

星の都の物語

パリに天文学の足跡を訪ねて

パリは芸術の都であると同時に、

近現代における科学技術の発展に大きく寄与した場所でもある。

私たちが、星を美しいと思う気持ちと宇宙のことを知りたいという気持ちを同時に抱くのと同じように、この街では芸術と科学技術という2つの要素が互いを高め合いながら共存しているように感じられる。

廣瀬 匠 (星のソムリエ京都・パリ第7大学・SAW/ERCプロジェクト)

ひろせ・しょう

元アストロアーツのウェブサイト編集者で、2014年からパリ第7大学大学院に在籍している。執筆中の博士論文のテーマは、15世紀の南インドで書かれた天文学の教科書を読み解くこと。星のソムリエでもあり、得意な解説はもちろん天文学の歴史。「@kippis_sg」で天文の話題とパリの生活をつぶやき中。

第2回

地球の自転を刻むアート

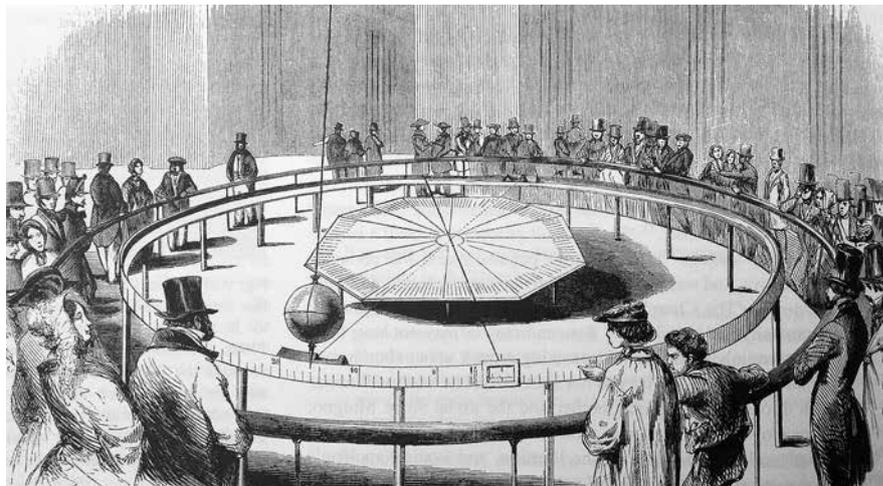
1851年当時のセットを復元したフーコーの振り子。壮大な建築や地下に眠る偉人たちと並び、多くの訪問者を釘付けにするバンテオンの名物だ。

芸術と科学が融和する都市

パリの第5区のパンテオンは、18世紀に国王ルイ15世の命で教会の大聖堂として建立され、フランス革命後には偉人を祀る霊廟となった施設だ。高さ83メートルのドームは遠くからでもよく目立ち、多くの観光客を引きつけている。しかし予備知識を持たずに中へ入ると、ギリシア神殿風の柱の間を通った先、吹き抜けドームの真下で揺れている長さ67メートルの大きな振り子に面食らうことだろう。これこそが芸術と科学が同居する都市パリを象徴する存在、「フーコーの振り子」である。

じゅうぶんに長い振り子を、一日中勢いを失わずに振れ続けるように工夫して設置すると、重りが往復する方向は時間とともにゆくりと変化する。振り子そのものには振動する方向を一定に保とうとする性質があるため、回っているのは足下の地球の方だ。つまり、この実験で地球が自転していることを確かめることができる。同様の装置は世界中にあり、日本でも国立科学博物館など各地で展示されているので、ご覧になったことがある方は多いだろう。

フーコーの振り子は、考案者のレオン・フーコー（1819～1868年）が1851年にここパンテオンに設置したことで一躍有名になった。当時のフランスは復古王政、共和制、帝政、と政治体制が右から左へと（それこそ振り子のように）めまぐるしく変わった時代であり、パンテオンもまた教会に戻ったり再び霊廟にされたりと役割を変え続けることになった。ここはパリを代表する建物であり、時代のシンボルでもあったのだ。そんな中でフーコーが振り子の公開実験を成功させたことは、科学の偉大さを象徴する出来事だったと評価されることもある。無論、19世紀も半ばになると、既に地球が自転していることは常識だったが、それを誰の目にも見えるようにしたのはフーコーが初めてだ。何より、この実験装置には芸術作品のような美しさがあり、優れた絵画や彫刻がそうであるように「この作品の背景には何があるんだろう」と思わせる魅力がある。

