

「蒸気コンピュータ ～ 19世紀の挑戦～」



放射線腫瘍学教室 非常勤講師

(関西福祉科学大学 保健医療学部 教授)

上杉 康夫

1. 蒸気コンピュータ

蒸気を使ったコンピュータとして19世紀に解析機関(A analytical engine)という名称でチャールズ・バベッジ(Charles Babbage : 1791年12月26日 - 1871年10月18日、生年には異論があり1790年説1792年説がある^{※13}) (図1)^{※1, 2}によって考案されましたが、完成することはありませんでした。そして本稿記載中の現在、ロンドン科学博物館(Science Museum, London)で19世紀当時の設計図を用いて解析機関が作成されています^{※3}。

今日の電子式コンピュータはおおむね20世紀に入り、1937年にシャノンによってスイッチ回路(リレー)を使用した論理回路が作られ^{※4}、さらに実用第1号のコンピュータとして1946年に開発された18,800本の真空管を使用したENIACです^{※5}。今日のコンピュータへと直接繋がっているのは1930～40年代に開発された上記の複数のコンピュータです^{※5}。

さて、解析機関の基になったのは階差機関

(Difference engine)で、歯車を用いた機械式用途固定計算機です。階差機関は18世紀にドイツで考案されました。この階差機関は一旦忘れられ、1822年にイギリスの数学者・哲学者・計算機科学者であるバベッジによって再発見(再発明)されました^{※6}。

バベッジが作ろうとした階差機関は、数表を計算しながら印刷することを目的としていました。さらにバベッジは階差機関を発展させ解析機関の開発に着手しました。

この解析機関が、蒸気で動く歯車使用の機械式汎用コンピュータと考えられます。解析機関の設計は現代の電子式のコンピュータの構成によく似ています。解析機関はメモリと計算ユニットを分離し、プログラマブルであり、穴明きカードからデータと命令を取り込み、結果は印刷し、カードにパンチし、グラフを書くことができたものでした。また、計算は条件により別の処理が可能で電子式のコンピュータのプログラムの「IF_THEN」が可能でした。命令のグループを指定した回数だけ繰り返し実行する「ループ」ができ、サブルーチンの機能がありました。今日のコンピュータと同じ構成を半導体も真空管もリレーも使用せずに、19世紀に蒸気と歯車を使い設計されました。階差機関が機械式用途固定計算機にとどまっていたのに比べ、解析機関は現在のコンピュータと基本的に同じ概念をもった装置であり、この点においてコンピュータの歴史上重要なステップを刻んだと考えられます^{※3, 7}。バベッジが「コンピュータの父」と言われる所以です^{※8, 9, 10, 11}。

バベッジがこの蒸気コンピュータである解析機関についてはじめて記述したのは1837年で、1871年の死去直前まで設計を続けました。資

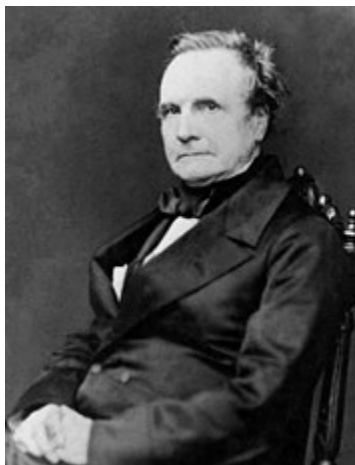


図1：チャールズ・バベッジ
(Charles Babbage)^{※1, 2}
1860年の写真

金や政治、法律などの問題があり、この解析機関は完成を見ませんでした。

今日のコンピュータにはENIACの系統やIBM(IBM 701)の系統が直接繋がっています。その一方でバベッジはコンピュータの歴史で大きな影響を与えましたが、彼が設計を行った解析機関は今日私たちが使うコンピュータには直接つながっていません(図2)※12。

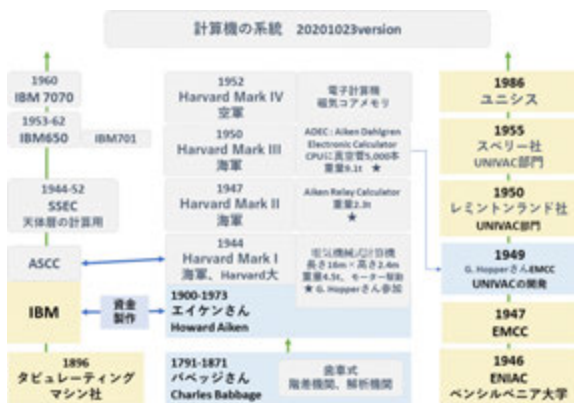


図2: コンピュータの系統の図解※12

ENIACの系統やIBMの系統が今日のコンピュータに繋がっている。バベッジ(中央の最下段)はコンピュータの歴史で大きな影響を与えてはいるが、彼が設計を行った階差機関や解析機関は今日に伝わっていない。

2. チャールズ・バベッジ

チャールズ・バベッジは、イギリスの数学者・哲学者・計算機科学者でもあり、世界で初めて「プログラム可能」な計算機として解析機関を考案しました。

1810年、18歳のときに名門ケンブリッジ大学トリニティ・カレッジ(Trinity College, University of Cambridge)に入学し数学を専攻したバベッジは1812年、ケンブリッジ大学のピーターハウス(Peterhouse)に移籍しました。ケンブリッジ大学在学中に、バベッジは友人と共に、解析協会(Analytical Society)を設立しました。

またバベッジは数学者としては優秀で、ケンブリッジ大学のルーカス教授職を務めていたこともあります。これは数学関連分野では最も権威あるものです。2代目教授はアイザック・ニュートン

ンで、近年ではスティーブン・ホーキングが務めています。

バベッジは暗号学でも顕著な成果を上げました。彼はヴィジュネールのオートキー暗号と、ヴィジュネール暗号の解読に成功しました。

また著書『機械化と工業化がもたらす経済効果(On the Economy of Machinery and Manufactures)』では、今日「バベッジの原理」と呼ばれるものを描いています。カール・マルクスは資本論や経済学批判要綱でこのバベッジの分業論に強い影響を受けました※14。

バベッジはかねてから蒸気機関に強い関心を持っていました。リバプール・アンド・マンチェスター鉄道の開通式にも参列しています。1838年にバベッジは、軌道上の障害物を取り除くために蒸気機関車の前に取り付けられる金属フレームであるパイロット(カウキャッチャーとも呼ばれる)(図3)※15を発明しました。彼の長男はGreat Western Railwayの技師として技師長ブルネル(Isambard Kingdom Brunel)のもとで働いていました。ブルネルとバベッジは古い親友でした。さらにイギリスの軌間論争ではブルネルの7フィート4分の1インチ(2,140ミリメートル)の広軌を支持し、1838年の株主総会においてバベッジは広軌を擁護する意見を述べています※16、17。

