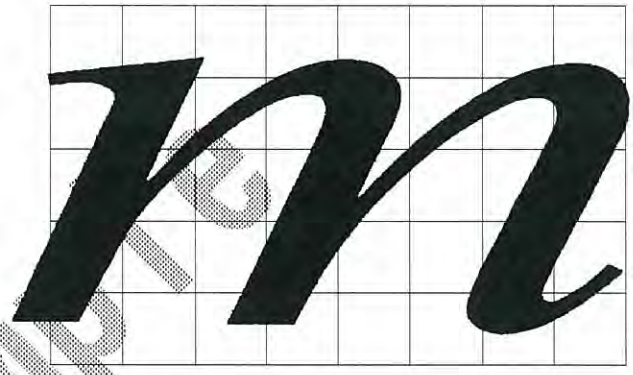
1

長さの単位:メートル

近代における長さの単位

■ 時の単位である秒は“s”と表し、同じく長さの単位であるメートルは“m”と小文字で表す。国際単位系(SI)は七つの単位から成立するが、“s”と“m”はその一部をなす基本的な単位である。近代物理学の巨人であったニュートン(1642-1727)の時代が終ると、自然科学、数学、哲学、などの研究の桧舞台が英国からフランスに移り、実証的なものの考え方がフランスを中心にして広まっていった。長さの単位は人の手足であったり、腕を広げた長さなどを基準とするのが常であったが、ようやくこの時代になって、自然界のコンスタントを長さの基準にしようとする気運が高まった。



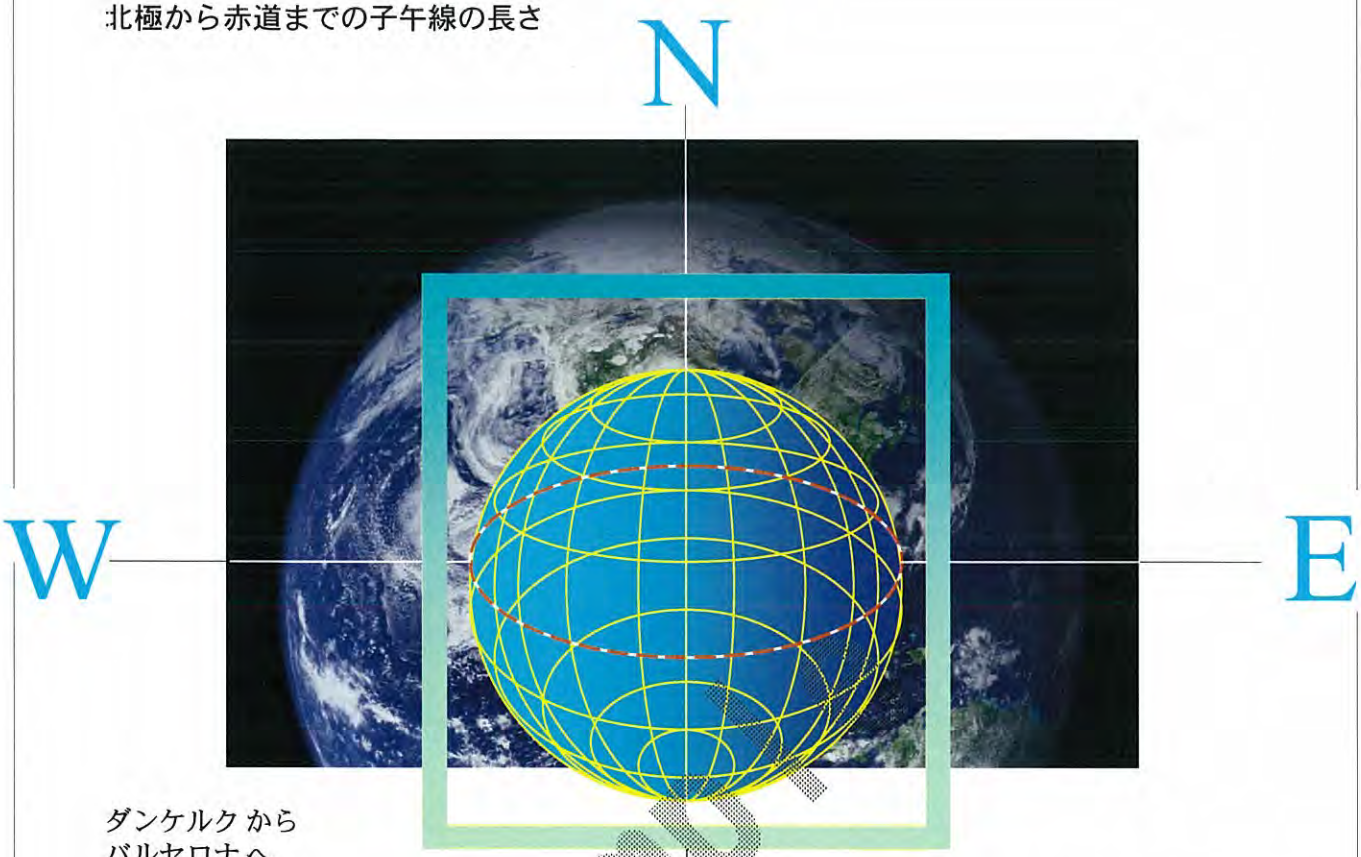
“A TOUS LES TEMPS, A TOUS LES PEUPLES”
「すべての時代に、すべての人びとに」