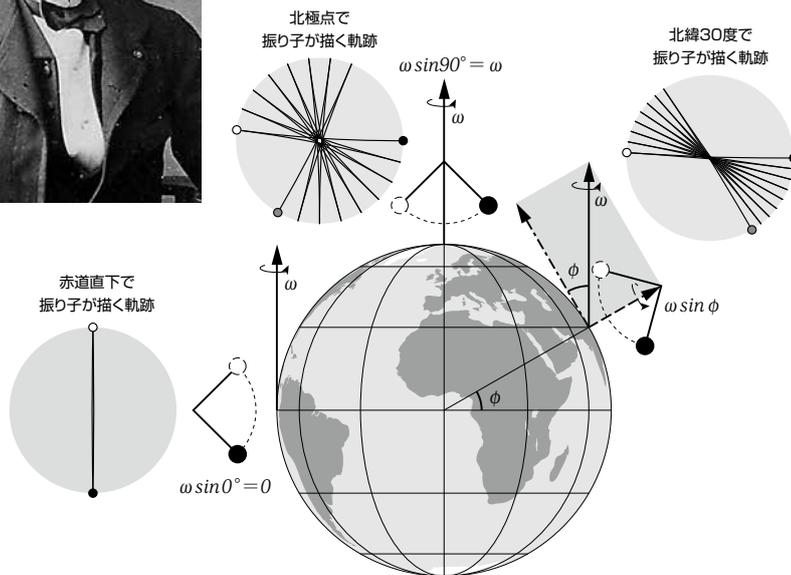


▲1851年4月、地球の自転を可視化する実験の様相を報道する新聞記事のイラスト。パンテオンは連日、見物客でにぎわっていたという。

▼レオン・フーコー（Jean Bernard Léon Foucault）の名はエッフェル塔にも刻まれているほか、小惑星にもつけられている（5668 Foucault）。

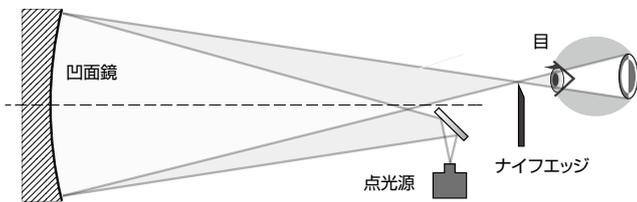


パンテオン外観。古くからこの地にあった修道院を復興させる目的で建築され、フランス革命後に霊廟となった。ギリシア建築を思わせる入口と大聖堂らしいドームが特徴。

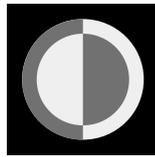


1周期＝1時間とした仮想振り子が8時間の間に描く軌跡のイメージ

ω は地球自転の角速度ベクトルで、緯度 ϕ の地表面に対する垂直方向の角速度ベクトルは $\omega \sin \phi$ で表される。北極点では地球の自転速度と等しく、振り子の振動面は約24時間で1周する。北緯30度では約48時間かかる。赤道直下では振り子の振動面は変化しない。

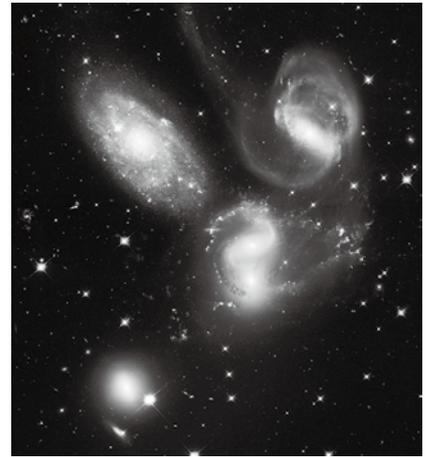


フーコーテストの原理。凹面鏡に光を当て、反射光を鋭いナイフなどで隠しながら観察する。仮に凹面鏡が完全な球面なら全ての光が一点に集まるので、その焦点にナイフを置けば真っ暗になる。そのままナイフを手前にずらすとナイフのある側が、奥にずらすと反対側が暗くなる。天体望遠鏡の主鏡は外側へ行くほどカーブが緩やかになるため、右図のように外側と内側とで暗くなる側が逆転する。こうして主鏡の性質と歪みを正確に調べることができる。



