

時空の科学としての暦の歴史

親松和浩

1. まえおき

数年前エジプトの友人に日本の旧暦の話をしたところ、彼の祖母も確か農業暦を使っていたという話を聞いた。現在の伊勢神宮の神宮暦にも農業の記述がある。暦はこれから起きる季節の移り変わりや昼夜の長さの変化を予測し、農業や漁業を始めとして我々の暮らしの指針を与えてくれるものである。

暦はもともと天体の運行の観測を元に作られたもので、時空の科学そのものであり、その精度はその時代の科学のレベルを反映する。地球が太陽の周りを1年周期でほぼ円軌道を回っていることが分かったのは約400年前のことである。地球の自転周期を1日として、1年が何日になるかを、数100年単位で使える暦ができる程度に精度よく決めることができるようになったのはその頃であった。20世紀には1年が何日になるか精度よく決定できるだけでなく、地球の自転周期のきわめて微小な変化さえ測定できる精密な時間の物差しをえるようになった。

本稿では、ヨーロッパにおける暦を時空の科学として歴史的に概観し、あわせて現代の時空の理論であるアインシュタインの相対性理論が身近なところで活躍していることを紹介したい。

2. エジプトの暦

地球上で暮らす我々の素朴な感覚からすれば、固定した地球の周りを太陽が回っていると考えるのが自然である。夜の星空に目を転じれば、互いの位置をほとんど変えない星（恒星）が1日に1回転している。恒星間（あるいは星座間）の位置関係は季節によらないが、太陽と恒星の位置関係は季節によって大きく変わるので少し厄介である。

そこで、まず地球を取り巻く大空を巨大な球（天球）と見立て、恒星は天球上に固定され、天球が1日1回転すると考える。太陽は天球上を1年かけて黄道とよばれる軌道を一周すると考える。

エジプトでは紀元前4200年頃（あるいは紀元前2700年頃）既に、1年が約365日であることが知られていた。夏至の頃、シリウス（太陽の次に明るい最も明るい恒星）が日の出の直前に東の地平線に見える。明るくなる年にまたシリウスが同じ位置に見えるようになるまでの日数から1年を365日と決めたとされている。

エジプト暦では1ヶ月を30日とした12ヶ月と年初においた5日の祭日を加えて1年を365日とした。4年で約1日の誤差が出るため、約1460年でまるまる1年ずれてしまう。エジプトではその後、1年が約365.25年であることが知られ紀元前3世紀にプトレマイオス3世が改暦を試みたが、宗教上の理由から1年365日の暦を使い続けたそうである。人生を仮に80

年とすると一生の間に 20 日のずれが生じ、同じ日付でも季節がかなりずれる。しかし、そのずれがどの程度か分かって暮らしていれば、それほど不自由はない。実際、夏至がいつになるかはシリウスの観測から別途決めていたので生活上の不便はなく、改暦を必要とはしなかったようである。

3. ユリウス暦

ユリウス暦はエジプトの暦を下敷きにして紀元前 46 年に作られた。エジプトのアレキサンドリアの数学者ソシゲネスの助言によって 1 年を 365.25 日としたもので、紀元前 45 年 1 月 1 日からユリウス・カエサル（ジュリアス・シーザー）が実施した太陽暦である。端数の 0.25 日の調整のために 4 年に 1 回 366 日の閏年が入る。

暦は全ての人間の生活を律する最も拘束力の強い法であるともいえる。その影響は政治宗教上の儀式から農業・商業などの産業、属国の統治や敵対国との軍事作戦など、生活の隅々にまで影響する。カエサルの改暦は彼の掌握していた権力がいかに強大であったかを物語るものでもある。

1 年を 365.25 日と近似するユリウス暦は、人の一生のスケールでは季節と日付の対応が十分な精度を持つ。しかし、これでも千年も経つと誤差の累積が 10 日近くになり実用上の問題が生じる。

321 年にローマ皇帝コンスタンチヌスはキリスト教を公認し、325 年のニカイア公会議は復活祭を「春分の日（3 月 21 日）またはそれ以降の最初の満月の次の日曜日」と決めた。ところが、13 世紀には本当の春分の日（太陽が黄道の春分点を通過する日）は 3 月 21 日から 1 週間程度ずれ、季節のずれを感じられるほどになってしまい、ロジャー・ベーコンなどから改暦の意見も出るようになった。

