

2 現示精度に基づいた標準時系の階層

2 *Hierarchy of Standard Time Scales Based on Uncertainty of its Realization*

蜂須英和 井戸哲也 細川瑞彦

Hidekazu HACHISU, Tetsuya IDO, and Mizuhiko HOSOKAWA

過去から未来へと時々刻々と進む時間も、空間と同じように座標を使って体系的に記述した方が分かりやすい。一次元の時間と三次元の空間を合わせた四次元時空間の座標は、それぞれのつじつまが合うように構築されている。時間の座標は、日本語では同じ“時系”(あるいは“時刻系”)と表されるが、本来は概念的な“time system”とそれを現示した“time scale”に区別される。本稿では、主要な5つのtime systemがどのような関係にあるのかを概説し、国際的な標準時系である国際原子時や協定世界時、情報通信研究機構(NICT)が発生している日本標準時など我々の身近な標準時系はどのtime systemに基づくtime scaleなのか、また、現示精度に基づいたそれら標準時系の階層について紹介する。

Time, ticking from past to future, is systematically best described using coordinates, just as space is. The coordinate for a four-dimensional space-time, which consists of one dimension of time and three dimensions of space, relates both of them. Conceptually, we separate “time systems” and “time scales,” distinguishing between the concept and its realization. Here, we introduce the relations between the main five time systems, and we present which time system leads standard time scales such as International Atomic Time, Universal Coordinated Time, and Japan Standard Time as generated by National Institute of Information and Communications Technology (NICT). We then show how these standard time scales relate in a hierarchy of the uncertainty that each time scale realizes.

1 まえがき

人類はこれまでに天文現象や身近な周期現象などを基にした暦や時刻を発明してきた。暦や時刻は、古代エジプトでの農業や大航海時代の経度測量など、当時の基幹産業を支える重要な技術であり[1][2]、ここまで文明が発達した要因の一つに、時を測る技術の進歩が挙げられることは間違いないだろう。現代社会では、世界中の皆と共有できる時刻が無い生活は考えられない。そして、現在最も高精度な時を刻む原子時計が衛星測位システムに欠かせない重要な役割を果たしているなど、正確な時刻や時間は、現在もなお日常生活と最先端科学の両面において不可欠な存在となっている。

20世紀の初めにアインシュタインが特殊相対性理論と一般相対性理論を発表した後、時間と空間に対する考え方が大きく変化した[3]。この理論の下、過去から未来への時々刻々と進む時間は三次元の空間と共に四次元時空座標系の一部と考えられるようになった。

空間に座標があると便利のように、時間にも座標があった方が便利である。これを時系あるいは時刻系と呼んでいる。ここでは四次元時空間を記述する基準座標系を考える。この基準座標系は、“reference system”と“reference frame”に区別される。前者は座標系を規定する概念的な定義であり、後者はそれを現示*した座標系自身のことである。そして、四次元時空座標系の時間部分である時系もまた、一般的な基準座標系のように概念的な定義である“time system”とそれを現示した“time scale”に分けられる。

座標系の設定は基本的には人為的なものであるため、自然の法則と扱いやすさ、理解しやすさによって、便利な座標とそうでない座標に分けられる[4]。誰もが扱いやすい基準となる座標系が好まれるのは自然のことだろう。先人たちの努力により、これまでにいくつ

* 現示：計量標準分野では、実現や具現化のことを“現示”と表現する。

もの時系が提案されてきた。空間座標で考えるとイメージしやすいように、座標のどこでも基盤の目のように同じ空間間隔の方が単純で扱いやすいだろう。時間座標で言えば、どこでも時間間隔が同じであるような座標は扱いやすい。しかし、相対性理論まで考慮すると、ある時計の刻む時間は、その運動や場所に依存することになる。一般相対性理論によれば、重力の影響の違いによって時間の進み方は異なる。また、この重力の効果を太陽系の重心を基準に考えるのか、地球の中心を基準に考えるのかでも変わってくる。そのため、万能な座標は無く、現状では目的に応じて使い分けている。

本稿では現在使われている主な5つの time system の関係を示し、我々の身近な標準時系はどの time system に基づく time scale なのか、また、それら標準時系の現示精度に基づく階層について紹介する。本特集で議論されている標準時系の位置付けを把握することで、本特集の理解の一助となれば幸いである。

2 基準座標系構築において考えるべきこと

本稿では四次元時空座標系を「座標系」(あるいは「基準座標系」)で表し、時間と空間の限られた座標系については、それぞれ「時系」と「空間座標系」で表すとする。文献[5]によれば、基準座標系の構築手順は以下の5段階に分けられる。

1. 概念設定
2. 物理構造の選択
3. 構造のモデル化
4. 現示
5. 拡張

上記1.から3.は構築したい基準座標系が従う概念的な時空の理論モデルを決めるパート、4.と5.はそのモデル上でいかに基準座標系を現示しそれを拡張するかを決めるパートというように、大きくは2段階に分けられる。

