

世界をORする視線 (2)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(1) 電気通信網の確立

住田 潮

1. 第I部の概要

図1は、通信システムの発展とコンピュータシステムの発展とを概略的に図示したものである。電気通信・電話に端を発する通信技術の発展が1970年代半ばにコンピュータを中心とするデジタル技術の発展と交錯し、現在に至るまでの転換点を列記している。

本連載の第I部では、この図に沿って通信・デジタル技術の発展経路を辿り、そこから産み出され、なお現在に至るまで影響を及ぼしている技術革新の慣性力について考察する。特に、ICT (Information and Communication Technology) の技術革新における平面化の問題、プロセス自動化の原動力、世代間の整合性、物理的システムと論理的システムの独立性、並列性の促進、ダウンサイジング、ネットワーク化などのテーマに着目する。また、近年、注目されているネットワーク外延性 (Network Externalities) や収穫増の法則も、こうした技術発展のかなり早い段階で萌芽的に見られていたのであり、本連載では、現在に繋がる技術発展の方向性を『技術革新の法則 (n)』として、その法則性の端緒が見い出される都度、提示することにする。第I部の終わりに、改めて『法則 (n)』を纏め、第II部で、図1の右上に示したICTに関する現在の課題を考察する際の多次元座標系として資することを目指す。

2. 電気通信の黎明期

電話に先立つ電気通信の開発は、1800年、イタリアの物理学者アレッサンドロ・ジュゼッペ・アントニオ・アナスタージオ・ヴォルタ (Alessandro Giuseppe

Antonio Anastasio Volta) [1] による電池の発明にまでさかのぼる。当初、塩水を入れたワインゴブレットに2種類の金属電極を入れて一つの電池とし、それらを直列に繋いで実験を行っていたが、その後、亜鉛と銅の2種類の電極を使い、電解液には硫酸または塩化ナトリウムと水を混ぜた食塩水を用いて、世界初の化学電池の開発に成功した。これにより、実験用の直流を発生させることができるようになった。当時、唯一の電気発生源として知られていた静電気発生器の一時的な放電に比べ、さまざまな効果を生み出す低電圧電流を発生させることが可能となり、通信手段に電気を利用するための実験が数多く行われるようになった [2]。

特筆すべき成果としては、1809年、解剖学者であり物理学者でもあったドイツ人サミュエル・トーマス・フォン・ゼーメリング (Samuel Thomas von Soemmering) [3] が行った実験が挙げられる。複数本の電線を使い (最大35本)、それぞれの電線がラテン文字や数字に対応し、受信側では、各電線に対応して酸を入れた試験管を用意、電線の先端を試験管に浸して置く。送信側で、メッセージの文字列に従って次々と対応する電線に電流を流すと、受信側では電流の流れている試験管で電気分解が起き、水素の気泡が発生するので、それを順番に読み取ることでメッセージを解読する仕組みである。これは電気通信の最初の本格的な成功という意味で画期的なものではあったが、電線は数キロの長さが限界で、メッセージの転送速度も非常に低く、さらに、文字の種類のみならず電線が必要となるため、長距離伝送には多大なコストがかかるなど、多くの欠点を抱えていた。

その後も、電気通信の開発は欧米各地で継続された。1816年、フランシス・ロナルド (Francis Ronalds) [4] が電信システムを構築。ガラス管で被覆した電線を使い、裏庭に建設した二つの木の格子の間にその電線を