■ その動きが丁度フランス革命と重なり、これを背景として度量衡が一新されることになった。長さの基準に選ばれたのはパリを通過する地球の子午線という天文学的なスケールである。これに類した提案は古くからあったのだが、それがようやくこの時期に実現することになった。メートル法を提唱した最大の立役者ラボアジエ(Lavoisier 1743-1794)は惜しくも革命の犠牲者となり、ギロチンの露と消えたが、時代はより物理的な不動な長さを求め、メートルは生き残った。ただし、メートル法に移行した直後に国内の混乱を回避するため、新しい単位の誕生を絶賛していたナポレオンは古い秩序をもう一度復活させている。風前のともし火となっても生まれたての新しい単位が消えなかったのは、時代が永久不変な長さを切望していたからであろう。標語「すべての時代に、すべての人びとに」はメートル法が定められたことを記念したメダルに刻まれた言葉である。

sample

精密測定入門　長さの単位：メートルの起源

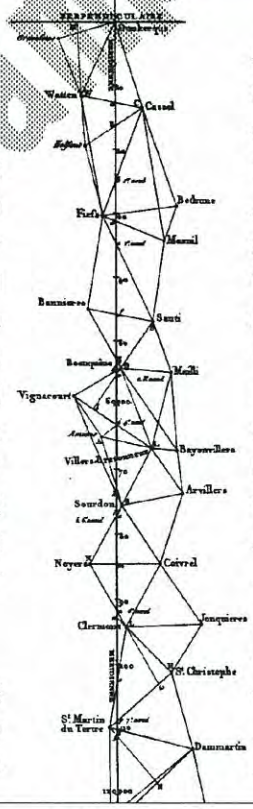
北極から赤道までの子午線の長さ



ダンケルクから
バルセロナへ

■ ブルボン王朝という旧体制がいよいよ末期的な状態に近づき、フランス革命の前夜となりつつあった頃、二人の天文学者がパリを離れて測量の旅に出ている。一人は北を目指し、もう一人は南へ向った。北端のダンケルクを目指したのはジャン・ドランブル (Jean Delamble 1749-1822) で、南へ向ったのはピエール・メシャン (Pierre Méchain 1744-1804) であった。この二人は太陽王と讃えられたルイ14世によって創立された国立科学アカデミーから選ばれた天文学者たちで、目的はパリと同じ経度に位置し、フランスの最北端となるダンケルクから温暖な地中海に面したスペインのバルセロナまでの南北の距離を三角測量によって測定するという、壮大かつ野心的な旅であった。