検眼鏡もバベッジの発明ですが、評価しても



図3: カウキャッチャー

蒸気機関車(義経号として復元された国鉄7100形蒸気機関車7105)の前部に取り付けられた金属性金属カウキャッチャーが確認できる※15。

らおうと医師に渡してそのまま忘れられてしまい、実際に使われるようになったのは後にヘルマン・フォン・ヘルムホルツが独自に発明したものでした^{※18}。

またバベッジは、郵便局の経営にかかる費用のほとんどが、実際の郵送にかかる金額ではなく、収集と、目的地に着いてからの個人宅への配送にかかっている事に着目し、何らかの形で、送り手が前払いをすることにより、経費が大幅に削減されると意見し、今日普及している切手を利用した郵便の均一料金導入に貢献しました^{※19}。

3. 19世紀のイギリスでの 計算機械の必要性

19世紀のイギリスは海運業の発展によってより大量の計算が必要となり、また船の位置の計算に使う天文航法学の進歩によってより複雑な計算が必要となっていました^{※20}。ところが、天文航法の数表には誤りが多く、そのため海難事故の多発に悩まされていました。当時、対数表や三角関数表に代表される数表は、計算者が筆算で計算し、それを印刷工が手で活字を組んでいたので二重に間違いが起りやすかったのです。バベッジが最初に計算機械の開発を着想したのも、1812年、解析協会の一室で間違いだらけの対数表を眺めているときであったということです。

また当時フランス政府が新たに確立した数表の作成方式では、3～4人の数学者が計算方法を決定、12人程度の助手が計算過程を加算と減算だけからなる部分計算に分解し、80人の計算手はその加減算を行うという仕組みが採用されていました。これは、世界で初めて大量生産方式を算術に応用した画期的な試みでしたが、それでも転記ミスや計算ミスは避けられず、数表は多くの間違いを含むとは言え、バベッジは、この計算労働の分業方式に感動し、最後の80人の手による計算労働を機械化してしまえば、スピードも正確性も増すに違いないという着想を得まし

た^{※21}。バベッジはそのような計算を自動的に行い、計算結果を自動的に印刷する夢の機械である階差機関を開発しようと考えました^{※7、20}。これ以後、階差機関の開発へ向けて、構想を温め続けることになります。

バベッジは、1822年に計算機械の開発を具体化する機が熟したと判断し、王立天文学会に対して、蒸気機関を用いて歯車式計算機を駆動させ、数表を作成する機械としての階差機関の製作を提案しました。

この階差機関に歯車と蒸気機関を利用した点は、現代の我々から見るとついつい風変わりな印象となってしまうのですが、当時の技術状況を考えればごくごく自然な選択であるばかりでなく、蒸気機関は当時最先端のハイテク技術でもありました。我々が計算機をつくるときに、電気と半導体を使うことが当然であるのと同様に、歯車と蒸気機関で階差機関を作成することはバベッジにとって自然な選択でした^{※22}。

4. 歯車式計算機

ところで歯車を使って、どのように計算をするのでしょうか。歯車式の計算機はすでに実用化されていました。ただし、それほど大がかりな計算が必要とされていなかったために普及しなかったのです。17世紀には「人間は考える葦である」の言葉で有名な哲学者パスカルが「パスカリーヌ(Pascaline)」という名前の計算機(図4)^{※23}を製作しました。税官吏であった父の仕事を軽減するためにつくり始め、後にはこれで一儲けしようと数十台を量産したが、あまり売れな



図4：パスカリーヌ(Pascaline)^{※23}

かったようです。パスカリーヌの原理は、0から9までの表示がついた歯車を手で回していく方式です。自動車のトリップメーターのように0を通過するときに繰り上げ機構が働いて、一桁上の歯車を一目盛り進めます。桁数の多い足し算をするときには重宝したはずですが、繰り上げ機構を実現するには、隣の歯車と連動するピンをつけておけばいいわけですが、問題は繰り上がりはできても引き算のときの繰り下がりができないことでした。パスカルは「補数を加えれば引き算と同等になる」という数学的なアイデアを活かして、パスカリーヌで引き算もできるようにしました。足し算、引き算であれば、歯車式でもわりと簡単に実現することができました^{※23}。

5. 階差

階差機関は文字通り「階差」利用しています。階差というのは数列で隣り合う数字の項の差です(図5)^{※20}。連続関数の微分を離散化したものです。

以下の結果を確かめてみましょう。

Xの二乗の数列($f(x)=x^2$)を自然数で考えてみます。

1×1=1、2×2=4、3×3=9 ……と続いていくのですから

1 4 9 16 25 36 49…

となります。

この時隣りどうしにある数字の差は

3 5 7 9 11…

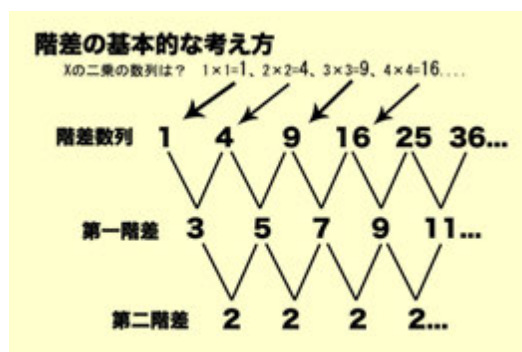


図5：階差
 隣りどうしにある数字の差である階差は、第二階差で一定の2となっている^{※20}。

となります。これを第一階差とします。

そしてさらにこの第一階差の数列の差を計算しますと

2 2 2 2 2…

と全ての差が2となり一定になります。これを第二階差とします。この規則性を利用すれば複雑な計算でも階差法で機械的に割り出すことが可能になります。

上記は多項式の場合で、一般的には、n次多項式の第n階差は定数となり、階差計算の繰り返しが増えるだけで、構造的には上述した2次関数の例とまったく同じようにして計算することが可能であると言えます^{※21}。ほかの当時の計算機械とは異なり、階差機関は指定された複数の値 $f(x)$ ($x = 2, 3 \dots$) を自動生成するものでした。また対数も三角関数もマクローリン展開 (Maclaurin expansion) をすることにより、多項式で近似できることから、まさしく数表作成に適した設計であったといえます。

sin x のマクローリン展開

$$\sin x =$$

$$x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 + \dots (-1)^n \frac{1}{(2n+1)!} x^{2n+1} + \dots$$

cos x のマクローリン展開

$$\cos x =$$

$$1 - \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 - \frac{1}{6!}x^6 + \dots (-1)^n \frac{1}{(2n)!} x^{2n} + \dots$$

e^x のマクローリン展開

$$e^x =$$

$$1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 - \frac{1}{4!}x^4 + \dots \frac{1}{n!} x^n + \dots$$