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

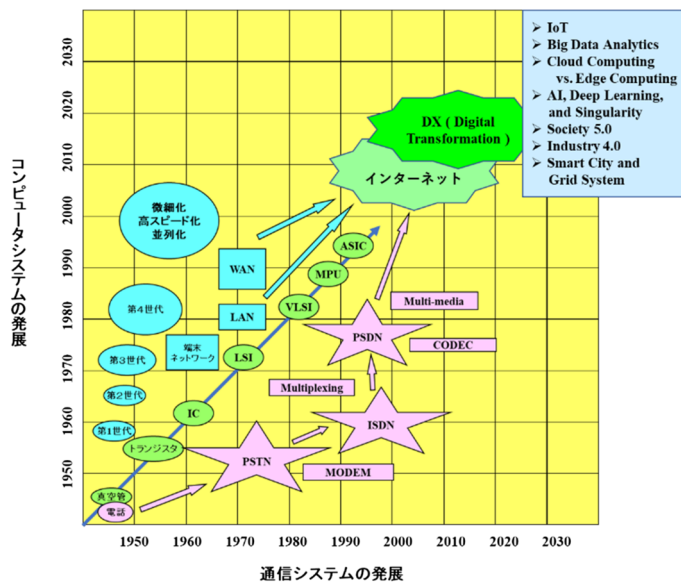


図 1

かけて 8 マイル (12.8 km) の伝送路を作り、これに高い電圧を印加することで電気信号の伝送に成功した。送受信機としては、数字と文字が並んだダイヤルを用いた。

1825 年、イギリスのウィリアム・スタージャン(William Sturgeon) [5] は、ニス塗った鉄片に絶縁した導線を巻いた電磁石を発明し、電流で磁力を強化することができるようになった。1829 年、アメリカのジョセフ・ヘンリー (Joseph Henry) [6] は導線を何重にも巻くことによりさらに強力な電磁石を開発、抵抗値の高い長い導線上での電信を可能にした。

電磁石を活用した電信機の発明は、1832 年、ポール・シリング (Paul Ludwig Schilling von Cannstatt) [7] によってなされた。送信機は電流を制御する 16 個の黒鍵と白鍵のキーボードからなり、受信機には 6 個の検流計がついており、その磁針は絹糸で吊るされていた。送信機と受信機は 8 本の導線で接続され、6 本はそれぞれの検流計に、また残りの 2 本は回送電流と信号ベルに接続されていた。送信局でオペレータがキーを押すと、受信局で対応するポインターが動く仕組みであった。黒鍵と白鍵の組み合わせで、文字や数字を表していたが、その後改良され、両局を繋ぐ導線は 8 本から 2 本に減った。

3. 電信機開発におけるガウスの貢献

数学者、天文学者、物理学者でもあったドイツの知の巨人、ヨハン・カール・フリードリヒ・ガウス (Johann Carl Friedrich Gauß) [8] は、電信機の開発でも大き

な貢献をなしている。1777 年、ブラウンシュヴァイクに生まれたガウスは、代数学の基本定理、整数論、複素数論など、多岐にわたる数学の分野で巨大な足跡を残した。天文学の分野でも最小自乗法を確立し、天体観測の誤差評価に新局面を拓くと同時に、ある仮定の下で観測誤差が正規分布に従うことを初めて示し、今日、確率微分方程式や機械学習の分野で重要な役割を果たすガウス過程へ繋がる道を拓いた。1807 年には、ゲッティンゲンの天文台長に就任し、そこでも測定用機材の開発 (ガウス式レンズの設計)、楕円関数の惑星の摂動運動への応用、力学における最小作用の法則の定式化の一つである「ガウスの最小拘束の原理」など、数々の発見を行っている。

地球磁気の研究に関連しては、フーリエ級数展開の高速な計算方法を開発し、後に FFT (Fast Fourier Transform) として知られるようになる方法と本質的には同じ内容を、当時、既に確立していた。さらに、電磁気学の分野では、1831 年に、ゲッティンゲン大学の物理学教授であったヴィルヘルム・エドゥアルト・ヴェーバー (Wilhelm Eduard Weber) [9] と共著を出版し、ガウスの定理・ガウスの法則・ガウス (磁束密度の単位)・ガウス単位系など、彼の名に因む業績に象徴されるように、大きな貢献をなした。

このヴェーバーとの交流が、ガウスを電信機の開発へと導く。1833 年、二人は高感度な検流計と電流の向きを変更するための整流子を独自に考案し、それらを組み合わせて、送信側で整流子の向きをセットすると遠隔地にある受信側で針がその向きに振れるように工

夫された電信機を開発した。当初は時刻合わせのために電信機を使用した。その後すぐほかの信号にも、さらにはアルファベットにも対応できるように改良する。誘導コイルを永久磁石に対して上または下に動かすことで正および負の電圧パルスを生じさせ、そのコイルを、整流子を經由して伝送用の導線に繋ぎ、2 値の符号でアルファベットを表現したのである。さらにガウスは、ボルタ電池ではなく電磁誘導の起電力を利用することにより、一分間に7 文字の信号伝送という、当時としては飛躍的に大きい伝送速度を実現した。