■ この最終的な目的は、北極からパリを経由して赤道に至るまでの距離を測り、その距離をベースにしてメートルという新しい長さの単位を定めることにあった。北極にも行かず、赤道にも行かず、経度の一部分だけを測量して 90° は計算して出そうということである。この二つの地点はパリを通過する最長の陸の長さとなるが、直線を引くと、2700 m 級の山々がそびえる自然の要塞、ピレネー山脈を越えなければならない。南側を担当したメシャンは山を越えず、地中海の沿岸を迂回しながら測量し、その結果から直線を求めている。この計画では北と南から同時に測量を開始し、中央に向かって進むということであった。そうすると落ち合う場所、「ランデブー」する地点も決めておく必要がある。それはロデ (Rodez) という南部の町で、その町の教会の一番高いところに置かれたマリア像と決めた。北側を担当したドランブルは全体の半分以上を測量することになったが、南側より北側の方が早く測量が進んだ。



精密測定入門　長さの単位:メートルの起源

子午線の基準

■ ドーバー海峡に面したダンケルクから子午線に沿って真っ直ぐに南下するとパリに至る。パリはこの測量の要の位置にあり、その中でも特にノートルダムの位置は重要であった。フランス全土の距離の起点となる礎石がここに埋められていたからである。その当時、経度ゼロの子午線の基準はパリの上空にあり、そこから西は西、東は東であった。1884 年になると子午線の基準を決める国際会議が開かれ、これが 2° ほど西に動いてグリニッチ天文台の中庭に移されてしまう。海洋国のイギリスでは航海に必要な経度の測定方法を公募して国王が賞金を与えたほどの熱の入れかたであった。賞金は最も正確な時計を作ったハリソンが受け取るが、それは国宝に値するのほどの見事な時計 (Chronometer) で、グリニッチ天文台に展示されている。そのお蔭で、後日、チャールス・ダーウィンが乗った帆船ビーグル号は東から西へ航海する世界一周の旅に出かけ、無事ガラパゴス諸島に到着している。

▲1メートルは北極からパリを経由して赤道に至るまでの子午線の 10,000,000 分の 1 を指す。この定義は 1983 年以降、光が 1 秒間に真空の中を伝わる行程の長さに置き換えられて今日に至る。

■ 北側からドランブルが測量を続けながら南下してくると、パリは革命の真っ最中であった。おびただしい数の首を刎ねるために、ギロチンまでが開発された時代である。マリー・アントワネットは女王としての正装を許されることなく、囚人のままの粗末な身なりで処刑台に立った。この歴史的な大混乱の時代に、しかも革命という狂気を背景にしてメートルという新しい十進法による長さの秩序が生まれた。パリを経由して北極から赤道までの距離を測り、それを等分した単位をメートルと呼ぶ、という決議は二人が測量の旅に出る前に決まっていた。メートルはギリシャ語のメトロン、ラテン語のメトラム（測る）を語源とする。この長さの基準を定めるについては対抗案もあり、振り子の原理も検討されたのだが、その案は否決され、もっと時間がかかって困難ではないかと思われる三角測量に決まった。

■ その理由については、恐らく次のような経緯があったものと推測される。すなわち、この距離は数十年前に一度測量ずみであったという事実である。フランス全土の地図はイタリアの天文学者カッシーニの手によって既に完成されていた。その経験がメートル法を定める時に影響を与えたものと推察される。ドランブルとメシャンの測量は二度目で、最初の測量を確認するということであった。

■ カッシーニ (Giovanni Cassini 1625 −1712) はボロニャに生まれた希有な人物で、この人はイタリアを離れてフランスに移って帰化し、天文学者として頭角を現すことになる。ルイ 14 世が創立した国立科学アカデミーに参加する目的で故郷を去ったが、フランスでは正確な地図の作成を命じられ三角測量による全国地図が完成する。それは「カルテカッシーニ」と呼ばれ、近代地図の原点であるとされている。以来、カッシーニ家は孫の代まで地図作りを家業として栄えた。カッシーニの時代の測量技術と、メートルの基準を求めるための測量とでは機材の精度が異なっていた。その違いは角度の分解能にあり、「反転式」と呼ばれる角度を二度測って目量を正逆両方から確認できる新機種が、航海の経験が長い海軍出身のボルダによって考案されていた。「分解能は 1 秒であった」と二代目のカッシーニはルイ 16 世の質問に答えている。以上からこの測量の角度の読取りは度数法であって、後で提案された十進法のラジアンではなかったことが分かる。ただし、測量機には十進法も併用されていたという記録が残っている。

