet (2022年1月2日閲覧)
- [23] Wikipedia, Elisabeth of the Palatinate, https://en.wikipedia.org/wiki/Elisabeth_of_the_Palatinate (2022年1月2日閲覧)
- [24] Wikipedia, エリーザベト・フォン・デア・プファルツ (1618-1680), <https://ja.wikipedia.org/wiki/エリーザベト・フォン・デア・プファルツ> (1618-1680) (2022年1月2日閲覧)
- [25] 有賀暢迪, “合理力学の一例としての衝突理論 1720–1730年”, *科学哲学科学史研究*, **6**, pp. 17–37, 2012.
- [26] Wikipedia, ソデイの6球連鎖, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ソデイの6球連鎖> (2022年1月4日閲覧)
- [27] Wikipedia, Thorold Gosset, https://en.wikipedia.org/wiki/Thorold_Gosset (2022年1月4日閲覧)
- [28] 寒川町ガイド, <https://samukawaguide.blogspot.com/2019/12/6.html> (2022年1月4日閲覧)

- [29] Wikipedia, Gottfried Wilhelm Leibniz, https://en.wikipedia.org/wiki/Gottfried_Wilhelm_Leibniz (2022年1月4日閲覧)
- [30] Wikipedia, Christina, Queen of Sweden, https://en.wikipedia.org/wiki/Christina,_Queen_of_Sweden (2022年1月4日閲覧)
- [31] Wikipedia, Isaac Newton, https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton (2022年1月4日閲覧)
- [32] 向井茂, “不変式の話,” 数学セミナー連載, 2005年12月号, 2006年1, 2, 4月号.
- [33] 日本医学会ホームページ, <https://jams.med.or.jp/news/013.html> (2022年2月4日閲覧)
- [34] Wikipedia, Vannevar Bush, https://en.wikipedia.org/wiki/Vannevar_Bush (2022年2月25日閲覧)
- [35] Britanica, William-Thomson-Baron-Kelvin, <https://www.britannica.com/biography/William-Thomson-Baron-Kelvin> (2022年3月6日閲覧)
- [36] Wikipedia, Hannibal Ford, https://en.wikipedia.org/wiki/Hannibal_Ford (2022年3月6日閲覧)
- [37] Wikipedia, Joseph Fourier, https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier (2022年3月6日閲覧)
- [38] Wikipedia, ユトランド沖海戦, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ユトランド沖海戦> (2022年3月6日閲覧)
- [39] Wikipedia, Mark I Fire Control Computer, https://en.wikipedia.org/wiki/Mark_I_Fire_Control_Computer (2022年3月7日閲覧)
- [40] Wikipedia, Bell Labs, https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Labs (2022年4月7日閲覧)
- [41] Wikipedia, Thornton Carle Fry, https://en.wikipedia.org/wiki/Thornton_Carle_Fry (2022年4月7日閲覧)
- [42] Wikipedia, Schön scandal, https://en.wikipedia.org/wiki/Schön_scandal (2022年4月7日閲覧)
- [43] Wikipedia, ヘンドリック・シェーン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘンドリック・シェーン> (2022年4月7日閲覧)
- [44] Wikipedia, ジョン・フォン・ノイマン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョン・フォン・ノイマン> (2022年4月29日閲覧)
- [45] Wikipedia, ヘルマン・ワイル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘルマン・ワイル> (2022年4月29日閲覧)
- [46] Wikipedia, 第二次世界大戦, <https://ja.wikipedia.org/wiki/第二次世界大戦> (2022年5月31日閲覧)
- [47] Wikipedia, フランクリン・ルーズベルト, <https://ja.wikipedia.org/wiki/フランクリン・ルーズベルト> (2022年4月30日閲覧)
- [48] Wikipedia, ウォーレン・ウィーバー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ウォーレン・ウィーバー> (2022年5月3日閲覧)
- [49] Wikipedia, ジェイムス・コナント, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジェイムス・コナント> (2022年5月3日閲覧)
- [50] Wikipedia, ロバート・オッペンハイマー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ロバート・オッペンハイマー> (2022年5月3日閲覧)
- [51] Wikipedia, Homer Dudley, https://en.wikipedia.org/wiki/Homer_Dudley (2022年4月7日閲覧)