6. 階差機関

6-1 階差機関の構造

さて実際の階差機関の構造について見てみます。ロンドン科学博物館にある階差機関二号機1台目の拡大図で説明します(図6)^{※25}。

縦に並んだ歯車で構成されているColumn(列)

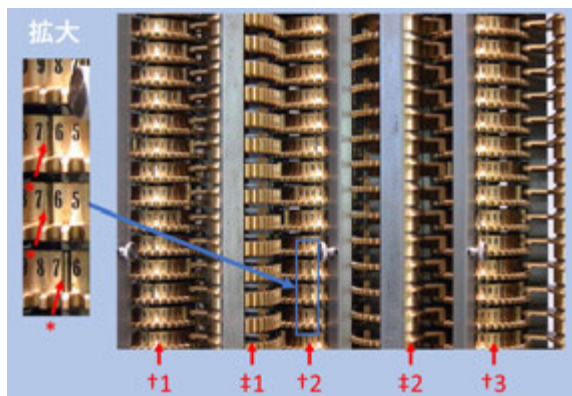


図6：ロンドン科学博物館にある階差機関二号機
1台目の拡大図^{※25}

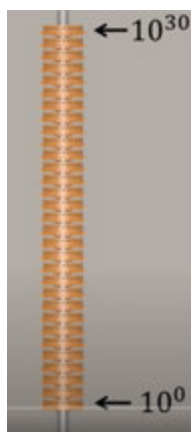


図7：Number wheel
Number wheelにはいくつかの歯車がついている。1991年に完成した階差機関二号機の1台目(ロンドン科学博物館に設置)を例にしめす。本機ではNumber wheel1本につき31個の歯車があり31桁で1030桁保持まで設定できる^{※26}。

があります。このColumnはNumber wheelとSector gearの2種類で構成されています。

Number wheel(図中†1-3)は数字が付された歯車で構成されたColumnです。歯車の数が数値の桁数を保持します(図7)^{※26}。

Sector gear(図中‡1と‡2)はNumber wheel(†1-3)の2列の間に設置されており、幅の広い歯車のColumnです。

Number wheelの1個ずつの歯車の各縁には「0」から「9」までの数字が打ってあります。「6」と「7」の間にある金属製のtab(図中*) (出っ張り)があります。このtab(*)は、Number wheelの1個の歯車が桁上りのときに全面に表示された数字「9」から「0」に変わる時に背面の特別な桁上りレバー(Carry lever)(図8)^{※26}を動かして、同じNumber wheelの列の1段上の歯車に桁上りの情報を伝えていきます。

また左側のSector gear(‡1)は、Number

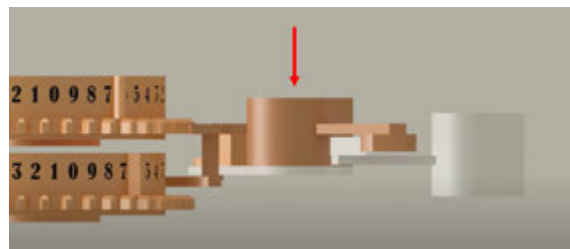


図8：Carry lever
矢印にCarry leverを示す。同じNumber wheelの列の1段上の歯車に桁上りの情報を伝える^{※26}。

wheel(†1-3)の歯車に比べて2倍のTooth height(歯たけ)をもった歯車を明確に認めます。右側のSector gear(‡2)はSector gear(‡1)に比較してほぼ180°回転した位置で、Tooth heightがない側を見えています(図10参照)。

働きとしては、2個のNumber wheelsとその間にある1個のSector gearが働いて階差計算における加算を実現しています。引き算には補数を使います^{※20、27、28}。

6-2 階差機関の計算原理について

6-2-1 Number wheelsの働き

階差機関の計算原理についてNumber wheelsと階差数列との比較を通じて見てみます。

図9-Aは、階差機関のNumber wheels-階差機関一号機の動作説明用版画を改変したものです。

図9-Bは、階差数列を示しています。

図9-AでNumber wheelがp本あれば、第1 Number wheelは第p-1階差を計算し、第2 Number wheelは第p-2階差を計算します。そしてp本目 Number wheelはResult(結果)が表示されます。図ではp=3の場合を示しているため、階差機関一号機では図の左側から第1 Number wheelは第2階差、第2 Number wheelは第1階差となり3本目の Number wheelはResult表示となります。

また各Number wheelの数字の付いた歯車の数は保持した計算桁数を示します。

第1 Number wheelは数字の付いた歯車6個で6桁そして $10^0 \sim 10^5$ まで、同様に第2 Number wheelは数字の付いた歯車5個で5桁そして $10^0 \sim 10^4$ まで、そして3本目の Result number wheelは数字の付いた歯車5個で5桁そして $10^0 \sim 10^4$ まで計算できる設計となっていました。例えば第1 Number wheelは6桁ですので 10^0 から 10^5 まで設定できるので、値2を設定する場合は上段から下段にむけて初期値0,0,0,0,0,2と設定します。他、第2 Number wheelと Result number wheelでも同様に値を設定します。

計算するときはこの装置では蒸気機関によらず、この場合取っ手を手廻しでしています。

図9-Bで実際の計算を階差数列 $f(x)=x^2$ で x を1ずつ増加させた時を例にして説明すると第2階差の数は等しく2です。初期値2,3,1をあらかじめ計算で求めて、第1 Number wheelに

2、第2 Number wheelに3、Result number wheelは1を設定します。

計算1回目では第1 Number wheelの値5は、これは第2階差(第2 Number wheel)の定数2と第1階差(第1 Number wheel)の初期値3を加算して得られています。Result (Result number wheel)の値4は、第1階差(第1 Number wheel)の初期値3と、Result (Result number wheel)の初期値1を加算して得られます。この階差機関の動きで計算1回目の結果2,5,4が得られます。

計算2回目では第1 Number wheelの値7は、第2階差(第2 Number wheel)の定数2と第1階差(第1 Number wheel)の1回目計算値5を加算して得られています。Result (Result number wheel)の値9は、第1階差(第1 Number wheel)の1回目計算値5と、Result (Result number wheel)の