4. グレゴリオ暦

ユリウス暦にかなりの誤差があることは知られていたが改暦が実際に行われたのは 16 世紀に入ってからである。1582 年 2 月 24 日に発布されたグレゴリオ暦では、同年の 10 月 4 日（木曜日）の翌日を 10 月 15 日（金曜日）とする荒療治をおこなった。ただし、変更は日付だけで曜日はそのままの順としている。

グレゴリオ暦は現代の我々も使っているもので、1 年を 365.2425 日とする。端数が 0.2425 日とかなり半端なため、閏年は 4 年に一度だが「100 で割った商が 4 で割れない年は閏年としない」という例外を設ける。例えば、1600 年、2000 年、2400 年は閏年だが、1700 年、1800 年、1900 年、2100 年は閏年としない。

ユリウス暦とグレゴリオ暦の 1 年の長さの違いはわずか

$$365.2425 - 365.25 \text{ 日} = 0.0075 \text{ 日} = 0.18 \text{ 時間} = 10 \text{ 分 } 48 \text{ 秒}$$

にすぎない。ユリウス暦でも 100 年間の誤差は 1 日にも満たず、人間の一生の時間スケールでは十分な精度である。グレゴリオ暦と太陽年との差はさらにきわめて微小である。

$$365.2425 - 365.24219 \text{ 日} = 0.00031 \text{ 日} = 0.00744 \text{ 時間} = 0.4464 \text{ 分} = 26.784 \text{ 秒}$$

1日のずれが生じるのに3000年も要する。

天体観測によって季節と日付を対応させる暦を作る試みはグレゴリオ暦で完成したと言ってよい。この後は、航海や軍事上の必要から、地球上の任意の場所での時間と位置の決定の高精度化が求められるようになる。

5. 共通の暦の必要性

ユリウス暦からグレゴリオ暦への改暦では1582年の10月5日から14日までの10日間がなくなってしまい、10月は20日間だけ、1582年は355日となりきわめて変則的である。カエサルの時代よりも社会の仕組みが遥かに複雑になったこの時代の改暦は容易なことではなかったはずである。それにも関わらず改暦をこの時期に行った背景には、宗教改革のうねりの中でローマ教皇の権威を確認させようという強い意図があったと推測できる。新旧両教会の調停を当初目的としたが、新教側が出席を拒否し、結局カトリックの立場を確認する場となったトリエント公会議が開催されたのは改暦に先立つ1545年から63年であった。

そうした影響もあって、プロテスタントの諸国や東方正教会の諸国では、グレゴリオ暦導入は100年以上遅くなった。例えば、ドイツのプロテスタント諸都市とデンマークでの導入は1700年3月1日、イギリスは1752年9月14日、スウェーデンは1753年3月1日、日本は1873年(明治6年)1月1日であった。東方正教会にいたっては1923年であった。

ロシアでは1917年の革命の当時ユリウス暦が使われていて、その日付はグレゴリオ暦よりも13日遅れていた。そのためこの年の革命をユリウス暦で2月革命、10月革命と呼んだり、グレゴリオ暦で3月革命、11月革命など呼んだりしてややこしい。

このように改暦には大きなコストが伴うだけでなく、時間の基準という全ての法律に超越する法の決定と言う象徴的な意味ももつため、宗教や国家のアイデンティティーや尊厳と言った問題が関わりかなり厄介である。しかしその一方で、国家間の交流が盛んになればなるほど共通の暦や世界標準時の必要性が増してくる。

6. 世界時

16世紀はスペインとポルトガルが争って世界各地を自国の領土としていた時代であった。グレゴリオ暦に改暦の頃は、両国を新興勢力のオランダと英国がまさに凌駕しようとする頃であった。英国がスペインの無敵艦隊をアルマダの海戦で破ったのは1588年、改暦から6年後のことである。英国はその後オランダとの争いの後に7つの海を支配して大帝国を築く。