4. 継伝器（リレー）の発明から電信網へ

1835 年、ジョセフ・ヘンリーが継伝器（リレー）を発明し、長い導線上の弱電流でも強力な電磁石を制御できるようになり、電信機の開発はさらに加速された。これを受けて、1837 年、イギリスの発明家ウィリアム・フォザーギル・クック (William Fothergill Cooke) [10] によって、電信の最初の商業化が実現した。同年、クックはチャールズ・ホイートストーン (Charles Wheatstone) [11] と共に警報機としての電信機の特許を取得し、ロンドンのユーストン-カムデン・タウン間での実演に成功した。そのシステムは 1839 年 4 月 9 日に、パディントン駅からウェスト・ドレイトンまでの間、約 21 km にわたってグレート・ウェスタン鉄道の線路を利用して敷設された。1845 年にソルト・ヒルで殺人事件が発生し、「容疑者が 7:42 スラウ発、ロンドン行の一等車両に乗車、脚まで届く茶色のクウェーカー教徒のコートを着用している」旨、スラウ駅からパディントン駅へ電信が送られ、容疑者は逮捕された。殺人犯逮捕に電信が役立った最初のケースという逸話が残されている。

アメリカでは、サミュエル・フィンリー・ブリース・モールス (Samuel Finley Breese Morse) [12] とアルフレッド・ルイス・ヴェイル (Alfred Lewis Vail) [13] が電信を発展させた。1825 年、画家でもあったモールスは、ワシントン D.C. でラファイエット侯爵の肖像画を描いているとき、父からの使いが馬で到着し、「妻危篤」のメッセージを伝え聞いた。すぐさまニューヘイブンに向かったが、到着したときには既に埋葬が済んだ後だった。妻の最期を看取れなかったことを悔いたモールスは、高速な長距離通信手段の研究を始めたという。

モールスは、電磁石の導線を延伸させ、一方の端で電流を断続させた場合、反対側の電磁石の磁気に変化する結果として信号を送ることができると着想し、長

短二つの組み合わせで構成された欧文、数字などを表現する信号法を発明した。1837 年、モールスと出会ったエンジニアのヴェイルは電信実験に興味をもち、発明の権利を分かち合う見返りとして特許獲得の費用を負担すること、実験装置の開発に協力することをモールスに申し出る。この結果、鉄工所を営んでいたヴェイルの父親による経済的支援の下で開発チームが結成され、1838 年、公式に電信実験に成功した。

初期のモールス電信機は単語と数値の対照表を用い、dot (トン) と dash (ツー) の組み合わせで、語 (word) や句 (phrase) を符号化していた。これを、文字 (character) 符号として改良したのはヴェイルである。実用化に際して利用の簡便さを追求したヴェイルは、文字の使用頻度と符号の組み合わせについて調べたうえで、文字符号を決定した。その後、多くの改良・変更を経たものが現在のモールス符号である。

モールスの電信機は、当初の設計では電磁石も使っておらず、わずか 40 フィート (約 12 メートル) しか届かなかった。これに独自の強力な電磁石を考案し、継電器も活用して、現実的な電信網への道を拓くことに貢献したのもヴェイルである。また、モールスとヴェイルは、初期には、発信側のオペレータが電鍵で電流をオン・オフさせ、受信側ではそれを人間の聴き取れる音にスピーカーで再生し、オペレータがモールス符号を紙とペンを用いて書き写し、その後、その符号列を読んで解釈する方式を採用した。間もなく、受信側のオペレータは、信号音を耳で聴いて直接文字列に変換する技術を習得する。さらに、信号音から自動的に文字列を印刷するテレプリンターと呼ばれる装置が開発され、モールスとヴェイルによる電信システムの実用性が飛躍的に高まった。

1844 年、アメリカ合衆国議会在承認し費用を供出したワシントン D.C.-ボルチモア間の公開電信実験において、モールスに協力したヴェイルは、アメリカ最初の電文である「What hath God wrought」(神の作り給いし業)を受信し、電信の実用化を証明した。1845 年には、ランカスター-ハリスバーグ間を結ぶアメリカで初めての商用電信線が敷設され、1846 年 1 月 8 日に開通した際の最初のメッセージは “Why don't you write, you rascals?” (いたずら小僧諸君、書き取りたまえ!)であった。