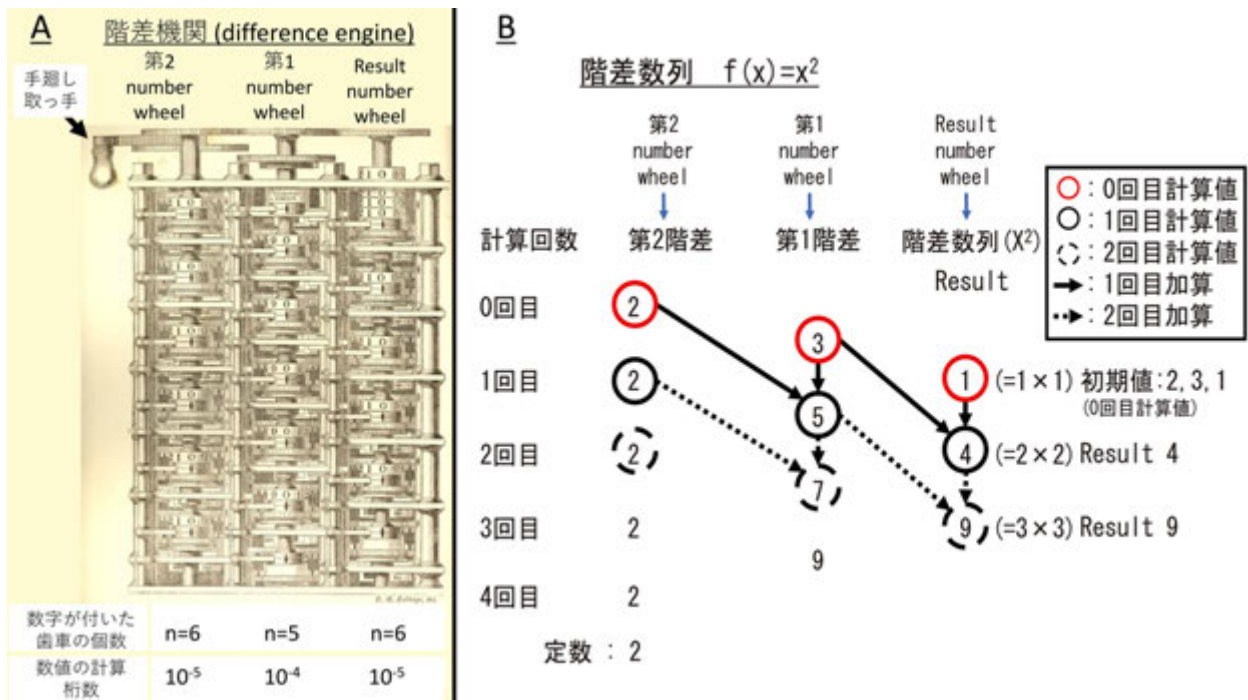


図9: Number wheelsと階差数列との比較

A 階差機関のNumber wheels-階差機関一号機の動作説明用版画より

B 階差数列

なお本図はBabbage's Difference Engine from the frontispiece to his Passages from the Life of a Philosopher, (1864). exlib Stephen Jonesを一部改変し作成した※20, 29。

1回目計算値4(○)を加算して得られます。

この階差機関の動きで計算2回目の結果2,7,9が得られます。

ここでは、Result number wheelの値が求めたいのですから、検証しますと順に1,4,9と算出されています。また計算過程でも初期値と以前の計算結果から算出されています。このようにして関数 $f(x)=x^2$ で $X=1,2,3$ のときの $f(x)$ が求められています。本法を $f(x)=x^2$ の関数で $X \geq 4$ でも順に階差機関を用いて機械的に計算すれば一連のResultとして、 x^2 が求められることとなります(図9)^{※20, 29}。

6-2-2 Sector gearの存在意義

ところで前章6-2-1(図9)の説明だけでは、Sector gearの存在意義はないように思えます。Number wheels同士をかみ合わせれば計算可能と思われます。ですが、Number wheelsだけの構成には歯車の動作上問題点があり改良が必要です。

図10-A 2回目の計算の時に、第1Number wheelは、2回目のResult number wheelの加算計算のために値5を保つ必要があります。その一方で第1Number wheelは第2Number wheelの値2を加算し自身の値を7にする必要があります。

第1Number wheelはタイミング良く5のデータを送り出してから、加算用の2のデータをもって加算し7にできれば良いですが、歯車動作は確実とは言えず、逆順のこともありえます。

図10-B Aで述べた問題点を解決するためにバベッジはSector gear(図中‡1)を考え出しました。Sector gear(‡1)は、Number wheel(図中†1と†2)の歯車に比べて2倍のTooth height(歯たけ)をもった部分とTooth heightがない部分を持っています。この特殊な構造をしたSector gearを回転させNumber wheelの回転角度を保存し、数値データの一時的保存を可能としています。Aで述べた歯車動作のタイミングで生じるエラーを皆無としています。RAM

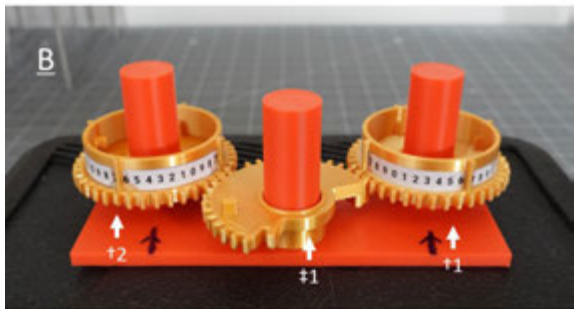
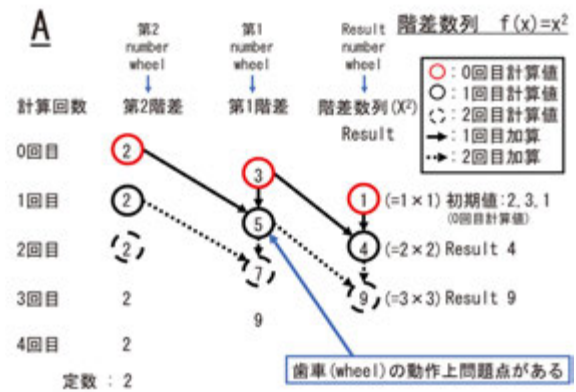


図10: A Number wheelsでの問題点
B Number wheelsとSector gearの模型^{※26}
‡1: Sector gear
†1, †2: Number wheel^{※26, 47}。

(Random Access Memory)に似た働きをしていると思われる^{※26}。

7. 階差機関一号機

そのような経過で1822年、王立天文学会に対して、蒸気機関を用いて数表を作成する階差機関の製作を提案しました。この提案は大きな反響を呼びました。さらにバベッジは王立学士院に対しても新しい階差機関の必要性を強く訴えました。1823年、多くの人々の支持を得て、階差機関開発助成金の申請がイギリス政府に正式に行われました。その年の4月、王立学士院はバベッジの提案を検討するための特別委員会を設置、翌月には申請を許可すべきであるとの見解を発表し、さらに2ヵ月後、バベッジに対して1,500ポンド(現在の価値でおよそ1,800万円程度)の助成金が支払われました^{※21}。