航海での船舶の位置の正確な決定は軍事的にも商業的にもきわめて重要である。こうした要請に応えるべく、1675年チャールズ2世によって設立されたのがグリニッジ天文台である。グリニッジ天文台は経度0°の基準の地であり、天体の観測によってグリニッジ標準時(GMT: Greenwich Mean Time)と呼ばれる平均太陽時を決定する。GMTにあわせた時計と天体観測を組み合わせることによって船舶の位置を正しく決定することができる。天体観測の進歩は暦の高精度化をもたらし、海上交通の安全と効率化を通して軍事および商業的發展に大きく貢献した。現在でも、グリニッジ天文台を通る経度0°での時刻を世界共通の時刻として世界時と

呼んでいる。

こうした発展は、17世紀に始まる近代物理学の誕生と発展と不可分のものである。その萌芽は、16世紀のコペルニクスの地動説（「天球の回転について」）、ティコ・ブラーエの天体観測とケプラーによる解析（ケプラーの3法則）に認めることができるが、宗教上の解釈が障害となって花開くにはいたらなかった。17世紀に入ると、地動説を唱えるガリレオへの宗教裁判による迫害にもかかわらず、デカルトは力学的世界観や解析幾何学への道を開き、ガリレオの没年には近代科学最大の科学者であるニュートンが生まれる。ニュートンは運動法則、万有引力の法則の発見し、それを記述する微積分学を構築して、古典力学（ニュートン力学）を創始した（「自然哲学の数学的諸原理（プリンキピラ）」1687年）。

7. 原子時と協定世界時

1905年は物理学の奇跡の年と呼ばれている。この年、アインシュタインが光電効果の理論、ブラウン運動の理論、特殊相対性理論という3つの革命的な論文を発表して、現代物理学への扉を大きく開いたからである。このうち光電効果の発見は原子物理学、量子物理学の構築へと導く重要な発見であった。

時間の単位の精密な定義の必要性は20世紀に入ってよりいっそう高まっている。例えば、大陸間弾道ミサイルやそれを迎撃するシステムではわずかな時間のずれが致命的である。経済の分野でも、インターネットを利用した株取引では0.1秒以下の差が利益と損失の大きな分かれ目となることもあるだろう。

時間の単位を天体の運行で精密に定義しようとすると様々な微小な効果の影響を受ける。実際、太陽が春分点を通過してから次に再び春分点を通過するまでの時間で定義される太陽年は、毎年約0.005秒ずつ短くなる。また、地球の自転は潮汐効果によってわずかな遅くなっている。こうした不都合を回避できるのが、20世紀の量子物理学の果実である原子時計である。

現在の国際単位系(SI)では、セシウム(^{133}Cs)原子の基底状態の2つの超微細準位(F=4,M=0およびF=3,M=0)の遷移に対応する放射の9192631770周期の継続時間を1秒と定義する。セシウムを使った原子時計の1秒の精度は 10^{-13} に達する。国際原子時(TAI)は世界時(UT1)の1958年1月1日0時0秒を起点として原子時計で測った時刻である。ここで言う世界時(UT1)とは地球の自転に基づいて決められる世界共通の時刻系であり、先に述べたグリニッジ標準時の現代版である。

我々の市民生活の基礎となるのは協定世界時(UTC)と呼ばれるもので、原子時に基づきながら、地球自転に基づく世界時との時刻差が一定範囲内に収まるように管理された人工時系である。簡単に言えば、太陽が最も高くなる正午がちょうど12時00分となるように閏秒を適宜挿入する。閏秒をいつ挿入するかは国際地球回転観測事業(International Earth Rotation Service, IERS)が決定し、協定世界時(UTC)は地球の自転で定義された世界時(UT1)との差が0.9秒以内になるように保たれている。

8. 一般相対性理論とカーナビ

現代の暦である世界時は地球の回転の精密な測定によって決定されるが、これには地球上の位置と時間に関する精度が求められる。カーナビで利用される GPS(Global Positioning System)は地球上の位置を決定する元来は軍用用のシステムである。米国が軍用に打ち上げた複数の軍事衛星からの信号を受信してその時間差から地球上の位置を特定するものである。