▶ステファンの五つ子はフーコーが作った望遠鏡で1877年に発見された。この画像を撮影したハッブル宇宙望遠鏡の姿勢制御には、フーコーが名付けたジャイロスコープが使われている。

©NASA, ESA, and the Hubble SM4 ERO Team



装置作りの名人

レオン・フーコーはパリに生まれて、少年時代の一時期を除いてパリで暮らし続けた。虚弱体質のせいもあって授業についていくことができず、エリートコースを歩むことはできなかったが、市井の学者として頭角を現すことになる。1830年代にフランス人ルイ・ジャック・マンデ・ダゲール（1787～1851年）が世界初の実用的写真術「ダゲレオタイプ」を発明すると、フーコーはこれを顕微鏡写真に応用する研究に取り組み、光源を工夫することで実用化に成功した。このようにフーコーは既存の物を組み合わせる新たな成果を挙げるのが得意だったようで、1850年には実験室内で光の速さを計測する装置を開発して、光が水中では空気の中に比べてゆっくりと進むことを検証している。

天文分野で一番よく知られている業績は、1858年に反射鏡の性能を評価するためにフーコーが考案した試験法、通称「フーコーテスト」（「ナイフエッジテスト」ともいわれる）かもしれない。今でも反射望遠鏡を自作する方には欠かせないフーコーテストだが、フーコー自身もこの技術を活かして望遠鏡の制作に携わっていた。いやむしろ、自分が作る望遠鏡の性能を高める必要に迫られてフーコーテストを編み出したという方が近いかもしれない。

当時、反射望遠鏡は屈折式よりも性能面で劣っていた。ウィリアム・ハーシェル（1738～1822年）が活躍した時代の反射鏡は金属製だったが、金属（主に青銅が使われた）は重く、ただでさえ反射率が低い（20%程度）うえに、すぐに表面が酸化してしまうため何度も磨く手間がかかるという問題があった。そのため、金属より軽く扱いやすいガラスを使った屈折式望遠鏡の方が活躍する機会が多かったのだ。

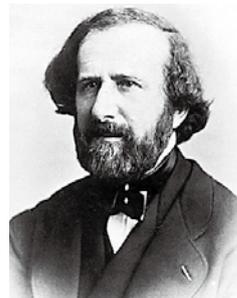
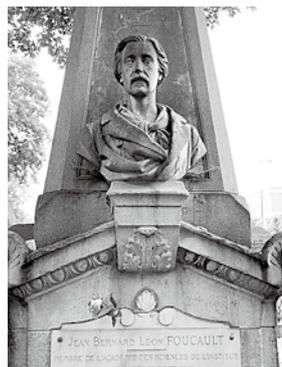
そこでフーコーが目をつけたのが、当時

生まれたばかりの銀メッキ法である。ガラスを凹型に磨いて、その表面に銀の膜を作れば、軽くて反射率が高い（60%以上）反射鏡の完成というわけだ^{※注1}。1857年に最初の反射鏡（口径10cm）を作ると、その後数々の望遠鏡をパリ天文台などに提供している。彼が作成した最大の望遠鏡は口径80cmで、1862年に作られ1864年にマルセイユ天文台に設置された。1877年にエドゥアール・ステファン（1837～1923年）がこの80cm望遠鏡でペガサス座のコンパクト銀河群NGC7317～7320、通称「ステファンの五つ子」を発見している。

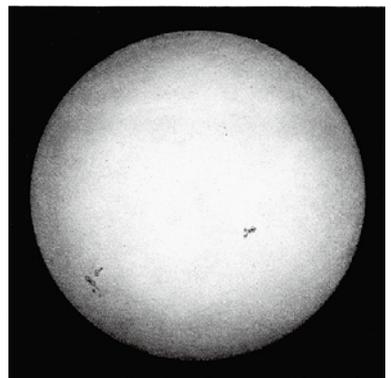
もうひとつ、フーコーの業績とされるものにジャイロスコープがある。最初にこの装置が考案されたのは1817年のこと、ドイツのヨハン・ボーネンベルガーによるものだが、フーコーは1852年にギリシア語のギュロス（輪）