■ この時の測量は北極から赤道までの距離を短く計算したようである。その誤差は 2000 メートルであったという（出典:The Mapmakers/John Wilford）。空を飛べず、地を這うようにして測った当時の測量結果を、現代の測地学者たちは絶賛して止まない。

Sample

3

ブロックゲージ

長さの標準器

■ 長さの標準として最も正確で広く製造業で使われているのがこの章で扱うブロックゲージである。国際的にはゲージブロックと呼ばれるが、JIS 規格では呼び方が逆になるので、本書では JIS 規格を優先してブロックゲージと呼ぶことにする。現場の人たちはこれを「ジョーブロック」(米国) と呼び、さらに「スリップゲージ」(英国)とも言う。ジョーブロックの「ジョー」はヨハンソン (Johansson) の最初の 2 文字 (Jo) を取った略語である。長さの信頼性に順位をつけるとすれば、光の波長の次にこれが最も高いところに位置し、長さのトレーサビリティはブロックゲージなしでは成立しない。その体系は定期的な校正が義務づけられ、不確かさの値が明記されたブロックゲージの校正証明書をもって、長さのトレーサビリティの頂点になる部分が成立する。

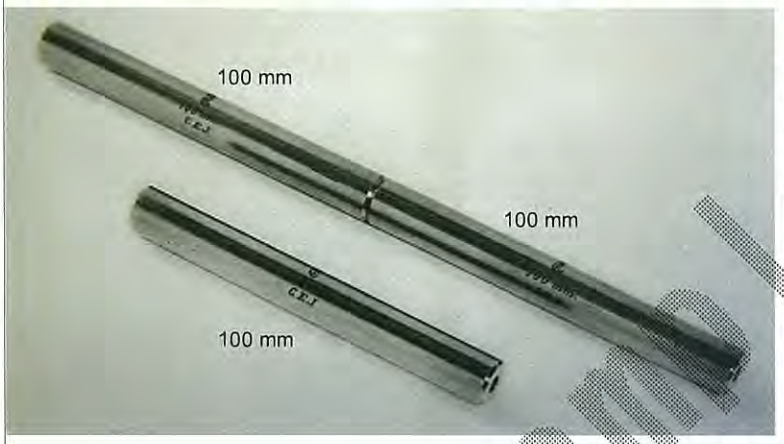
■ 本章ではブロックゲージの特許保持者であったヨハンソンを紹介し、この人がいかなる先駆者であったかについて述べることにする。「精密」という言葉はヨハンソンから始まり、それ以前には近代的な意味における「精密」という観念は存在していなかった。マイクロメートル (μm) という未踏の地に初めて到達したのもヨハンソンであった。ブロックゲージ以外にも彼は重要な基準を残している。標準温度 (20°C) がそれである。また、ヨハンソンは加工物の寸法とそれが持つべき公差値との比率を体系づけた最初の人であった。それが今ではインターナショナル・トレランスというルールに進展し、寸法と公差値の間には一定の比率が設けられるようになった。これを最初に提唱した人が他ならぬヨハンソンであった。

sample

精密測定入門　ブロックゲージ

100 mm という端度器から 1 mm が誕生する

■ メートルという単位が定まって、それが国際的に使用される場合に、実際にものを造る立場で考えてみると、メートル原器という線度器（端度器ではない）は使いにくい。しかもその原器なるものは各メートル条約加盟国に一本または二本しか届いていない。さらに、加工物のサイズのことを考えてみると、全長が 1 メートルというワークは稀である。とすると、メートル原器は完成していても、実際にはもっと使いやすい長さの基準器が必要になる。その例が下のロッドで、これは製造現場の経験が豊かであったヨハンソンが造った最初の 基準器である。



