

世界をORする視線 (4)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(2) 電話機の発明と電話網：その2

住田 潮

1. 電話機に関するトーマス・エジソンの貢献 [1]

トーマス・エジソンは傑出した発明家として知られ、生涯で 1,300 件を超える発明と技術革新を行った。1847 年、アメリカのオハイオ州に 7 人兄弟の末っ子として生まれ、7 歳のときに家族と共にミシガン州のポートヒューロンに引っ越し、そこで幼少期を過ごした。早熟な少年で、何にでも疑問をもち、算数の授業で「 $1 + 1 = 2$ 」と教えられても、「1 個の粘土ともう 1 個の粘土を合わせたら、大きな 1 個の粘土になるのに、なぜ、いつも $1 + 1 = 2$ なの？」と質問して先生を閉口させた。「なぜ物は燃えるのか」を知りたいと思い、藁を燃やして実験していたところ、自宅の納屋を全焼させてしまうという事件も起こしている。こうした事例が重なり、校長から「他の生徒の迷惑になる」と引導を渡され、入学から僅か 3 ヶ月で退学した。学校教育に馴染めなかったエジソンは、自宅での独学を通し、学歴は最後まで小学校中退であった。

1864 年、17 歳のエジソンはカナダのある駅で夜間電信係として働いた。何もなければ、一晩中、1 時間おきに勤務に就いていることを示す信号を送るだけの退屈な仕事であったが、時計を使って電信機が自動的に電信を送る機械を発明し、定時の電信を機械に任せて自分は寝ていた。寸分の狂いもなく電信が届くことに疑問をもった上司が様子を見に行ったところ、就寝中のエジソンを発見し、「お前が寝ていたら定時連絡の意味がないだろう」とこっぴどく叱られたという。これが、エジソンの最初の発明であった。

1868 年、21 歳のときに、電気投票記録機に関して彼

にとって初めての特許を取得した。議会における賛成票と反対票の数を押しボタンで瞬時に集計し、投票に掛かる時間を大幅に短縮することを意図したが、野党にとっては、牛歩戦術などの議事進行妨害ができなくなり、与党との交渉の余地が失われるという理由により、採用されなかった。この苦い経験を通して、人々の要望に応える発明でなければ何の意味もないことを学び、これ以後、実用性を重んじた発明を心掛けるようになる。翌年の 1869 年、株式相場表示機を発明し 2 番目の特許を取得した。この機械は業界から高い評価を受け、エジソンは 5 千ドル程度で特許権を売却するつもりであったが、実際には 4 万ドル（現在の日本円で約 2 億円相当）を提示され、腰を抜かすほど驚いたという。こうして、エジソンは発明家としての第一歩を踏み出した。

エジソンの電話機への取り組みは、当時、アメリカ大陸における電信事業を独占していたウエスタンユニオン社からの依頼によって始められた。電話機の送信側では、音波を電力に変換して送信するマイクロフォンが必要とされる。1876 年当時、ベルの発明した電話機では、マイクに向かって音を発すると、空気の振動がマイク内部の振動板を振動させ、これを電磁石によって電気信号に変換するダイナミック・マイクが採用されていた。しかし、ダイナミック・マイクは雑音を排除することができず、送話距離を伸ばすうえでも難点があった。ドイツ生まれで後にアメリカに移住した発明家ヘンリー・ベルリナー (Emile Berliner) [2] は、ベルの発明に魅せられてその改良に取り組み、1876 年にダイナミック・マイクの改良版に関する特許を取得する。ベル電話会社はこの特許を 5 万ドルで買い取り、自社の電話機に採用した。

これに対してエジソンは、カーボン・マイクロフォンを開発し、また電磁石の代わりに誘導コイルを用い

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

て送話距離を伸ばすことに貢献する。エジソンの発明の中には、本当にゼロからエジソンが構想したものなのか否かを判断することが難しいものが多いが、実用性を重んじた製品開発とその事業化、さらにその権利を守るための多くの訴訟において、エジソンが卓越した能力を発揮したのは確かである。このカーボン・マイクロフォンの開発・研究も例外ではなく、当初は、イギリスの発明家デイビッド・エドワード・ヒューズ (David Edward Hughes) [3] が先行していた。