5. 電信網の北米大陸・大西洋横断 [2]

モールスとヴェイルの電信システムは、その後 20 年の間に、素早く広まっていった。1861 年、北米大陸を

またいで、東部の電信網の拠点オマハとカリフォルニアの小規模な電信網の拠点カーソンシティが、ソルトレイクシティを經由して接続された。このシステムを用いて最初に電報を送ったのは、当時ユタ準州知事を務めていたプリガム・ヤングで、ユタ準州はアメリカ合衆国から離脱しないと明言するものだった。

カーソンシティは、史上最も長い電報が発信されたことでも知られている。1864年、南北戦争中の大統領選挙で、共和党はエイブラハム・リンカーンの再選を確実にするため、ネバダ準州をネバダ州に昇格させることを急いだ。そこで、アメリカ議会の承認に必要な文書を電信で送り、議会ですぐに可決しリンカーン大統領が署名する手筈を整えた。東海岸へ向かう鉄道はネバダから2,000マイル(3,200キロメートル)も離れており、駅馬車で郵送した場合は3週間以上も掛かり、間に合わなかったのである。文書が送信されたのは1864年10月31日のことで、投票日である1864年11月7日の8日前であった。実際の選挙では、ネバダの票がなくともリンカーンは快勝できるだけの票を集め、対立候補であるジョージ・マクレランはわずか3州を獲得しただけだった。

1857年に着手された大西洋を横断するケーブル[14]の敷設工事は、ケーブルの途中切断、暴風雨、信号電流の漏洩によるケーブル被覆のコンデンサー化など、さまざまな理由により失敗を繰り返したが、1866年、5度目の敷設工事で2本の海底ケーブルの敷設に成功し、通信事業を開始した。このケーブルは商業的にも成功し、最初の半年で2万9千ポンド、次の半年で43万ポンドの収入を得た。

6. 初期の世界と日本の電気通信網[2]

アメリカでの電信線の総マイル数は、1846年には40であったが、1850年には12,000、1852年には23,000と拡大した。ヨーロッパでは1849年に2,000だったものが1869年には110,000となっている。10語を送るコストは1850年には1.55ドルだったが、1870年には1ドル、1890年には40セントに低下した。ユーストン駅で最初に設置されてからわずか29年で、南極以外の全大陸に電信網が広がり、史上初めて高速な世界的通信網が誕生した。

現存する国産最古の電信機としては、佐賀藩精錬方において1864年(元治元年)頃に製作されたと思われる国指定重要文化財の指字電信機(エーセルテレカラフ)があり、現在は長崎県諫早市が所蔵している。当時の国内技術水準を知るうえで、貴重な物である。日

本初の公式な送受信記録は、1854年のペリーの2度目の来日の際に、米大統領ミラード・フィルモアから江戸幕府へ1/4サイズの蒸気機関車と共に贈られた「エンボッシング・モールス電信機」によるものであった。エンボッシング・モールス電信機は、受信側で信号が紙テープへ記録されるもので、この電信機のセットで約1マイル(1.6km)の電線を用いて送信された。このときの電文は、「YEDO, YOKOHAMA」(江戸、横浜)であった。

その後は、幕末の混乱の中でしばらく電信の普及はなかったが、明治維新後の1869年、英国の通信技師を招き横浜燈台役所と横浜裁判所の間に電信回線が敷設され、プレゲ指字電信機(モールス信号ではなく針で文字を指す方式)による通信が始められた。1870年1月には、東京・横浜間で電信による電報の取り扱いが始まった。明治政府は電信網の整備に力を入れており、東京・横浜間の電報の取り扱いが開始されてから数年で、電信網は全国に張り巡らされた。

1871年、デンマークの大北電信会社によりロシアのウラジオストクから長崎へ海底ケーブルが敷設され、シベリア経由でヨーロッパ、さらには大西洋横断電信ケーブルを経て米国とも通信が可能となった。1871年11月に欧州へと出発した岩倉使節団は、不平等条約の改正交渉の経過報告を、このできたばかりの回線を使い行った。その後電信網は全国に広がり、1880年頃には大都市間、1890年頃には全国の県庁所在地が繋がった。1879年には官報、事務報、私報を合わせ165万通の電報が打たれた。