■ 当時「最も正確な人」と呼ばれていたスウェーデンのカール・E・ヨハンソン (1864-1943) はブロックゲージのセットを開発する一歩手前の段階で上のロッドを試作している。その頃から最も信頼のおける校正機関であったパリの国際度量衡局 (BIPM)でこれを校正してもらい、摂氏何度のときに 100 mm になるのかを尋ねている。その校正結果から逆算した最も正確な 20°C における端度器がこれで、ヨハンソンの頭文字 CEJ が刻まれている。軸の中央に穴があるのはラップをすると中央部が中高になる傾向にたいする逃げで、百年以上も昔のことであるから完全な平面は出せなかったのであろう。ヨハンソンはパリの国際度量衡局で校正されたトレーサブルな基準器を基にして、次々に正確な寸法をつくった。まず最初に、このロッド 2 等分にして 50 mm にし、それを 2 等分して 25 mm とした。それを次に 5 等分して 5 mm のブロックをつくり、さらにそれを 5 等分にして、1 mm をつくった。

■ その頃のスウェーデンは「鉄の国」として広く知られ、良質な鉄鉱石に恵まれた豊富な資源を有する国であった。その国から鉄の固まりであるブロックゲージが出てきたのはごく自然な結果であったようにも考えられる。ただし、良質な資源があるということだけではブロックゲージは生まれない。精錬技術があって、ヨハンソンというような先駆者がいたからである。この人のそもそもの目的は製造現場で必要となる限界ゲージを揃えることにあり、ブロックゲージは基準器というよりも、最初は合否判定用の限界ゲージというところから出発した。

■ そのため、ヨハンソンは多くの補助具類を開発し、ブロックゲージと組み合わせて現場で使えるように工夫している。この過程でヨハンソンは新しい経験をする。ラップをして鏡面になった二つの表面を合わせると密着して離れない現象が起こった。これをリンギングと呼ぶが、彼がラップした二つのブロックゲージは床に転げ落ちても密着したまま離れなくなった。リンギングはその当時、国際度量衡局が持っていたフラットなガラスでは可能であったが、金属ではこれが初めてであった。リンギングができたということは、その頃すでにブロックゲージは高度な平面度を保ち、リンギングをするのに充分な鏡面に近いラップ仕上げであったことを示唆している。

■ リンギングという物理的な現象がなければ、ブロックゲージの価値は半減する。この特性があるからこそ複数個のブロックを密着させることによって、マイクロメートル単位で、任意の、しかも正確な長さが誰にでも持てるようになった。だが、残念ながらこれは外側の端度器だけに限られ、内径用の基準器であるリングゲージでは不可能である。ブロックゲージでは 100 mm のブロックに 5 mm をリンギングすれば 105 mm になるが、この簡単な足し算が内径用のリングゲージでは通用しない。そのため、大手企業になると品質管理室の引出しには数百個に及ぶリングゲージが管理されている。それがブロックゲージになると、1 セットで全部の寸法をカバーできるという発想の素晴らしさがある。