ところで GPS では相対性理論による補正が必要である。まず、GPS 衛星の速さによって衛星の時計は1日に約7マイクロ秒(7×10^{-6} 秒)遅れる。次に衛星に働く引力は地上よりも弱いことによる一般相対論的効果によって時計は1日に45マイクロ秒(45×10^{-6} 秒)進む。結局衛星の時計は相対性理論の効果によって1日に38マイクロ秒進むことになり、正確なGPSデータを得るためにはこの効果を計算に入れる必要がある。

アインシュタインが発表した一般相対性理論は、最先端の時空の科学としてブラックホールなどの宇宙スケールの現象の記述に使われるだけでなく、我々の暮らしにすっかりとけ込んだカーナビの実用化にも一役買っているのである。

9. 閏秒挿入に伴う不連続性とユリウス日

日常生活では、60秒が1分で、60分が1時間、24時間が1日で、365日(閏年は366日)が1年であるというのが当たり前で、過去にさかのぼっても日付は、滞ることなく、連続的につけられてきたものと思い込んでいる。しかし、時間(と空間)に関する知識が豊かになるに従って、以前の暦の誤差を修正する必要が生じ、それに伴って時刻の不連続性が生じる。

1582年のグレゴリオ暦への改暦では、曜日は正しく進むものの、10月4日の翌日が10月15日になり、5日から14日がなくなってしまった。

現代の協定世界時でも閏秒挿入に伴う不連続性がある。最近では協定世界時2005年12月31日23時59分59秒と2006年0時0分0秒の間に、2005年23時59分60秒が挿入され2005年が1秒だけ長くなった。これを含めて2006年2月現在閏秒挿入は23回行われ、今後も適宜閏秒挿入が行われていく。

少し脱線になるが、この閏秒の挿入のため国によって1秒長くなる年が違ってしまふ。上記の閏秒挿入は日本標準時では2006年1月1日8時59分59秒と9時0分0秒の間に8時59分60秒を挿入することになり、日本では2006年が1秒だけ長くなった。少し変で不便な気もするが、協定世界時に換算して処理すれば原理的には問題はない。日常生活の便利のために我々は自国(地域)の標準時を使う。そのために地球上では日付変更線をまたいで2つの日付が同時に使われていることを思えば仕方ないことである。もっとも、イギリスのニューイヤーパーティーで2006年へのカウントダウンが1秒分増えたのはちょっと面白かったかもしれない。

このように、時間の刻みの精度があがったのと引き換えに、日付や時刻につぎはぎができてしまった。これらのつぎはぎは、日常生活には影響しないが、宇宙の大きさや年齢を探るための何十年、何百年にもわたる天文学的な観測には非常に不便である。

グレゴリオ暦への改暦をまたいで日数計算をするためにスカリゲルが1583年に考案したの

が、ユリウス日である。ユリウス日は紀元前 4713 年 1 月 1 日正午（世界時）から数えた通日である。ジョン・ハーシェルが 1849 年に著書“*Outlines of Astronomy*”で日数や時間の計算にユリウス日を利用する方法を考案し、天文学で広く使われている。

10. 西暦 6000 年の星空

暦の歴史は数千年でしかないが千年単位で考えれば天体の運行もそれと分かるほどの変化が現れる。

星占いで使われる 12 の星座は黄道 12 星座と呼ばれ太陽の位置を示す目安となる。先に述べたように黄道とは天球上での太陽の通り道であり、黄道 12 星座は黄道上に分布する。春分の頃、太陽はうお座にあってそこから東に向かって、おひつじ座、おうし座、ふたご座と 1 ヶ月にほぼ 1 つずつ黄道上の星座を進んでいく。ところで、地球の歳差運動（コマの首振り運動と同様な自転軸の方向の変化）によって黄道上での春分点の位置が 1 年に約 $50''$ の割合で東に移動している。そのため、約 2000 年で春分点の移動は 30° すなわち星座が 1 月分ずれてしまうことになる。星占いと星座が 1 月ずれるのはこのためであり、西暦 4000 年頃にはさらに星座との対応がさらに 1 月分ずれることになる。