7. 技術革新の法則(1)平面化効果の法則

電信技術の開発へ向けた情熱は、『遠距離への情報伝播のスピードを上げ、人とモノの物理的移動を減少させる』ことが、具体的な価値を生むまでに社会システムが発展しつつあったという事実裏打ちされている。同時に、コミュニケーションを電信技術で代替させることにより、人と人との関係が希薄化し、信頼関係を構築することがより難しくなるという『失われる側面』も生じた。このmerit-demeritの関係を、今後、技術開発の動向に関する考察を進めるための一つの軸とすべく、以下の法則に纏めておく(図2)。

技術革新の法則(1)平面化効果の法則: ICTは、遠くに在るものを近くに引き寄せ、近くに在るものを遠くへ押しやることによって、すべてを平面化して処理する特徴をもつ

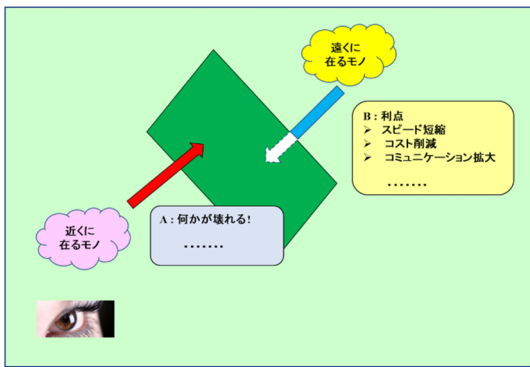


図 2

ICTによる技術革新を論じる際、多くの場合、『遠くに在るものを近くに引き寄せる』ことによって得られる利点と、必要とされる投資費用を比較して検討する費用対効果分析に主眼が置かれ、『近くに在るものを遠くへ押しやること』によって失われる側面があることを見過ごしがちである。技術革新の法則(1)は、ICT化によって得られる利点を最大限に活かすと同時に、ICT化によって失われる側面があることを常に意識し、その影響を最小限に押さえ込むような補填策を考えるべきであることを示唆する。

筑波大学時代の研究室の学部・修士・博士の教え子たちは、うしお会なるOB・OG会を組織し、筆者が定年退職後も年に一度の交流会を催している。時流に関する筆者の講演を聴き、世界について考える刺激を得る場であると同時に、卒業生間の情報交換の場であり、社会的な人的ネットワークを形成する場としても機能している。例年であれば、筑波大学のキャンパスで行われるが、今年は新型コロナウイルスの影響で、WEB会議として開催された。40名程度の卒業生が参加したが、日本各地だけでなく、スペイン、シンガポール、上海、サンフランシスコなど、世界に散らばり活躍する教え子たちが一同に会し、活発な議論を交わすことができたことに、改めてICTの威力を思い知らされた。しかし、例年であれば終了後の懇親会で、膝を交え表情を読み取りつつ交わされる、会社での悩み、家族構成の変化、欠席者の消息などに関するコミュニケーションが、完全に欠落してしまったことも事実である。

この経験は、技術革新の法則(1)を反映している典型例で、新型コロナウイルス以後のビジネス社会において、テレワークが常態化する方向へ移行する際に、深く考えるべき問題を提示している。『議論を交わし、議論を導き、意思決定を行う』通常のWEB会議に加え、相手の息づかいを感じながらの議論を通して醸成

される知的創造や、雑談や何気ない仕草を通して培われる仲間意識(ビジネス・パートナーシップやチームワーク意識)を補填するWEBコミュニケーションを如何に成立させるかという課題は重要である。

電信網の確立を目指していた時代に比し、ハード・ソフト両面での驚くべき技術発展に支えられ、充実した社会基盤をもつ現代社会においても、技術革新の法則(1)が示唆する問題は、本質的に同じである。ネット販売・購入における消費者行動やマーケティング戦略の変化、IoT化によるバリュー・チェーンの構造的変化、電子マネーによる決済システムなど、ICTによる技術革新のあらゆる場面で、技術革新の法則(1)は立ち現れるのであり、今後とも、この点を意識して論究を進めて行くことにしよう。