Sample

精密測定入門　ブロックゲージ

ヨハンソンのブロックゲージセット：最小の個数で最大の組み合わせ

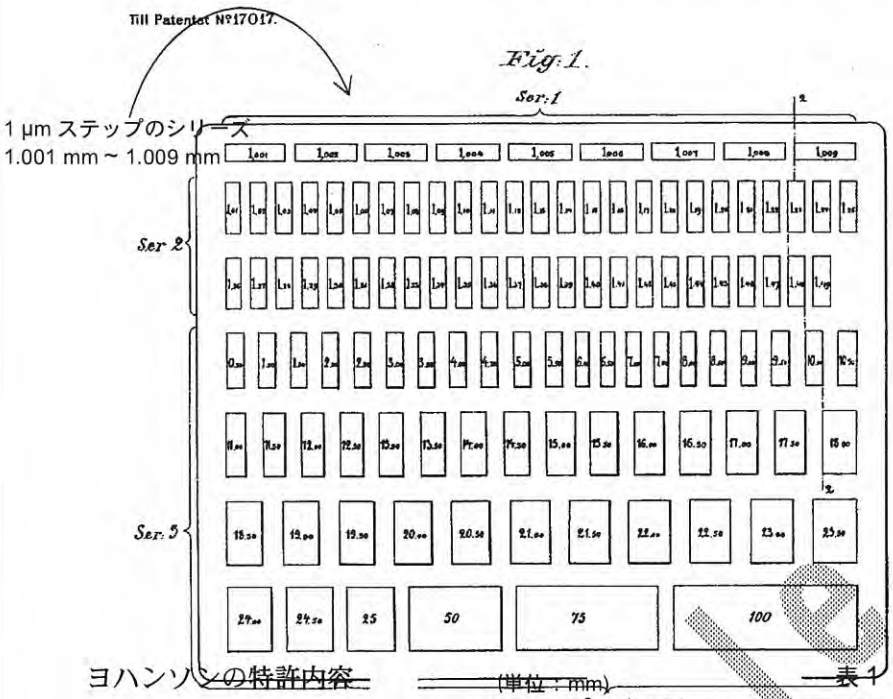


図 1　　1911 年

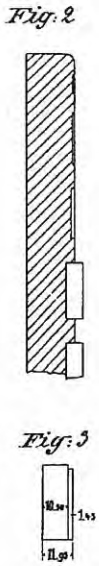


図 1 図 2 Courtesy: C.E. Johansson

ヨハンソンの特許内容　　表 1

(単位：mm)

シリーズ	サイズ	個数
1	1.001 ~ 1.009	9
2	1.01 ~ 1.49	49
3	0.5 ~ 24.5	49
4	25,50,75,100	4
計	1 ~ 100	111

■ 図 1 はヨハンソンが スウェーデンの特許局に出願した特許申請書の図である。特許に関するキーワードの一つに「先行技術」という言葉がある。すでに誰かが同じアイデアを特許化していれば "Prior Art" と呼ばれ、後になって同じものを出しても特許は取得できない。公知の事実や物理的な現象も特許ではあり得ない。審査官はヨハンソンの申請を何度も却下し、なかなかこれを認可してくれなかった。審査官には拒否するだけの理由があった。

■ 結局、ブロックゲージ自体は特許にならず、二つのブロックゲージを重ね合わせると密着するというリンギングも、物理現象であって、ヨハンソン固有のものではなかった。彼が取得した特許の内容は 表 1 の "シリーズ" という組み合わせだけである。これは 111 個組のセットであるが、この通りにすると当然ながら彼の特許に抵触する。表 1 にある四つのシリーズ、この数字の組み合わせだけが彼の特許である。そしてしばらくすると、ドイツから競合メーカが現われた。ラップ(研磨)仕上げの 1 マイクロメートル単位の寸法を他社が正確に造れたかどうかは疑わしい。それに他社は摂氏 0° で値付けをしていたようである。結局、ブロックゲージという端度器は時が経つにつれてヨハンソンの独占事業と化していった。

■ ヨハンソンの狙いは最小の個数で最大の組み合わせを可能にすることであったが、これに類似した方法に 1 グラムと 2.5 グラムを足すと 3.5 グラムになるという当然な足し算がある。四角いブロックを重ねて足すのは特許ではなかった。

▼ブロックゲージの特許保持者ヨハンソン　　図 2

Sample

外側マイクロメータ

試行錯誤する時代

1876 年

図 1

図 2

■ まだ何も精密に測るものがなかった 19 世紀に考案された測定器には、今日まで継承されている測定の原理を初めからもって生まれた製品もあったが、他の大半の測定器は試行錯誤の域を出ていなかった。図1、図 2 もその例で、製造年代の刻印があり、英国マンチエスターで造られている。カバーの下には渦巻き状の溝を持つ円盤があって拡大機構の役目を果し、下のつまみを回すと円周に沿って指針が回転して、同時に直立している両側の測定子が中央に向かって移動する。

■ 図 2 の表面に Decimal Gauge .001 と記されているのは、それまでの最小目量であった 1/128 インチという分数読みではなくて、十進法であるということを強調するもので、目量をより細かくしようとした努力の跡がうかがえる。このマイクロメータはずっと後になって提唱された「アッベの法則」を満足せず、精度という言葉を当てはめられるかどうかも疑問である。収納箱は木をくり貫いた丁寧な作りで、大事に使われていた測定器であったことが分かる。