カーボン・マイクロフォンは、2枚の金属プレートで炭素粉体を挟んだ構造をしており、それを媒介にして常に直流電流が流されている。発話者側のプレートは非常に薄く、振動板として機能する。音波を受けて振動板が振動すると、炭素粒子に掛かる圧力が変動し、圧力が高くなると炭素粒子は押しつけられ抵抗は低下する。この抵抗変化によって直流電流が変調を受け、音波の圧力変化を再現する。この変調電流が電話線を通して送信側に送られ、そこでスピーカーを通して音声に復元されることになる。これに関する特許は1887年にエジソンが最初に取得したが、ヒューズはそれより数年前から多くの目撃者の前でカーボン・マイクロフォンを実演しており、『マイクロフォン』という言葉造語したのも彼である。エジソンとは対照的にヒューズは特許を取得せず、自身の発明を世界への贈り物と見なした。

ベルリナーの特許を購入したベル電話会社に対し、エジソンはマイクロフォンと電話機の発明を巡って法廷闘争を繰り返したが、マイクロフォンに関しては「音声伝送においてはエジソンがベルリナーに先行していた。送話器にカーボンを用いるのは、論争の余地なく、エジソンの発明である」との連邦裁判所の判断が下され、ベルリナーの特許は無効と裁定される一方、電話機においてはベル電話会社が全面的に勝利した。しかし、実用性の観点からは、エジソンの開発したカーボン・マイクロフォンが抜きん出ており、1879年、ベル電話会社はエジソンのカーボン・マイクロフォンの特許をウエスタンユニオンから買い取り、これが長距離電話網の開発・推進に大きく貢献した。

2. 電話機以外のエジソンの貢献 [1]

エジソンは、電話機以外にも、蓄音器 (録音・再生装置)・電気鉄道・鉱石分離装置・電灯照明 (以上、1877年)、電球 (1879年)、発電機 (1880年)、改良型蓄音機 (1888年)、のぞき眼鏡式映写機キネトスコープ (1891年)、改良映写機ヴァイタスコープ (1897年)、

トースター (1910年) など、多くの発明を行った。いずれも実用性を重んじた点に特徴があり、白熱電球にしても、発明したのはジョセフ・ウィルソン・スワン (Joseph Wilson Swan) [4] であるが、彼の白熱電球は40時間程度の寿命しかなかった。エジソンはフィラメントの素材として数千種類を実験し、最後に京都府八幡村 (現・八幡市) の竹に行き着き、約1,000時間の寿命をもつ白熱電球を開発した。この竹を用いた白熱電球は約10年間続いた後、セルロースからタングステンへと改良された。エジソンの凄さは、電球、トースター、電気アイロンなどの消費者に役立つ製品を世に送り出す一方、それらの普及を図るべく配電システムを構築し、電力産業の事業化にも成功した点にある。

エジソンは、実用性を重んじる発明家であったが、科学的なテーマを追求する研究者ではなかった。そんな彼が発見した唯一の科学法則が、熱電子放出 (エジソン効果) である。1883年、白熱電球を研究中だったエジソンは、電球のガラスの内側が時間と共に黒ずんでしまう問題の解決に取り組んでいた。色々調べているうちに、白熱電球の中に電極につないだ金属板を入れ、電極と電球のフィラメントの間に正の電圧を加えると、直接接していないにもかかわらず、電極からフィラメントへと電流が流れ、逆に負の電圧を加えた場合には電流が流れない、という現象を発見した。これがエジソン効果であり、エジソン自身はこの現象に関する特許を取得したが、それ以上深く研究することはなかった。

このエジソン効果に大きな関心を寄せたのが、イギリスの科学者ジョン・アンブローズ・フレミング (John Ambrose Fleming) [5] である。フレミングは、電磁誘導に関し、「電流によって発生する磁場」と「磁場によって発生する電流」の関係をわかりやすく人間の手の形で表した「フレミングの右手の法則・左手の法則」で有名であるが、エジソン効果には整流の働きもあることに着目し、エジソンから譲り受けた実験球を使って研究を進め、1904年、二極真空管を発明する。真空管とは、内部を真空にして電極を封入した管球であり、エジソン効果によって陰極から陽極に流れる電子流を制御することにより、増幅、検波、整流、発振などを行うことができるため、半導体が登場するまで、さまざまな電気製品になくてはならない重要な部品となった。エジソン効果は、エジソンが考えた以上の大発見だったのである。