8. 技術革新の法則(2) プロセス自動化法則

モールスとヴェイルの電信システムにおけるテレプリンターの開発に関して、現在、盛んに喧伝されているRPA(Robotic Process Automation)の萌芽的内容をもつ、もう一つの技術革新の法則を見出すことができる。この電信システムの受信側の変化を時系列に沿ってまとめて見ると、以下の3段階に分けられる。

第1段階：発信側のオペレータが電鍵で電流をオン・オフさせ、受信側のオペレータは、それをスピーカーで再生される音として聴き取り、紙とペンを用いてモールス符号を書き写し、その後、その符号列を読んで解釈する方式

第2段階：、受信側のオペレータは、信号音を耳で聴いて直接文字列に変換し記述する方式

第3段階：信号音から自動的に文字列を印刷するテレプリンター装置を活用する方式

第1段階から第2段階への推移は、受信側のオペレータの技術的成熟によって支えられている。ここまでの段階では、システムの効率性は、オペレータの恣意性と資質に大きく依存する。何らかの事情でオペレータが所定の場所を離れば、システムは即座にストップするし、伝達情報の正確さは、オペレータの技術的成熟度によって左右されてしまう。また、膨大な繰り返し作業が必要とされることも、システムの効率性に影を落とす。

第2段階から第3段階への推移では、テレプリンター装置の導入によりオペレータを排除し、上述した難点をすべて克服している。この過程には、より一般的な、プロセス自動化を不可避免的に促す構造が隠されており、技術革新の法則(2)として、以下のように纏

めておく。

技術革新の法則 (2) プロセス自動化法則：①人の恣意性が影響を与える余地が大きく、②反復性が高く、膨大な作業量を必要とし、③ハード・ソフトの活用で制御可能なプロセスは、ICT によって自動化される

プロセス自動化の背後にあるもう一つの重要な課題は、『システムが人間の仕事を奪う』という問題である。テレプリンター装置によって多くのオペレータが職を失ったという事実は、AI によって失われる仕事は何かという議論と全く同じ構造をしている。この問題は避けて通れないものであり、短期的には、旧システムから新システムへの推移に伴う痛みを、可能な限り小さくするべく努力するほかはない。一方、中長期的には心配する必要のない問題であり、サービス産業を中心に、新しい環境に即した新しい産業が生成されて行くであろうことは確実である。そうした人間の適応力、創造力は、歴史が証明している。最後に、技術革新の法則 (2) は、プロセス自動化の十分条件を示しているに過ぎないことを注意しておく。すなわち、人間にとって極めて危険な作業であるなど、プロセス自動化を促す要件は、ほかにも存在する。

参考文献

[1] Wikipedia, アレッサンドロ・ボルタ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/アレッサンドロ・ボルタ> (2020 年 9 月

- 1 日閲覧)
[2] Wikipedia, 電信, <https://ja.wikipedia.org/wiki/電信> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[3] Wikipedia, Samuel Thomas von Sömmerring, https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Thomas_von_Sömmerring (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[4] Wikipedia, Francis Ronalds, https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Ronalds (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[5] Wikipedia, ウィリアム・スタージャン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ウィリアム・スタージャン> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[6] Wikipedia, ジョセフ・ヘンリー, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョセフ・ヘンリー> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[7] Wikipedia, Paul Ludwig Schilling von Cannstatt, https://en.wikipedia.org/wiki/PaulLudwig_Schilling_von_Cannstatt (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[8] Wikipedia, カール・フリードリヒ・ガウス, <https://ja.wikipedia.org/wiki/カール・フリードリヒ・ガウス> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[9] Wikipedia, Wilhelm Eduard Weber, https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[10] Wikipedia, William Fothergill Cooke, https://en.wikipedia.org/wiki/William_Fothergill_Cooke (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[11] Wikipedia, チャールズ・ホイートストン, <https://ja.wikipedia.org/wiki/チャールズ・ホイートストン> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[12] Wikipedia, サミュエル・モールス, <https://ja.wikipedia.org/wiki/サミュエル・モールス> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[13] 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> (2020 年 9 月 1 日閲覧)
[14] Wikipedia, 大西洋横断電信ケーブル 5 度目の敷設工事 (1866 年), [https://ja.wikipedia.org/wiki/大西洋横断電信ケーブル#5度目の敷設工事\(1866~年\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/大西洋横断電信ケーブル#5度目の敷設工事(1866~年)) (2020 年 9 月 1 日閲覧)