バベッジが「階差機関(Difference Engine)」

と名付けた計算装置は、自然数 x に対する n 次多項式 $f(x)$ の値を加算のみで計算するためのもので1824年には、「数表と天文暦のための計算機関の発明」に対して王立天文学会ゴールドメダルを授与されています。

バベッジの設計した階差機関は、データとプログラムが分離される構造をしており、命令に従って作動する演算器は条件分岐が可能で、本体とは切り離された入出力装置を備えていました。最初の試作機である階差機関一号機は約25,000個の部品で構成され、高さ2.4m、重さ13,600kgとなる予定でした。当初の意図とは異なり、蒸気機関を用いず、人の手でクラックを回すことで作動し、十進法に基づき、16桁までの数で6次多項式を取り扱えるように計画されていましたが、ついに完成することはなかったのです^{※21}。

原因として考えられるのは、

①恒常的な資金不足

その都度、イギリス政府からさらに補助金を引き出すよう努力し、1833年までの10年間に17,000ポンド(現在の価値でおおよそ2億円強)の国家予算が引き当てられていました。加えて同額程度のバベッジの個人資産も注ぎ込まれたといわれていますが、階差機関は、本体のほんの一部が組み立てられたに過ぎませんでした。

②プロジェクトの所有権

プロジェクトの所有権を巡って、イギリス政府とバベッジの間に以下のような誤解があったと思われる。

当時のイギリス政府には正式な奨励金制度が存在せず、階差機関に対する支援については、「バベッジの発明を高く評価し、その実現のために一時的な助成金を与えるのであり、したがって、階差機関が完成すれば、その所有権はバベッジに帰属する」という見解であった一方、バベッジは最初から、「階差機関の所有権はイギリス政府にあり、政府の全額出資によって制作される

もの」と思い込んでいたというものです。

③エンジニアや職人たちの実力行使

当時のビジネス習慣として、エンジニアは必要となる高度な工具の制作費の負担を雇主に要求し、かつそれを所有できることが一般的でした。

1823年以来、エンジニアとしてプロジェクトをサポートしてきたジョセフ・クレメント(Joseph Clement)は腕の良いエンジニアでしたが、必要となる高度な工具の製作と費用を巡って、資金不足に悩むバベッジと、1831年頃には技術・資金の両面で衝突を繰り返すようになりました。

1832年には階差機関の制作が長引くなか、周囲の理解を得るために急遽デモ用モデル階差機関を作成しました。実際の階差機関のスペックは、20桁6次階差が予定されていましたが、このデモ用モデル階差機関は実演用であり、5桁の数値を2次階差まで演算できるモデル階差機関でした(図11)^{※30、31、32、33}。



図11：1832年にバベッジによって製造された階差機関一号機のデモ用モデル(Science Museum, London)^{※33}で7分の1モデルとも称されている^{※10}。階差機関一号機の制作が長引くなか、周囲の理解を得るために急遽作られた5桁の数値を2次階差まで演算できる実演用デモ用モデル階差機関である。サイズは小さなテーブルに載せられるほどである。階差機関一号機のスペックは、20桁6次階差が予定されていた。当時はバベッジ家の居間に置かれ、現在はロンドン科学博物館に保存されている。現在でも動作可能であるとされている。また、東京理科大学の科学資料室に複製が置かれている。上野の国立科学博物館にも複製があるとされている^{※30}。

1833年、給料の支払遅れを理由に、クレメントは職人たちと共に作業を拒絶し、バベッジは10年間の長きにわたって取り組み続けてきたプロジェクトの中断を余儀なくされ、1834年以降、階差機関の開発は、見かけ上、完全に停滞しました。その後も、バベッジは、階差機関の所有権を巡る政府との見解の相異に気付かぬまま、再三にわたって資金供給の申し入れを行いました。1842年、ついにイギリス政府はすべての資金援助の打ち切りを申し渡し、階差機関一号機の開発の夢は虚しく消えました。

なお階差機関一号機・階差機関二号機を第一階差エンジン・第二階差エンジンもしくは第一階差機関・第二階差機関としている文献(新戸『バベッジのコンピュータ』)もあるのですが、番号付けが「階差」にかかるようにも読めてまぎらわしいので、ここでは「階差機関一号機」「階差機関二号機」で記載します。階差機関二号機の基本設計は階差機関一号機にくらべ大幅に拡大したものであり、階差機関の同型機の2台目という意味ではありません。

8. 階差機関二号機

バベッジは階差機関一号機の作製を断念後、後述する解析機関の設計に携わっていましたが、1847年から1849年にかけてはそれを中断し、階差機関二号機を設計しました。これは、階差機関一号機の性能を落とさずに、むしろ性能を強化し、構成をずっとスリムにし、部品点数を大幅に減らしたものでした。しかしながら、階差機関二号機は設計図だけで作製にとりかかることはありませんでした。

この階差機関二号機ですが、1985年、バベッジの生誕200年記念行事に間に合わせるために、英国のロンドン科学博物館がその建設にとりかかり、約750,000ポンドと6年をかけて生誕200年目の1991年に完成させました。そのときは、予算の関係で印刷機構は省かれていましたが、今では、印刷機構も備わって、8,000個の真鍮、鋳鉄と鋼の部品、長さ

3.4m、高さ2.1m、幅0.5m、重さは約5トンの大きな計算機ができ上がっています。数値は数字歯車を手で回転させてセットし、クランクハンドルを回して計算します。階差機関一号機は20桁で第7階差までの設計でしたが、階差機関二号機は31桁で第7階差まで計算できる性能です(図12)^{*26}。この階差機関二号機の作製にあたり、20世紀の最新の工作機械技術を使わずに、あえて19世紀の技術のみを使い、バベッジが作製を断念したのが技術的理由でないことを証明しました。この20世紀の階差機関二号機の1台目(図13)^{*34}は、現在ロンドン科学