3. エジソン vs. テスラの電流戦争 [6]

エジソンは訴訟を恐れず、決心すると、良くも悪くも徹底して戦い抜く不屈の精神の持ち主であった。中でも有名なエピソードは、ニコラ・テスラ (Nikola Tesla) [7] およびウェスティングハウス・エレクトリック社と対立した送電網を巡る戦いである。エジソンの人柄を彷彿とさせるエピソードに事欠かない対立であり、技術革新の歴史において重要な転換点でもあったことから、ここで触れておくことにする。

1856年、オーストリア帝国 (現在のクロアチア西部) に生まれたテスラは、グラーツ工科大学で学んだが、父親の死を機に財政難から中退、プラハ大学に留学するも、コースの卒業証明は受けていない。1881年、ハンガリーのブダペストに移り、電信局に勤めるかたわら、交流電流方式の活用方法の探究を続けた。1882年にパリへ移動し、コンチネンタル・エディソン・カンパニーの技師の職を得た。そこで電気モーターに魅せられ、1882年、誘導モーターの開発に成功したが、ヨーロッパでは興味を示す企業が見つからず、1884年、ほとんど無一文の状態で渡米した。

渡米後、エジソンのエジソン電灯会社の求人を見つけて応募し、採用された。当時、同社は直流による電力事業を展開しており、一方、自分の研究成果に基づく交流による電力事業を提案したテスラは、エジソンと対立するようになる。エジソンは、直流用に設計された工場システムをテスラの交流電源で稼働させたら、褒賞として5万ドルを支払うと提案した。直流の優位性や安全性に加えて交流の難しさを考慮し、テスラを見くびったうえでの提案であったが、テスラはこれを成功させた。交流を認めたくないエジソンは、「冗談だった」として褒賞を支払わなかったため、テスラは激怒し、たった数ヶ月で退社してしまう。

当時、電動機は直流機のみであり、エジソンの直流送電システムは、主要な電力需要である白熱電球に適当な送電方式であったこともあり、アメリカの電力事業初期における標準方式として確立されていた。エジソンは直流送電の特許使用料を手放すつもりはなく、社会インフラとしての直流送電網の拡充を目指していたのである。一方、テスラは、自身の回転磁界の研究から交流の発電・送電・使用システムを考案して商業化を目指し、1887年4月、Tesla Electric Light Company (テスラ電灯社) を設立、独自に交流による電力事業を推進、同年10月に交流システムの特許を出願する。1888年、“A New System of Alternating Current Motors and

Transmissions” と題した論文を発表、同年5月のアメリカ電子工学学会でデモンストレーションを行い、これに感銘を受けたウェスティングハウス・エレクトリック社から研究費100万米ドルと特許使用料の支払いを提供された。

電線抵抗による送電電流の減衰は送電損失と呼ばれ、一般的に、昇圧によって電力効率は向上する。即ち、需要元 (都市部) に対し遠隔にある発電所から高電圧で送電し、需要元近傍で配電直前に家庭用電圧へ降圧することで、電力効率が良くなるのである。もう少し具体的に説明すると、金属電線には必ず電気抵抗があり、送電時に一部の電力はジュール熱として失われる。送電線の電気抵抗を R 、電流を I とすると、送電損失 R' は、 $R' = R \times I^2$ によって与えられる。一方、電力を P 、電圧を V とすると、電力は電圧と電流の積 $P = VI$ となる。したがって $I = P/V$ が成立し、同じ電力を送るときに、送電線に高い電圧を加えると、相対的に電流は低い値となり、送電損失を減少させることができる。たとえば、電圧を10倍にすれば、電流は $1/10$ 、送電損失 R' は $1/100$ になる。

エジソンの直流送電システムは、発電所、重い配電線、受電する需要家の電動機や照明器具などで構成されていたが、直流電流の電圧変換は電圧ごとに別々の架線を必要とし、架線や電力網の複雑化に伴うメンテナンス費用の増大などの問題があり、全システムを同じ電圧で作動させる方式を採用していた。電球製造の都合で電圧は100ボルトとされ、発電所から消費地までの送電損失による電圧降下を考慮し、発電機は110ボルトを発電した。それでも、低電圧による電圧降下は避けがたく、発電所と消費地の距離を半径800メートル以内に留めるか、高価な極太銅線を用いなければ、膨大な電力損失を生ずる状態にあった。