これは、天球上の恒星の位置が再び同じ位置に戻る時間として定めた 1 恒星年 = 365.25636 日と、太陽が春分点を出発して再び春分点に戻ってくる時間で定めた 1 太陽年 = 365.24219 日の違いから考えてもよい。それらの差は 1 年では 0.01417 日とわずかだが 2000 年後には約 1 月にもなる。

今から 2000 年ほど前にクレオパトラとシーザーが愛を語った同じ星空を見ることができるのは、現在では 1 月遅れ、西暦 6000 年頃には 3 ヶ月遅れつまりは 1 つ遅れた季節になる。同じ星の下に生まれても、6000 年経つと季節が全く違ってしまう。同じ誕生日であってもその人生がかなり違ったものになると考えるのは自然といえよう。

11. むすび

時間の物差しとしての暦への要求はその精度の向上とともに質的に変化してきた。

古代エジプトではナイル川の氾濫の季節を知るためにシリウスの位置の観測から恒星暦を作った。恒星暦と太陽暦の 1 年は当時の精度では等しいとしてよい。その後、エジプトでは 1 年が 365.25 日であることが知られるようになり、それを元に作られたのがユリウス暦である。ユリウス暦は、共通の時間の物差しをローマ帝国の領土全体に与えることとなり、統治の上でも重要であったと考えられる。

時空の科学として暦を考えるならば、精度の向上という量的変化が飛躍的な質的变化として我々の暮らしに影響してきたといえる。ユリウス暦は、人の一生のスケールでは十分な精度で季節の予測を可能にして、ヨーロッパの広い領域に共通の時間の物差しを与え、暮らしを律することとなった。暦の 1000 年スケールでの精度の向上をはかったのがグレゴリオ暦であるが、航海上の必要性和近代科学の誕生によって、地球全体で使うことのできる時空の科学として成熟することとなった。さらに、現代の時空の科学である相対性理論は、地球上の位置を人間の

大きさ程度のスケールで決定することを可能にし、カーナビの利用によって生活スタイルを変えるほどの影響を与えることとなった。

本稿では、暦を時空の科学という観点から、簡単のために太陽暦に限って話を進めてきた。しかし、イスラム暦は月の運行を基準にした太陰暦であるし、太陽と月の両方の運行に基づいた太陽太陰暦は中国の王朝や日本でもかつて広く使われていた。赤道付近の低緯度の海辺の地方では、高緯度地方ほど季節の変化は小さくなく、むしろ月の運行が反映する潮汐の変化の方が重要で太陰暦の方が実用的かもしれない。また、太陽太陰暦に関しても、太陽と月の2つの運行周期を上手に利用した方が、少なくとも原理的には、より高精度の暦を作りやすいという利点もあり興味深い。こうした太陽暦以外の暦に関しては、また別の機会に議論してみたい。

参考文献

岡田芳郎、「暦のからくり」、はまの出版、1999年

永田久、「暦と占いの科学」、新潮選書、1982年

岡田芳郎、世界の暦、「暦の百科事典 2000年版」、本の友社、1999年

広瀬秀雄、人間は暦とどのようにかかわってきたか、「暦の百科事典 2000年版」、本の友社、1999年

暦の会、暦法 5000年史年表、「暦の百科事典 2000年版」、本の友社、1999年

P.ヤム、「太陽電池から GPS まで 身の回りのアインシュタイン」日経サイエンス 12月号、2004年

文部科学省国立天文台編、「理科年表平成 16年（机上版）」、丸善、2003年

フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/>

海上保安庁海陽情報部、天文・測地情報 & 水路観測所のページ、

<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/astro.htm>

追記

本稿を脱稿した後、Google Earth (<http://earth.google.com/>) という無料地図サービスを試してみた。これは世界的なインターネット検索サイト Google が提供するサービスである。起動時には、人工衛星から見たアメリカ大陸の写真が表示されるが、地図上の移動と拡大を繰り返してやると、例えば愛知淑徳大学の長久手キャンパスの衛星写真を表示することができる。Google の「マップ」検索(<http://www.google.co.jp/>)でも同様の衛星写真や地図を表示することができる。こうした地図サービスと GPS を組み合わせた新しいナビゲーションシステムを日常生活で普通に使う日もそれほど遠くないようである。