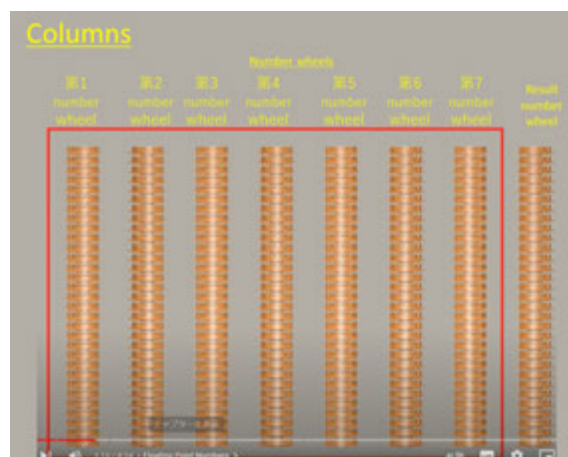


図12: Columns
1991年に完成した階差機関二号機の1台目(ロンドン科学博物館に設置)を例にします。本機ではwheelは8本あり、Number wheelが7本、Result number wheelが1本設置されている。第7階差まで計算可能である^{*26}。

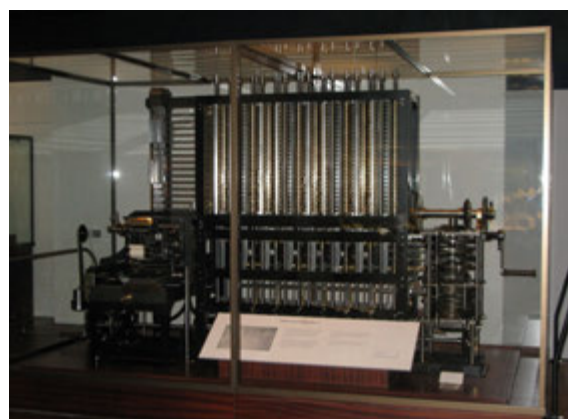


図13: Babbage Difference Engine
チャールズ・バベッジの階差機関二号機の計画に基づいてロンドン科学博物館によって作成された階差機関二号機1台目の写真^{*1}。

博物館のバベッジコーナーに展示してあります。

また元マイクロソフトのCTO・ネイサン・ミルボルドの依頼で階差機関二号機の2台目の製作が行われ、2008年5月から2010年末までマウンテンビューのコンピュータ歴史博物館に展示されました(図14、図15)^{※35}。

9. 蒸気コンピュータ-解析機関の設計

バベッジが最初に開発しようとした機械式計算機は階差機関(Difference Engine)でしたが、これは多項式による近似計算によって対数や三角関数の数表を作ることに特化した計算機でした。バベッジはさらに汎用性のある設計が可能であると思いつき、それを解析機関(Analytical Engine)と呼び、設計を開始しまし

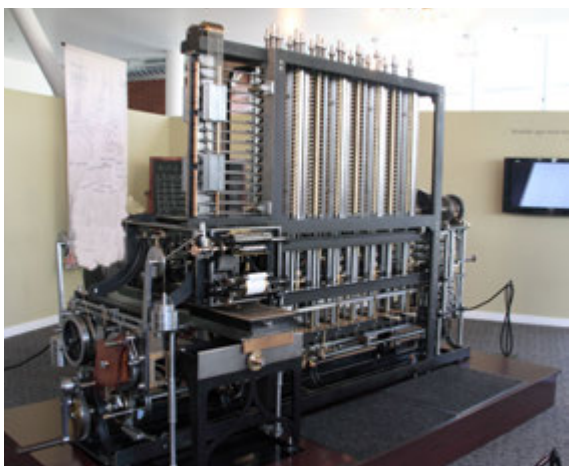


図14：階差機関二号機の2台目^{※1}

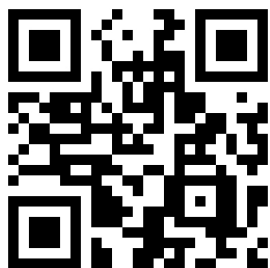


図15：The Babbage Engine at the Computer History Museum Mountain View, California
YouTube：上の階差機関二号機2台目の歯車の動画QRコード^{※26, 35}
<https://www.youtube.com/watch?v=be1EM3gQkAY&t=17s>

た。そして1871年に亡くなる直前までその設計を改良し続けました。

解析機関と階差機関の主な違いは、解析機関ではパンチカードでプログラムを組むことができるという点です。プログラムをカードで用意することで、最初にプログラムを組めば、それを機械に入れるだけで実行することができます。解析機関はジャカード織機のパンチカードのループで計算機構を制御し、前の計算結果に基づいて次の計算を行うことができるように設計されました。逐次制御、分岐、ループといった現代のコンピュータのような特徴すら、いくつかを備えていました。

バベッジのアイデアを完全に理解していた数少ない人物の一人にエイダ・ラブレス(Augusta Ada King, Countess of Lovelace)がいます。バベッジが考える単なる計算機に留まらない解析機関の可能性を見出していました。解析機関の能力を示すために実際にプログラムを作成しました。ベルヌーイ数の数表を計算するプログラムなどです。今では世界初のプログラマと言われていています。彼女にちなんで1979年にあるプログラミング言語がAdaと名付けられています^{※36}。

10. 解析機関の構成

解析機関は、制御情報にしたがってオルゴールのようにピンを配置してあって回転、停止、逆回転するドラム群が中心となっています。そして、多くの歯車や力の伝達機構、位置や回転角などで情報を記憶・表示する仕組みなどから構成される、複雑で大きな機械として設計されました。

1,000個の50桁の数値を格納できる場所の演算装置(ミル、mill)は四則演算が可能で、さらに比較しますと、オプションで平方根の演算が可能でした。当初、それは階差機関を円環状に配置したらどうなるかという考察から生まれ、その一方に数値格納装置を配置するようにしました。さらに後に格子状の配置となりました。現

代のコンピュータのCPUのように命令をもち、ミル内部の手続きはバレル(barrels)と呼ばれる回転するドラムにpeg(釘)を刺すことで格納され、それによって複雑な命令を実現しています※3。

電子式コンピュータと解析機関の各部位を比較対照しますと、InputがNumber Cardsに、Program Part 1がOperation Cardsに、Program Part 2がVariable Cardsに、MicroprogramがBarrelsに、CPUがMillに、MemoryがStoreに、ElectricityがSteam Engineに、OutputがPrinterに相当します(表1)(図16)※37、38。

電子式コンピュータ	解析機関
Input	Number Cards
Program Part 1	Operation Cards
Program Part 2	Variable Cards
Microprogram	Barrels
CPU	Mill
Memory	store
Electricity	Steam Engine
Output	Printer

表1：電子式コンピュータと解析機関の各部位を比較対照※37、38

現代の電子式コンピュータと解析機関の各部位を比較対照している。駆動力について電子式コンピュータが電気(Electricity)であるのに対して、解析機関が蒸気機関(Steam Engine)であるというのが特徴的である。