◀最初に振り子実験が行われたフーコーの家。壁にはそれを伝える言葉が掲げられている。
▼モンマルトル墓地にあるフーコーの墓には彼の発明品や業績が刻まれている。



1845年4月2日、フーコーがアルマン・フィゾー（上）と共同で撮影した世界初の太陽写真。ダゲレオタイプで露出時間は60分の1秒だった。



※注1…ただし銀もすぐに酸化してしまうため、高い反射率を維持することができないという問題は残っている。これが克服されるのはもう少し後にアルミニウムを蒸着する技術が開発されてからのことだ。



パリ工芸博物館では、フーコーが公開実験で使った鉛球の実物が今も揺れている。ここもかつては教会だったドームで、ある意味振り子がよく似合う場所である。

科学と芸術の間を 行き交うフーコーの振り子



◀フーコーが1851年1月に自宅で振り子の実験を行うために作らせたものとされる19kgの鉄球。

に太陽の写真撮影を依頼している。世界初の太陽写真はこの二人が1845年に撮影したものだ。フーコーと天文学のつながりは案外深い。

技術にして芸術

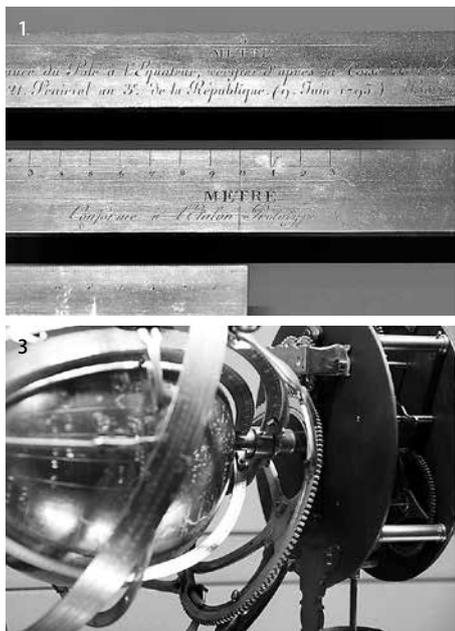
フーコーが自宅での振り子実験で重りとして使った19kgの鉄球とパンテオンで使った28kgの鉛球は、パリ工芸博物館（ミュゼ・デ・ザール・ゼ・メティエ Musée des Arts et Métiers）で今も見ることができる。特に1851年のパンテオンで振れていた鉛球は今でも「現役」で地球の自転を証明し続けているので、パンテオンを訪れたらぜひここも見たいところだ。ここで見る振り子も、やはり美しい。

フランス語の“art”は「技術」、「métier」は「職人、職務」を意味し、ふたつを合わせれば「技術や工芸」というニュアンスになる。そんなわけでパリの Musée des Arts et Métiers、つまり工芸博物館の展示物は機械や工業製品などが中心だ。とても無機質で地味な場所かと思いきや、中に入ってみるとひとつひとつの展示品が芸術品のように輝いていて見とれてしまう。「技術」としてのartだけでなく「芸術」としてのartにもなっている。展示の工夫、建物の雰囲気、そして何よりそれぞれの目的のために技術の粋を集め工夫を凝らされた製品本来の美しさのおかげであろう。

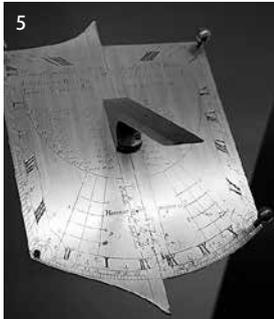
ここではミュゼ（英語で言うミュージアム）という単語を「博物館」と訳したが、ループ