テスラが追求していた交流送電システムは、直流送電システムに比して発熱しやすく許容電流が低くなるという難点があったものの、変圧器によって容易に電圧を変えられるという長所をもっていた。端末機器は直流で機能する事実に対しても、交流から直流への変換回路「コンバーター」によって変流・変圧する技術は確立されており、高電圧による送電が保証する高い送電効率は、欠点を凌駕するものであった。後年、交流変圧器のさらなる進化で交流送電が圧倒的に有利になり、現在では100万ボルト級の送電が行われるまでになっている。

当時、既にルシアン・ゴラルド (Lucien Gaulard) [8] およびジョン・ディクソン・ギブズ (John Dixon

Gibbs) [9] の変圧器に関する特許を購入していたウェスティングハウス・エレクトリック社は、テスラの二相交流特許と組み合わせ、交流送電システムの確立に邁進することになる。劣勢に立たされたエジソンは、交流に対するネガティブ・キャンペーンを行うことを思い立つ。ニューヨーク市が絞首刑に代わる死刑執行方法を募集しているのを知ると、野良犬や野良猫といった動物に対し、交流発電機を用いて感電させ殺処分する実験を繰り返し、ついに電気椅子を考案して市に提案、その電源に交流が採用されるように動いた。その残虐性から、交流の評判を悪くすることを画策したのである。1890年、電気椅子による死刑が初めて執行されたが、必要な電圧が足りず、最初の電撃では重傷を負わせたものの処刑に至らず、電撃を繰り返さなければならなかった。そのニュースは新聞で広く報道されたが、リポーターは「恐ろしい光景だ。絞首刑よりはるかに悪い」と伝えた。人々の意識に残ったイメージは、エジソンが意図した「交流は怖い」というイメージではなく、「電気での処刑という残虐行為を首謀した恐ろしい人物はエジソンだ」というものであった。人々の間に起きた反応は、「交流であろうが直流であろうが電流は怖い、灯油の代わりに電気を使うのを止めて灯油に戻ろうか」といった反応であり、電気全体に対するネガティブ・キャンペーンとなってしまった。

エジソン vs. テスラの対決は、ナイアガラの滝を利用した発電システムの入札で決着を見る。直流発電・送電を骨子とするエジソン・ゼネラル・エレクトリック社とエジソンの提案に対し、交流発電・送電システムを主張したウェスティングハウス・エレクトリック社とテスラの案が、ナイアガラフォールズ委員会から契約を勝ち取ったのである。1893年、滝から電力を生成するためにテスラの技術を適用したナイアガラフォールズ発電プロジェクトが着手され、設備を完成するのに5年を要した。テスラの特許を使用した交流発電機は、ナイアガラの滝エドワード・ディーン・アダムズ発電所に、三相交流25サイクルの仕様でウェスティングハウス・エレクトリック社によって製作・設置され、その銘板にはニコラ・テスラの名前が刻まれた。ナイアガラ公園のアメリカ側には、現在もニコラ・テスラのブロンズの座像がある。一方、この対立の敗北でエジソンは屈辱を味わう。エジソン・ゼネラル・エレクトリック・カンパニーに出資し、株の過半をもち実質上のオーナーとなっていたJ・P・モルガンは、エジソンを見限り、エジソンは自分が設立した同社の社長の座を失い、会社とは無関係とされ、社名から自分の名

前も消されてしまった。

20世紀に入っても、なおいくつかの都市では直流送電網を採用していた。たとえばヘルシンキの中心部では、1940年代後半まで直流送電網があった。そのため都市部の直流送電網用に、水銀整流器による整流所で交流を直流に変換していた。ニューヨーク市の電力会社コンソリデーテッド・エジソン社は、20世紀初めに主としてエレベーター用として直流を採用した利用者のために直流の供給を続けたが、すべてマンハッタンに位置する残り1,600件の顧客に対し、2005年1月、年末までに直流送電を停止すると発表、2007年11月に送電が停止された。