蒸気機関を動力として、完成すれば長さ30m、幅10mという、いまの電車クハ103系(長さ20.0m、幅2.87m)(図17)※39と比較しますと長さで1.5両分、幅で3.5両分程度もの巨大さとなっていたはずです。

プログラムとデータの入力は、当時既にジャカード織機(図18)※40のような機械式織機で使われていたパンチカード(図19)※41で供給される予定でした。出力としては印刷原版作製機、曲線プロッターおよびベルを準備していました。演算方式は十進数の固定小数点演算として設計されました。

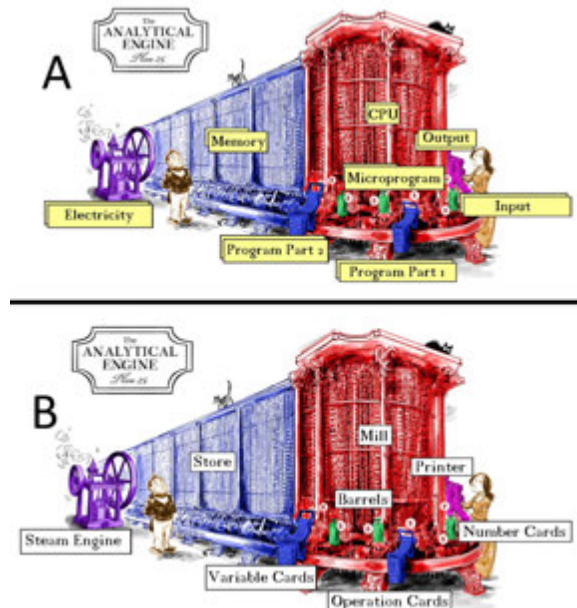


図16：解析機関の完成予想イラスト※37、38
A 現代の電子式コンピュータ相当部位
B 解析機関での名称



図17：国鉄103系電車 クハ103-149※39
1986年 和歌山駅
全長20m、全幅2.87m、全高3.935m



図18：ジャカード織機※40

11. その後

すでに階差機関の開発に対する政府支援を打ち切られたバベッジには解析機関の開発に新たな政府援助を得ることを望むべくもなく、自分の資産を注ぎ込んで開発を進めることを余儀なくされました。解析機関の完全開発は、資金枯渇そして技師とのトラブルにより実現できなかったのです^{※3、21、10}。

バベッジはかくして、第一階差機関、第二階差機関、解析機関の三つの大きな計算機械を設計しましたが、いずれも完成させることはできませんでした。第一階差機関は10年の歳月と巨額の資金を注ぎ込みましたが挫折し、第二階差機関は設計だけで製作にとりかかることはありませんでした。解析機関も本格的な作製にとりかかることはなく、最晩年、小規模の簡易型モデルの作製を始めましたが、未完のうちに没しました。結局バベッジが完成させたのは、第一階差機関の7分の1のモデル(図11)だけです^{※10}。



図19：解析機関のプログラム用のパンチカード^{※41}
解析機関のプログラム用の2種類のパンチカード。
手前：命令入力用の「演算カード」、奥：データ入力用の「可変カード」

12. Plan28

今日 バベッジの図面が残っているロンドン科学博物館の保管庫には、バベッジがこの解析機関について書いた何百という図面と何千ページものノートがあります。その中の一組は「plan28」と呼ばれているものがあり、それにちなんで、Plan28と名付けられた解析機関の建設のための募金活動があります^{※42}。

このPlan28は、2010年10月に開始されたイギリスのプログラマー・グラハム＝カミング(John Graham-Cumming)が、完全な解析機関を製作するために寄付を募るキャンペーンのことです^{※43}。グラハム＝カミングらは解析機関をバベッジの没後150周年の2021年までに完成させることを目標としていました。2024年2月11日の時点では、解析機関製作プロジェクトは進行途中の状態であり、完成していないと判断されました^{※44}。

13. レゴ、3Dプリンタ

レゴで階差機関が作られています(図20)^{※45}。また3Dプリンタでの制作も試みられています^{※46}。



図20：Babbage Difference Engine made with LEGO
レゴで作られた階差機関^{※45}

本稿と併せ、

- ・ホームページの広場：第40回「コンピュータでの2進数の加算と論理演算に関して」大阪医科薬科大学医師会会報 第59号(令和5年3月)
- ・ホームページの広場：第41回「電気回路による論理回路の実現」大阪医科薬科大学医師会会報 第60号(令和5年9月)

の三部は小生が1981年度の大阪医科大学生理学実習のコンピュータ演習の課題として当時の第一生理学教室教授の故・今井雄介先生、第二生理学教室教授の故・藤本守先生の前で発表した内容につき、記憶をたどり再現し、さらに加筆修正し記載いたしましたものです。

当時はYouTubeやインターネットはもちろんワープロもエクセルもなく、Windowsは存在せず、さらにコンピュータはキットを買ってハンダ付けで作った時代でした。

「コンピュータの原理と歴史」といったような大きな題目発表に挑んだものの、資料も知識も乏しく、満足ゆく発表にはなりませんでした。

今は情報工学の発展でいとも容易に調べることが可能になっています。隔世の感がします。

今回拙稿の作成を通じ1981年度の大阪医科大学生理学実習の課題を自分なりにまとめることができました。課題「コンピュータの原理と歴史」に関するレポート作成を、40年以上の時を超えて叶えられた思いです。