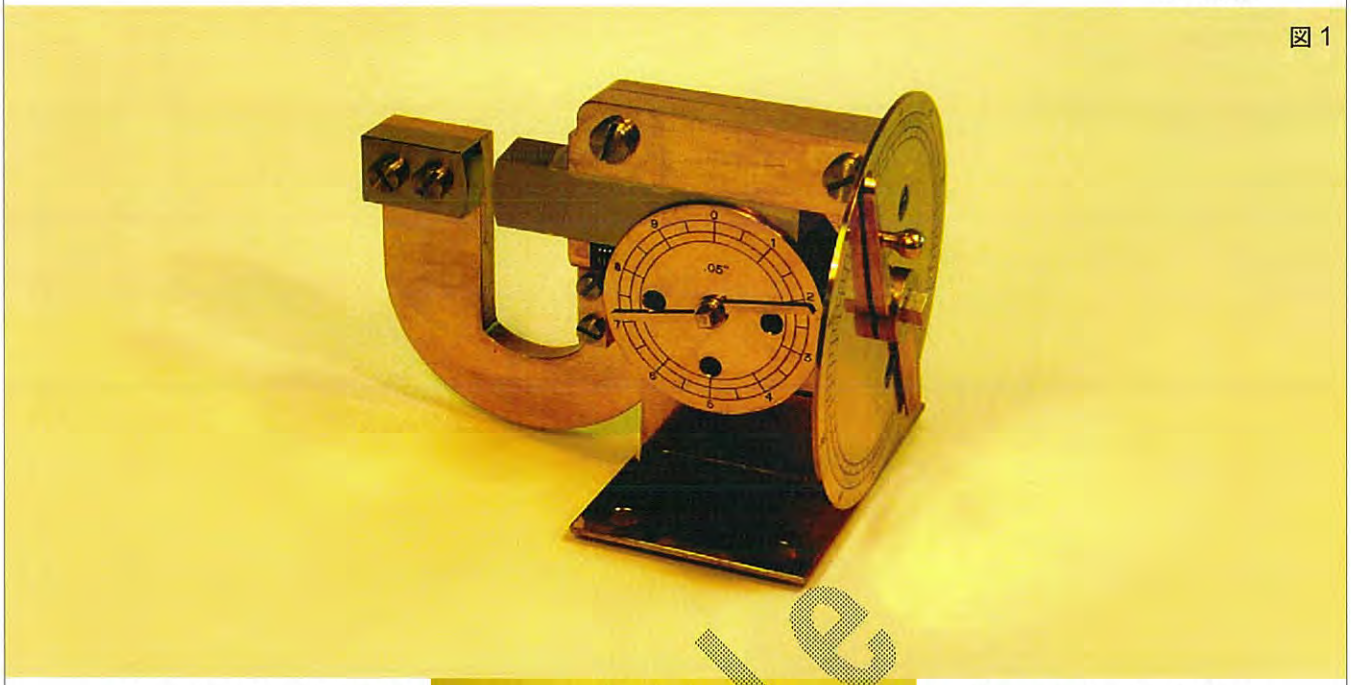
sample

精密測定の基礎　外側マイクロメータ

マイクロメータの起源

1772 年頃

図 1



▲ ジェームス・ワットによる卓上型のマイクロメータ。歴史上最初のもので、これがその起源である。マイクロメータの原理であるネジを使って拡大する方法の原型が認められる。当時の被測定物の加工面は一定でなかったためかアンビルとスピンドルの先端はフラットではなく曲面である。

図 2

◀ ジェームス・ワットは必ずしも蒸気機関を最初に開発した人ではなく、ライコーメンによる蒸気機関が当時すでに存在していた。ワット自身は元来インスツルメントメーカであり、彼の能力は本器の構造を通じてうかがい知ることができる。スピンドルとアンビル及びネジを除き、黄銅製で、本器は有志による複製である。

ジェームス・ワット

■ 蒸気機関の性能を一段と高め、産業革命の一役を担ったジェームス・ワット(1736-1819) によるエンジンは、いわゆるシングルアクションと呼ばれた方式で 1769 年に、そしてより進化して 8 馬力になったダブルアクション方式は 1782 年にワットの特許となり、スチームエンジンは彼の独占事業となった。英国に興った産業革命は大きな時代の変革をもたらし、いろいろな方面からの評価がなされているが、ワットによる蒸気機関が革命の担い手となり、英国に豊富に埋蔵されていた石炭という熱エネルギーの助けをかりて産業革命が達成された。1800 年頃、イギリスでは約 500 基のスチームエンジンが稼動していたと伝えられる。ホースパワー (馬力) という単位を考案したのもジェームス・ワットであった。