- [52] Wikipedia, SIGSALY, <https://ja.wikipedia.org/wiki/SIGSALY> (2022年5月31日閲覧)
- [53] Wikipedia, ワンタイムパッド, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ワンタイムパッド> (2022年5月3日閲覧)
- [54] 釜賀一夫, 藤原邦樹, 吉村昭, “座談会日本陸軍暗号はなぜ破られなかったか,” 歴史と人物—太平洋戦争シリーズ—, 昭和60年冬号, 1985.
- [55] Wikipedia, Harry Nyquist, https://en.wikipedia.org/wiki/Harry_Nyquist (2022年5月7日閲覧)
- [56] Wikipedia, Ralph Hartley, https://en.wikipedia.org/wiki/Ralph_Hartley (2022年5月7日閲覧)
- [57] Wikipedia, ニコラ・レオナルド・サディ・カルノー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ニコラ・レオナルド・サディ・カルノー> (2022年6月6日閲覧)
- [58] Wikipedia, ジェームズ・プレスコット・ジュール, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジェームズ・プレスコット・ジュール> (2022年6月6日閲覧)
- [59] Wikipedia, エリウス・ロベルト・フォン・マイヤー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/エリウス・ロベルト・フォン・マイヤー> (2022年6月6日閲覧)
- [60] Wikipedia, ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ> (2022年6月6日閲覧)
- [61] Wikipedia, ルドルフ・クラウジウス, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ルドルフ・クラウジウス> (2022年6月6日閲覧)
- [62] Wikipedia, ジェームズ・クラーク・マクスウェル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジェームズ・クラーク・マクスウェル> (2022年6月6日閲覧)
- [63] Wikipedia, ルートヴィッヒ・ボルツマン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ルートヴィッヒ・ボルツマン> (2022年6月6日閲覧)
- [64] Wikipedia, エントロピー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/エントロピー> (2022年6月6日閲覧)
- [65] Wikipedia, カルノーの定理_(熱力学), [https://ja.wikipedia.org/wiki/カルノーの定理_\(熱力学\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/カルノーの定理_(熱力学)) (2022年6月7日閲覧)
- [66] Wikipedia, ウィラード・ギブズ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ウィラード・ギブズ> (2022年6月7日閲覧)
- [67] 植松友彦, 『イラストで学ぶ情報理論の考え方』, 講談社, 2012.
- [68] Wikipedia, アルフレッド・ヴェイル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/アルフレッド・ヴェイル> (2022年6月7日閲覧)
- [69] Wikipedia, Robert Fano, https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Fano (2022年8月4日閲覧)
- [70] Wikipedia, Shannon-Fano coding, https://en.wikipedia.org/wiki/Shannon-Fano_coding (2022年8月4日閲覧)
- [71] Wikipedia, David A. Huffman, https://en.wikipedia.org/wiki/David_A._Huffman (2022年8月4日閲覧)
- [72] Wikipedia, Abraham Lempel, https://en.wikipedia.org/wiki/Abraham_Lempel (2022年8月4日閲覧)
- [73] Wikipedia, Jacob Ziv, https://en.wikipedia.org/wiki/Jacob_Ziv (2022年8月4日閲覧)
- [74] J. Ziv and A. Lempel, “A Universal Algorithm for Sequential Data Compression,” *IEEE Transactions on Information Theory*, **23**, pp 337–343, 1977.
- [75] J. Ziv and A. Lempel, “Compression of Individual Sequences via Variable-Rate Coding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, **24**, pp 530–536, 1978.
- [76] 正島宏一, 高木重定, 折口社志, 鶴田祥一郎, 鈴木徹也, “モノからコトへ—新たな循環経済の形成—,” 日本LCA学会誌, **14**, pp. 173–177, 2018.
- [77] Wikipedia, Richard Hamming, https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Hamming (2022年12月20日閲覧)
- [78] 植松友彦, 『代数系と符号理論』, コロナ社, 2010.
- [79] R. B. Ash, *Information Theory*, John Wiley & Sons, 1965.
- [80] Wikipedia, ロックフェラー財団, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ロックフェラー財団> (2023年2月6日閲覧)