両先生に泉下で拙稿の御笑覧を乞い、御冥福をお祈り申し上げます。

今回は蒸気コンピュータについて記載いたしました。

参考文献

- ※1: チャールズ・バベッジ - Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/チャールズ・バベッジ>
- ※2: Charles Babbage - 1860.jpg
See page for author, Public domain, via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Charles_Babbage_-_1860.jpg
- ※3: 解析機関 - Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/解析機関>
- ※4: コンピュータの歴史(年表)
https://www.komazawa-u.ac.jp/~kobamasa/reference/nenpy/computerHis_UeyamaS/computerHis_UeyamaS.htm
- ※5: 第1回 そもそもコンピュータって何だった？
<https://jp.fujitsu.com/family/familyroom/syuppan/family/wesbs/serial-comp/pdf/comp01.pdf>
- ※6: 階差機関 - Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/階差機関>
- ※7: バベッジの階差機関・解析機関
<http://www.infonet.co.jp/ueyama/ip/history/babbage.html>
- ※8: コンピュータの父、チャールズ・バベッジ - 株式会社ライトコード
<https://rightcode.co.jp/blog/it-entertainment/charles-babbage-computer-father>
- ※9: コンピュータの父、チャールズ・バベッジ|幻の階差機関・解析機関 - 空間情報クラブ|インフォマティクス運営のWebメディア
<https://club.informatix.co.jp/?p=7660>
- ※10: 大駒, 誠一, 2003, コンピュータ開発史1: 東北公益文科大学, a37-a51 p.
<https://koeki.repo.nii.ac.jp/records/93>
- ※11: Babbage and Aiken | Semantic Scholar
Published in Annals of the History of Computing 1988
view-source:<https://www.semanticscholar.org/paper/Babbage-and-Aiken-Cohen-Babbage/a7e3172f4ccf8ea1c09cc7f34f1deea0d10673c4>
- ※12: コンピュータの祖・バベッジさんの階差機関をめぐる人々(12) 系統の図解
<https://www.uec-programming.com/2020/10/23/コンピュータの祖・バベッジさんの階差機関を-12/>
- ※13: Babbage の誕生日はいつ？
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhsj/31/182/31_115/_pdf/-char/ja
- ※14: Ákos Róna-Tas(1997). The Great Surprise of the Small Transformation: The Demise of Communism and the Rise of the Private Sector of Hungary. University of Michigan Press. p. 20. ISBN 978-0-472-10795-7. Retrieved 27 April 2013.
- ※15: 国鉄 7105 Yshitune.JPG
トラジン, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/JNR_7105_Yshitune.JPG
- ※16: C. Babbageの原価理論
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jyu/11/2/11_KJ00000194990/_pdf/-char/ja
- ※17: Lee, John A. N.(1995). International biographical dictionary of computer pioneers. Taylor & Francis US. pp. 60
- ※18: Ophthalmoscope
<http://www.discoveriesinmedicine.com/Ni-Ra/Ophthalmoscope.html>
- ※19: ローランド・ヒルと切手の誕生
https://mini-post-uk.blogspot.com/2017/12/blog-post_23.html
- ※20: スチームパンクの父・バベッジの階差機関(ディファレンス・エンジン)とは? | スチームパンク大百科S
<https://madamsteam.com/column/6881>

- ※21 : 世界をORする視線(8)第I部 通信・デジタル技術の発展
https://orsj.org/wp-content/corsj/or66-9/or66_9_614.pdf
- ※22 : 牧野 武文. 完成しなかった蒸気式コンピュータ: チャールズ・バベッジと階差機関 レトロハッカーズ(p.18). Makino Takefumi. Kindle 版.
- ※23 : アール・エ・メティエ・パスカリーヌ dsc03869.jpg
David.Monniaux, CC BY-SA 3.0
<<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>,
via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Arts_et_Metiers_Pascaline_dsc03869.jpg
- ※24 : 牧野 武文. 完成しなかった蒸気式コンピュータ: チャールズ・バベッジと階差機関 レトロハッカーズ(p.20). akino Takefumi. Kindle 版.
- ※25 : London Science Museums Replica Difference Engine
Carsten Ullrich, CC BY-SA 2.5
<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>>,
via Wikimedia Commons
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/LondonScienceMuseumsReplicaDifferenceEngine.jpg>
- ※26 : Babbage's Difference Engine No. 2, Part 2: The Calculation Section
https://www.youtube.com/watch?v=vdra5Ms_9s
- ※27 : 赤木昭夫著 チャールズ・バベッジ1 階差機関と「諸国民の富」bit 1970年4月号311-319頁, Kindle 版
- ※28 : The Babbage Difference Engine #2 at CHM
<https://www.youtube.com/watch?v=be1EM3gQkAY&t=9s>
- ※29 : 5: Charles Babbage' s Difference Engine; Stephen Jones and Associates
<https://the-synthetic-image.com/the-difference-engine/>
- ※30 : 階差機関&解析機関
<https://www.wizforest.com/OldGood/engine/>
- ※31 : Difference Engine No. 1 | Science Museum Group Collection
<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co62243>
- ※32 : Babbages Difference Engine No 1, 1824-1832. (9660573845).jpg
Science Museum London / Science and Society Picture Library, CC BY-SA 2.0
<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>,
via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Babbages_Difference_Engine_No_1%2C_1824-1832_%289660573845%29.jpg
- ※33 : Charles Babbage' s Difference Engines and the Science Museum | Science Museum
<https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/charles-babbages-difference-engines-and-science-museum>
- ※34 : Babbage difference engine drawing.gif
Benjamin Herschel Babbage, printed in Harper's new monthly magazine, Public domain,
via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/67/Babbage_difference_engine_drawing.gif
- ※35 : The Babbage Difference Engine #2 at CHM
<https://www.youtube.com/watch?v=be1EM3gQkAY&t=8s>
- ※36 : エイダ・ラプレス - Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/エイダ・ラプレス>
- ※37 : Charles Babbage's Analytical Engine
https://www.youtube.com/watch?v=eMy4vSZ-J_I
- ※38 : Sydney Padua(Author):
The Thrilling Adventures of Lovelace and Babbage: The(Mostly) True Story of the First Computer(Pantheon Graphic Library)Kindle Edition, p286-287, Pantheon , April 21, 2015, New York
https://www.amazon.com/Thrilling-Adventures-Lovelace-Babbage-Computer-ebook/dp/B00N6PBHAS/ref=tmm_kin_sw_atc_0?_encoding=UTF8&qid=1707635229&sr=8-1
- ※39 : 国鉄103系電車 - Wikipedia 著作者 トラジン, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons
<https://ja.wikipedia.org/wiki/国鉄103系電車>
- ※40 : Jacquard loom p1040320.jpg
Musée des Arts et Métiers, CC BY-SA 3.0
<<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>,
via Wikimedia Commons
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Jacquard_loom_p1040320.jpg
- ※41 : PunchedCardsAnalyticalEngine Karoly Lorentey, CC BY 2.0
<<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>,
via Wikimedia Commons
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/PunchedCardsAnalyticalEngine.jpg>
- ※42 : かつて存在しなかった最高のコンピュータ(TED Talks)
http://www.aoky.net/articles/john_graham_cumming/the_earliest_machine_that_never_was.htm
- ※43 : Campaign builds to construct Babbage Analytical Engine - BBC News
<https://www.bbc.com/news/technology-11530905>
- ※44 : Plan 28 Blog
<https://blog.plan28.org/> Sunday, February 4, 2024
- ※45 : Babbage Difference Engine made with LEGO
https://www.youtube.com/watch?v=i_u3hpYMYSk
- ※46 : 3Dプリンタで作る階差機関 / Build Difference Engine by 3D Printer - Speaker Deck
<https://speakerdeck.com/mackee/build-difference-engine-by-3d-printer>
- ※47 : Figure Wheels | Details | Hackaday.io
<https://hackaday.io/project/193805-3d-print-babbages-difference-engine-no2/log/225515-figure-wheels>