晩年、エジソンは鉱山経営などにも手を出す失敗。高齢となって会社経営から身を引き、超自然的、オカルト的なものに魅せられ、研究所にこもり、死者との交信を可能にする霊界との通信機の研究を続けた。1914年12月に研究所が火事で全焼し、約200万ドルの損害を被ったが、臆せずその後も死者との交信について関心をもち研究を続けた。

エジソンは、自動車王のヘンリー・フォードとは生涯の友人であった。この2人が初めて会ったのは1896年のことであり、当時、フォードはエジソン電灯会社の社員であった。フォードが発明したばかりのガソリン自動車の説明をすると、エジソンはテーブルを拳で叩いて喜び、フォードを励ましたという。フォードは1967年、エジソンは1969年、それぞれ自動車殿堂入りを果たしている。1931年、エジソンは84歳でその生涯を終えた。エジソンの葬儀が催された10月21日、全米ではエジソンの功績を称え、彼の死を弔うため午後10時から1分間電灯が消されるというイベントが行われた。しかし、その情報が行き渡っておらず、突然の停電にパニックになった地域もあったという。

一方、テスラは、ウェスティングハウス社が彼のために設立した研究所を任され、さまざまなプロジェクトを牽引した。その中には、ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン (Wilhelm Conrad Rontgen) [10] が発見したX線を活用する装置の開発などもあり、テスラ自身も循環磁界を発見して超高周波発生器の開発に成功するが、ウェスティングハウス社技術陣の中で孤立し、1年で離れることになった。その後も、1891年には100万ボルトまで出力可能な高圧変圧器(テスラコイル)を発明し、1893年の無線トランスミッター、1898年の添加プラグなど、輝かしい成果を挙げ続け、1928年には、「フリバー (Flivver)」という名称の空中輸送装置の特許を得たが、これは垂直離着陸機(ティ

ルトローター式)の最初のものに当たる。

エジソンとの確執は生涯続き、エジソンの死に際しでのニューヨークタイムズのインタビューに対し、「ほんの少し理論を学び数学的計算を用いていたなら、彼の労力の90%は省けたであろうに、との残念な思いを抱きながら彼の活動を見守って来た。しかし彼は、本から学ぶことや数学的知識を全く無視し、発明家としての自分の直感や実用的なアメリカ人的感覚のみを信じていた」と否定的なコメントを残している。典型的な実験科学者であったエジソンに対し、テスラは理論科学者であり、2人の研究手法が全く異なっていたことを改めて実感させるコメントであった。

テスラは生涯を独身で通し、晩年には金銭苦に陥り、ほぼ無一文の状態、1943年1月7日、マンハッタン・ニューヨーカー・ホテルで死去した。享年86歳。数トンの重量に及ぶとされる彼の発明品や設計図はFBIに押収され、その後、複製されて母国に返還された。原版は、ベオグラードのニコラ・テスラ博物館に保管された。磁束密度の単位名にテスラの名を用いることが選ばれたことからわかるように、死後、テスラは高い再評価を受けるようになる。1975年、IEEEは、テスラの名前を冠した「IEEEニコラ・テスラ賞」を設ける。母国セルビアでは、科学技術の発展に著しく貢献したとして、テスラの肖像が100デナール通貨に刻まれている。1999年には、LIFE誌の「この1,000年で最も重要な功績を残した世界の人物100人」に選ばれ、2003年には、ニコラ・テスラ博物館に保管されたテスラが遺した技術開発にまつわる資料類が、ユネスコの記憶遺産に登録されている。また、テスラへの賞賛を込めて、アメリカの電気自動車メーカーがその社名を「Tesla」としたことも記憶に新しい。

4. 技術革新の相補性と排他性

ベルリナーの特許に基づくベル電話会社の改良版ダイナミック・マイクに対し、ヒューズが先行研究を行いエジソンがその実用性を完成させたカーボン・マイクロフォンは、前者のシステムの中に後者を取り込むことが可能であったという点で、相補的な技術革新であった。一方、エジソンの直流送電システムに対するテスラの交流送電システムは、社会基盤としてどちらを選択するかという二者択一を突きつけたのであり、排他的な技術革新と呼べるものであった。これは、どのような技術革新にも付いて回る特徴であり、以下に技術革新の法則(6)として纏めておく。