- [81] Wikipedia, Chester Barnard, https://en.wikipedia.org/wiki/Chester_Barnard (2023年2月20日閲覧)
- [82] Wikipedia, フレデリック・テイラー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/フレデリック・テイラー> (2023年2月26日閲覧)
- [83] Wikipedia, Louis Ridenour, https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Ridenour (2023年3月1日閲覧)
- [84] Wikipedia, Lee Alvin DuBridge, https://en.wikipedia.org/wiki/Lee_Alvin_DuBridge (2023年3月1日閲覧)
- [85] Wikipedia, Wilbur Schramm, https://en.wikipedia.org/wiki/Wilbur_Schramm (2023年3月1日閲覧)
- [86] Wikipedia, Joseph Doob, https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Doob (2023年3月3日閲覧)
- [87] Wikipedia, Ethical Culture Fieldston School, https://en.wikipedia.org/wiki/Felix_Adler (2023年3月3日閲覧)
- [88] Wikipedia, Felix Adler (professor), [https://en.wikipedia.org/wiki/Felix_Adler_\(professor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Felix_Adler_(professor)) (2023年3月3日閲覧)
- [89] Wikipedia, Marvin Minsky, https://en.wikipedia.org/wiki/Marvin_Minsky (2023年3月3日閲覧)
- [90] Wikipedia, Josiah Gibbs, https://en.wikipedia.org/wiki/Josiah_Gibbs (2023年3月3日閲覧)
- [91] Wikipedia, Norbert Wiener, https://en.wikipedia.org/wiki/Norbert_Wiener (2023年3月4日閲覧)
- [92] N. Wiener, *Ex-Prodigy: My Childhood and Youth*, MIT Press, 1953.
- [93] Wikipedia, Oswald Veblen, https://en.wikipedia.org/wiki/Oswald_Veblen (2023年3月4日閲覧)
- [94] F. Conway and J. Siegelman, *Dark Hero of the Information Age: In Search of Norbert Wiener, the Father of Cybernetics*, Basic Books, 2005.
- [95] F. Bello, Francis Bello Papers, Dolph Briscoe Center for American History, The University of Texas at Austin, https://txarchives.org/utcah/finding_aids/03964.xml (2023年5月3日閲覧)
- [96] Wikipedia, エドウィン・ハーバート・ランド, <https://ja.wikipedia.org/wiki/エドウィン・ハーバート・ランド> (2023年5月3日閲覧)
- [97] Wikipedia, エドワード・ミルズ・パーセル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/エドワード・ミルズ・パーセル> (2023年5月3日閲覧)
- [98] Wikipedia, John Robinson Pierce, https://en.wikipedia.org/wiki/John_R._Pierce (2023年5月3日閲覧)
- [99] Wikipedia, Bernard More Oliver, https://en.wikipedia.org/wiki/Bernard_M._Oliver (2023年5月3日閲覧)
- [100] B. M. Oliver, J. R. Pierce and C. E. Shannon, "The Philosophy of PCM," *Proceedings of the IRE*, **36**, pp. 1324–1331, 1948.
- [101] Wikipedia, ウィリアム・ショックレー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ウィリアム・ショックレー> (2023年5月3日閲覧)
- [102] Wikipedia, ジョン・バーディーン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョン・バーディーン> (2023年5月3日閲覧)
- [103] Wikipedia, ウォルター・ブラッテン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ウォルター・ブラッテン> (2023年5月3日閲覧)
- [104] Wikipedia, Betty Shannon, https://en.wikipedia.org/wiki/Betty_Shannon (2023年5月3日閲覧)
- [105] Wikipedia, Joseph Wenger, https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Wenger (2023年5月3日閲覧)
- [106] C. E. Shannon, "Programming a Computer for Playing Chess," *Philosophical Magazine, Series 7*, **41**, pp. 256–275, 1950.
- [107] Wikipedia, Loebner Prize, https://en.wikipedia.org/wiki/Loebner_Prize (2023年6月5日閲覧)
- [108] Wikipedia, チューリング・テスト, <https://ja.wikipedia.org/wiki/チューリング・テスト> (2023年6月5日閲覧)