■ このベンチ型のマイクロメータの構造を観察すると、ワットの精密さに対する鋭い感覚が伝わってくる。スピンドルとアンビルの先端に与えられた大きな曲面を見ると、こうしなければ測れなかったらしい当時の素材の凸凹が推察される。この仕様なら円筒の肉厚も測れたはずである。ねじは 1 インチの間に 18 回転する送りねじを使い、1 回転を目盛板で 100 等分にし、ウオームギヤを介して小さい目盛盤の指針を動かしている。マイクロメータの出生地は確かに英国であったが、近代的なマイクロメータはフランス人ジーン・パーマーにより提案され、さらに後年になると、開発と改善の舞台が新大陸に移り、工業化しつつあった東部のボストンを中心としてマイクロメータは急速に発展していった。

精密測定入門　外側マイクロメータ

マイクロメータの起源（英仏を経由して新大陸へ）

左側のアンビルは常時この状態にあり、平たいワークを挟むとその面になじんで立ち上がる。アンビルの根元が球状になっているからで、この方式のことをギンベルと呼ぶ。

図 1

図 2

発展の経緯

■ フランス人パーマーによる1848年の特許（図 4）をもって近代マイクロメータの起源とするのは、現行製品の標準仕様が基本的にはパーマーのそれと何ら変わらないことによる。図 4 の測定器はパリの万国博覧会に出品され、それがアメリカからの訪問客の注目するところとなった。ブラウンとシャープの二人である。両人はその後、1867 年にアメリカで最初のマイクロメータを開発することになるが、その記念すべき製品は 図 1、図 2 と同じサイズのきわめて小さなポケット型のマイクロメータであった。これで何を測るかというと、その当時問題となっていた黄銅の板厚を正確に測る目的でこの製品が開発された。そのため測定レンジはこれで充分であった。ブラウンとシャープは図 4 のパーマーのマイクロメータを参考にしたが、ミリ仕様であった 1 mm ピッチのねじをインチ仕様の 40 TPI (Threads Per Inch) に変更している。つまり、40 回スピンドルを廻すと 1 インチ進むという仕様であった。

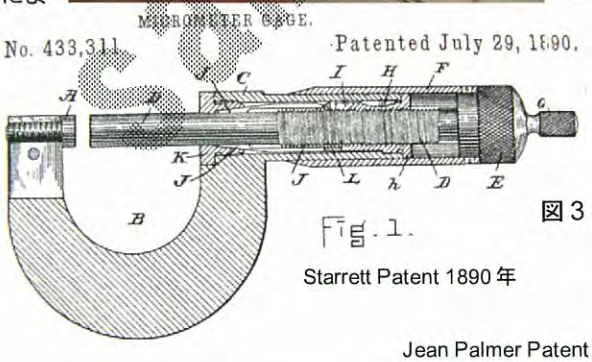


図 3

Starrett Patent 1890 年

Jean Palmer Patent 1848 年

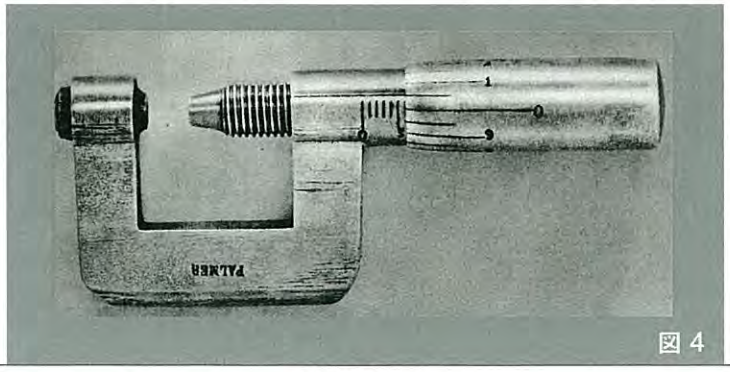


図 4

■ 図 3 において右端の Gとある部分は早く回転させるための径の小さい部品で、スピーダーと呼ばれ、40 回転しないと 1 インチ進まないスピードの遅さに対応するものであった。