技術革新の法則(6) 相補性 vs. 排他性：既存技術の体系に対し、技術革新は相補的であるか排他的であるかに大別される。相補的であるとは、新規技術が既存技術の体系の中で機能性を発揮できることを意味する。一方、排他的な技術革新は、機能性を発揮する体系そのものの全面的な刷新を必要とする。

前号で論じた技術革新の法則(5)が、ネットワーク外延性に関連して、インフラの整合的転移と非整合的転移を問題としているのに比し、技術革新の法則(6)は、同様の概念をより一般的な技術革新へと拡大したものと考えることができる。相補性 vs. 排他性は、必ずしも革新性のジャンプの度合によって類別されるものではないことを注意しておく。たとえば、後に議論される真空管から半導体への技術革新は、ジャンプの度合は極めて大きい、相補的である。一方、旧画像複製技術であるBeta vs. VHSの対立は、技術水準の違いに大差はないが、互いに排他的である。

5. 目的論的技術革新と偶発的技術革新

スワンの白熱電球が40時間程度の寿命しかなかったことに対し、エジソンはフィラメントの素材として数千種類を実験し、最後に京都府八幡村の竹に行き着き、約1,000時間の寿命をもつ白熱電球を開発した。一方、電球のガラスの内側が時間と共に黒ずんでしまう問題の解決に取り組んでいたエジソンが、白熱電球の中に電極につないだ金属板を入れ、電極と電球のフィラメントの間に正の電圧を加えると、直接接していないにもかかわらず、電極からフィラメントへと電流が流れ、逆に負の電圧を加えた場合には電流が流れない、というエジソン効果を発見したのは、偶発的であった。この二つの事例は、技術革新における典型的なパターンを代表しており、以下に技術革新の法則(7)として纏めておく。

技術革新の法則(7) 目的意識性 vs. 偶発性：技術革新は、「ある明確な現象に対し、それを出現せしめている規定原理を明らかにしようという目的意識的な努力から生まれる技術革新」と、「全く新しい現象を偶発的に体験し、そこから派生的に生まれる技術革新」とに大別される。前者を目的論的技術革新、後者を偶発的技術革新と呼ぶことにする。

エジソンの白熱電球の例に見られるように、目的論的技術革新は、解決すべき課題を明確に意識している

ことに起因して、連続的な発展をもたらす。一方、偶発的技術革新の例であるエジソン効果では、発見者のエジソン自身は特許を取得したものの、その潜在的可能性に気付かなかった。エジソン効果の整流機能に着目し、さらに追求して「エジソン効果によって陰極から陽極に流れる電子流を制御することにより、増幅、検波、整流、発振などを行うことが可能である」という事実を発見、真空管の開発に結びつけたのはフレミングであった。このことは、「偶発的技術革新⇒目的論的技術革新」という連鎖が、非連続的な技術革新をもたらすという法則性を示唆する。本連載でも、技術革新の法則(7)に示された目的論的技術革新と偶発的技術革新を常に意識しつつ、議論を進めることにする。

参考文献

[1] Wikipedia, トーマス・エジソン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/トーマス・エジソン> (2020年9月1日閲覧)

- [2] Wikipedia, Emile Berliner, https://en.wikipedia.org/wiki/Emile_Berliner (2020年9月1日閲覧)
- [3] Wikipedia, デイビッド・エドワード・ヒューズ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/デイビッド・エドワード・ヒューズ> (2020年9月1日閲覧)
- [4] Wikipedia, ジョゼフ・スワン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョゼフ・スワン> (2020年9月1日閲覧)
- [5] Wikipedia, ジョン・フレミング, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョン・フレミング> (2020年9月1日閲覧)
- [6] Wikipedia, 電流戦争, <https://ja.wikipedia.org/wiki/電流戦争> (2020年9月1日閲覧)
- [7] Wikipedia, ニコラ・テスラ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ニコラ・テスラ> (2020年9月1日閲覧)
- [8] Wikipedia, ルシアン・ゴラーレル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ルシアン・ゴラーレル> (2020年9月1日閲覧)
- [9] Wikipedia, John Dixon Gibbs, https://en.wikipedia.org/wiki/John_Dixon_Gibbs (2020年9月1日閲覧)
- [10] Wikipedia, ヴィルヘルム・レントゲン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヴィルヘルム・レントゲン> (2020年9月1日閲覧)