- [109] Wikipedia, IBM Watson, https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Watson (2023年6月5日閲覧)
- [110] IBM, 「IBM Healthcare Special Interview: 「かつては1年かかっていたことが、30分に」新しい遺伝子医療を人工知能「IBM Watson」が支える」, <https://www.ibm.com/downloads/cas/ENYEDJK4> (2023年6月9日閲覧)
- [111] 山端宏実, 「IBMのWatsonが救った白血病患者の命、医師も驚いた意外な「難病の原因」とは」, *日経 xTECH*, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01107/112200001/> (2023年6月5日閲覧)
- [112] Wikipedia, Ponanza, <https://ja.wikipedia.org/wiki/Ponanza> (2023年6月9日閲覧)
- [113] Wikipedia, 将棋電王戦, <https://ja.wikipedia.org/wiki/将棋電王戦> (2023年6月9日閲覧)
- [114] Wikipedia, AlphaGo, <https://ja.wikipedia.org/wiki/AlphaGo> (2023年6月9日閲覧)
- [115] Wikipedia, Ray Kurzweil, https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_Kurzweil (2023年6月10日閲覧)
- [116] Wikipedia, 皮質脊髄路, <https://ja.wikipedia.org/wiki/皮質脊髄路> (2023年6月5日閲覧)
- [117] E. M. Guizo, "The essential message: Claude Shannon and the making of information theory," Master Thesis Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [118] Wikipedia, John McCarthy (computer scientist), [https://en.wikipedia.org/wiki/John_McCarthy_\(computer_scientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/John_McCarthy_(computer_scientist)) (2023年7月25日閲覧)
- [119] Wikipedia, Marvin Minsky, https://en.wikipedia.org/wiki/Marvin_Minsky (2023年7月25日閲覧)
- [120] Wikipedia, Danny Hillis, https://en.wikipedia.org/wiki/Danny_Hillis (2023年7月25日閲覧)
- [121] Wikipedia, Bert Sutherland https://en.wikipedia.org/wiki/Bert_Sutherland (2023年7月27日閲覧)
- [122] Wikipedia, Ivan Sutherland, https://en.wikipedia.org/wiki/Ivan_Sutherland (2023年7月27日閲覧)
- [123] Wikipedia, Robert G. Gallager, https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_G._Gallager (2023年7月27日閲覧)
- [124] Wikipedia, Leonard Kleinrock, https://en.wikipedia.org/wiki/Leonard_Kleinrock (2023年7月27日閲覧)
- [125] Wikipedia, Henry Earl Singleton, https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Earl_Singleton (2023年7月27日閲覧)
- [126] E. O. Thorp, *A Man for All Markets: From Las Vegas to Wall Street, How I Beat the Dealer and the Market*, Random House, 2017. (望月衛訳, 『天才数学者、ラスベガスとウォール街を制す一偶然を支配した男のギャンブルと投資の戦略—上』, ダイヤモンド社, 2019.)
- [127] A. M. Fleming, *Something for Nothing: A History of Gambling*, Delacorte Press, 1978.
- [128] J. Mazur, *What's Luck Got to Do with It? The History, Mathematics and Psychology of the Gam-*

bler's Illusion, Princeton University Press, 2010. (水谷淳訳, 『ギャンブラーの数学—運をうまく使いこなすにはどうしたらよいか?—』, 日本評論社, 2011.)

[129] Wikipedia, Gerolamo Cardano, https://en.wikipedia.org/wiki/Gerolamo_Cardano (2023年10月5日閲覧)

[130] Wikipedia, ジェロラモ・カルダーノ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジェロラモ・カルダーノ> (2023年

11月26日閲覧)

[131] Wikipedia, Ars_Magna_(Cardano_book), [https://en.wikipedia.org/wiki/Ars_Magna_\(Cardano_book\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ars_Magna_(Cardano_book)) (2023年11月26日閲覧)

[132] F. N. David, *Games, Gods, and Gambling: The Origins and History of Probability and Statistical Ideas from the Earliest Times to the Newonian Era*, Hafner Publishing Company, 1962.