を元にジャイロスコープという名前をつけた。その名の通り、ジャイロスコープは3重に組み合わせられたリングの中に回転するコマを入れた装置だ。振り子と同じように、コマは回転方向を維持しようとする性質があるので、フーコーはこのジャイロスコープを地球の自転を示すための実験装置にするつもりだったらしい。当時はコマを止めずに回し続ける技術がなかったため、振り子のようにうまくいかなかったが、電動モーターが発明されてからはジャイロスコープは様々な形で応用され、ハッブル宇宙望遠鏡などの人工衛星や探査機では姿勢制御装置として重要な役割を果たしている。

フーコーが10歳から生涯暮らし続けた家はパリ6区に今も残っている。その壁には美しい装飾とともに「この建物でフーコーは地球の自転を証明する有名な実験を実現した」という文字が刻まれている。その記念碑の通り、フーコーが最初に振り子の実験を行ったのは1851年1月、自宅でのことだったらしい。これを聞いたパリ天文台長フランソワ・アラゴ（1786～1853年）の協力で2月3日にはパリ天文台での公開実験が実施され、これがパンテオンでの実験へとつながった。ちなみにアラゴはフーコーのことを顕微鏡写真の業績を通じて知っており、フーコーと彼の友人アルマン・フィゾー（1819～1896年）



(1) 1795年に真鍮で作られた暫定メートル原器にはメートルの定義などが刻まれている。(2)はフランス革命期に作られた器械時計。一見10時間だけの文字盤だが、外側には午前午後12時間ずつの目盛りがはいっている。機械仕掛けの天球儀(3)や中世のアストロラープ(4)、日時計(5)など、器械や機械が好きな人にはたまらないラインナップ。



◀パリ工芸博物館のシンボルにもなっているアヴィヨン皿(エオル皿とも)。ライト兄弟より早い1897年に蒸気機関による航空に挑戦したが飛行は実現しなかった。

ルやオルセーなどの「美術館」も同じミューゼである。そう考えると、この施設を博物館という枠組みに当てはめて捉えてしまうのはもったいない。ここからは、そんな美術館としての魅力も持つ「ミューゼ」の展示をご紹介します。

秤、測り、計り…

「知らざるといふ無知、そして知るための手段を持たざるといふ貧しさを啓蒙しなければならない」

ミューゼの母体であるフランス国立工芸院(Conservatoire national des arts et métiers、略称CNAM)が1794年に設立されたときの報告書にこんな言葉がある。当時はフランス革命期の真っ直中。展示物にも当時の思想が色濃く反映されている。

フランス革命期に旧体制下で使われていた度量衡は廃止され、メートル法に移行した。すなわち長さの単位「メートル」を地球の大きさを元に定義し(第1回参照)、このメートルを元に容積や重量などの単位を決定したのである。ミューゼにも度量衡に関わる展示が多い。メートル原器など改革後の器具だけでなく、王制下やさらに古い時代の秤や重りなどもある。「長さ」「重さ」「体積」など測る(計る/量る)対象ごとに様々な器具が並べられていて壮観だ。

まさに世界を「知るための手段」がこのミューゼには集められている。そしてその中に、星を観測する器具のコーナーもあるのを見逃すわけにはいきまい。近代の望遠鏡だけでなく、日時計や天球儀、さらにはイスラム世界を中心に広く使われた天体観測補助装置・アストロラープも見ることができる。ここに展示されているアストロラープはいずれもルネサンス期のヨーロッパで作られたものだが、どことなくイスラム的な装飾の面影を残している。歴史的価値だけではなく芸術品としての美しさも兼ね備えている。

ところで、メートル法には十進法という大原則がある。1メートルの100分の1が1センチメートル、1グラムの1000倍が1キログラムというように、全ての単位は十の累乗になっているのだ。12インチで1フィート(長さの単位)、16オンスで1ポンド(重さの単位)

などといった非メートル法の単位系と比べてすっきりしている。

一方、時間だけは今でも1日24時間、1日60分、1分60秒という十進法によらない単位系が使われている。実は革命政府はここにも手を付けており、1793年に1日を10時間、1時間を100分、1分を100秒と定義し直していた。同時期に採用されたフランス共和暦^{※注2}ではさらに、7日間の週(semaine) に代わって10日間、すなわち旬とも呼ぶべき単位(décade) まで使っている。なお1 か月は3旬、1年は12 か月+年末に加えられる5日か6日の祭日で構成されていた。

ミュージゼには当時の時計が展示されていて、確かに文字盤の1周が10 や100 に区切られている。しかし当時の人々がすんなりと新しい単位を受け入れたはずがない(メートル法でさえもフランスで定着するまでには数十年を要した)。多くの時計が10時間100分と同時に、従来の24時間60分制での時刻も読み取れるように作られていた。公式に用いられる十進法時間と自分の時間感覚を合わせるのは大変だったに違いない。

10時間100分制がまともに使われた期間

※注2…革命暦とも呼ばれる。なお改暦の背景には十進数へのこだわり以前に、旧体制や宗教の影響を極力排除したいという思惑があったことを述べておく必要があるだろう。革命政府が廃止しようとした(が結局失敗して現在も使われている)グレゴリオ暦は、カトリック教会の教皇グレゴリウス13世が定めたカレンダーである。

は1年半にも満たない。10日の旬はもう少し長続きしたが、休日(つまり週末)が減ることなどが嫌がられて、10年持たずに撤廃。共和暦そのものはナポレオンの時代、1805年に廃止が決まった。偉大なメートル法を生み出したフランス革命も、時間だけは十進法に変えることができなかったのである。

通いくなるミュゼ

ミュゼは設立以来、各時代の最先端技術を収集してきた。17世紀フランスの哲学者・数学者パスカルが発明した機械式計算機。残念ながら金額の計算に特化していて、天文とは関係ない。実は計算機が天文学で重要な役割を果たすようになったのは20世紀に入ってからだ。ちなみに「世界最古の天文計算機」とも呼ばれる、ギリシャのアンティキテラ島沖で発見された装置の復元品もミュゼに展示されている。

最初期の写真技法であるダゲレオタイプの機材一式。発明者であるフランスのダゲールは1839年に世界で初めて天体写真(月の撮影)に挑戦した人物でもある。

ヨーロッパの主力ロケット、アリアン5の模型と、そのエンジンであるヴァルカンの実物。現在チュリュモフ・グラシメンコ彗星を探索中の探査機ロゼッタを打ち上げたのもアリアン5だ。

展示の充実ぶり、その背景にあるフランスの偉大なる科学技術の歴史に圧倒された

私だが、その後地元の友人から聞かされた話でさらに驚かされた。ミュゼを管轄し、同じ建物に本部を置くフランス国立工芸院(CNAM)は、今では収集と展示以上に教育に力を入れており、高等教育機関として年間10万人の学生を集めているという。その大半は社会人だ。パリ市民にとって、この場所はミュゼというより学ぶ場所というイメージが強いらしい。

CNAMは科学技術だけでなく経営学や社会学も含む幅広いカリキュラムを提供していて、キャリアアップや資格取得を目指す受講生が多い。しかし友人の話によれば、「余暇」としてここでの講座を楽しむ社会人も大勢いるそうだ。全力で仕事に取り組み残業や休日出勤も辞さない日本人にとって、仕事帰りにわざわざ仕事と関係ない大学や大学院レベルの物理学の講義を聴きに行くなど到底考えられない(上司とのお酒に付き合わないといけなくてそれどころじゃないよという人も多そうだ)が、ほどほどの労力で仕事を済ませて定時だけは死守するフランス人ならありえる。納得できる。……うらやましい。

観光客としてパリを訪れる方でも、このパリ工芸博物館(ミュゼ)は足を運ぶ価値がある。天文ファンならなおさらだ。展示物の解説ラベルはフランス語と英語だが、日本語のオーディオガイドを借りることもできる。通常は午後6時閉館だが、木曜日は午後9時半まで延長される上に夜間入場料が無料、しかも結構空いているので狙い目だ。



◀欧州宇宙機関(ESA)の主力ロケット、アリアン5のエンジンである「ヴァルカン」。19世紀から20世紀初頭にかけてのレトロな車や飛行機がずらりと展示されている中に紛れているので見落としそうになる。

▶ミュゼは中世に建設された教会の建物を転用している。手前には、フランスが米国に贈った自由の女神像の試作品(オリジナルの石膏から作った銅像)。



Musée des Arts et Métiers (パリ工芸博物館)
<http://www.arts-et-metiers.net/node/1090> (日本語)