基準座標系の時間部分である時系においても、基本的にはこの構築手続きにならったものになる。time system の現示方法には積算時(integrated time scale)と力学時(dynamical time scale)がある。積算時は周期が一定であると思われる周期現象(地球の自転、水晶の振動、原子の遷移周波数など)の繰り返しを数えることで時間を決めるというもので、現在国際的な標準時として使われている国際原子時 TAI (International Atomic Time)^{*1}や協定世界時 UTC (Coordinated Universal Time)^{*2}等の原子時は原子の遷移周波数を数えていく積算時の例である。これに対し、力学時は、比較的単純な力学系に対して運動方

式の解と現象が一致するように時間を決めるというもので、例えば地球と月、惑星の運動を計算する暦表時 ET (Ephemeris Time)^{*2}がこれに当たる。

時間は更に固有時(proper time)と座標時(coordinated time)に分類される。相対性理論によれば、正確な時計が刻む時間は、1つの座標を決めると運動の速度が速くなればなるほど、また、置かれている場所の重力ポテンシャルの絶対値が大きくなればなるほど、その進み方は遅くなるため、時計の刻む時間は時計の運動や場所に依存する。例えば、原子時計などそれ自身正確な時を刻む時計を仮定した場合、物体の固有時とは、ある物体がこの正確な時計と一緒に運動した場合にその時計が刻む時間である。一方、座標時は、空間座標系のどこか1点(通常は座標原点)に正確な時計を静止させて基準とし、それを座標全体にわたって定義する時間である。つまり、四次元時空間全体にわたってつじつまが合うように時系を定義するには、時計の位置や運動状況を考慮することが必要不可欠になる。

*1 国際原子時 TAI

原点を 1958 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒の UT2^{*4} に近似的に一致するように定めた、セシウムのマイクロ波遷移で定義された歩度を積算した原子時系である[1]。1958 年は国際時報局 BIH (Bureau International de l'Heure) が原子時計により国際的な標準時を決定し始めた年である[18]。TAI は 1971 年の第 14 回国際度量衡総会 CGPM で、下記のように定義された。「TAI とは国際単位系の単位である秒の定義に合うように運転された各研究機関の原子時計の示す時刻に基づいて、BIH によって確立された時刻指標の座標である[1]。」つまり、TAI は世界の複数の研究機関の原子時計群の合成により、SI 秒を実現するべく BIH によって確立される時系ということ。さらに、相対論を考慮して、1980 年に TAI は「TAI は、回転するジオイド上で実現される SI 秒を目盛りの単位とした、地心座標系で定義される座標時の目盛りである。」と修正された[6]。

*2 協定世界時 UTC

国際電波通信連合無線通信セクター ITU-R (International Telecommunication Union - Radio communication Sector) 勧告 ITU-R TF460 において、UTC は下記のように定義されている。「UTC は BIPM が IERS の協力により維持する時系であり、標準周波数及び時間信号の供給の基礎をなすものである。UTC の歩度は厳密に TAI と一致しているが、整数秒だけ異なっている。UTC は UT1^{*4} と近似的に一致させるために 1 秒だけ挿入、あるいは削除(正あるいは負のうるう秒)する調整を行う[19]。」この勧告を受け 1972 年に現在の UTC がスタートした。うるう秒調整は、UTC と UT1 の時刻差が 0.9 秒以内に収まるように修正されており、1972 年に導入されて以来これまで加算のみの調整である。このように、連続時系である TAI に対し、UTC は時折うるう秒が挿入、あるいは削除される不連続な時系である。

*3 暦表時 ET

ある時刻の天体の相対位置を運動方程式から求め、ある時刻の天体の位置を示した天体暦を作る。その一方で、天体位置を観測し、その位置関係を調べて、暦の時刻を補間することで時系を構築する[20]。このような天体暦の時間引数が暦表時。1956 年に CGPM で ET による秒(ET 秒)の定義が「1900 年 1 月 0 日 12 時 ET における瞬間の 1 太陽年の 1/31 556 925.9747」と定義された。1967 年に ¹³³Cs 原子によって秒が再定義された際には、新しい秒は ET 秒と一致するように定められた。

先の基準座標系の構築手順を時系構築の観点から、もう少し細かく見てみよう。

1. 概念設定

考慮する物理法則として、ニュートンの絶対時間で十分か、相対性理論まで取り込む必要があるか、あるいは更に拡張した理論が必要か、構築したい座標系の概念を定める。

2. 物理構造の選択

地表面とその周囲、地球の自転、プレート運動、太陽系、銀河の回転、原子の量子遷移など、どの物理構造を選択するのか、必要とされる精度で矛盾が起こらないように座標系を設定する。例えば、世界時 UT (Universal Time)^{*4} や TAI は、それぞれの物理構造に地球の自転やセシウム 133 (¹³³Cs) の超微細構造遷移を選んだ例である。

3. 構造のモデル化

概念的な座標系に恣意性を持たせることになるが、概念的な物理構造を実際に扱えるようにするために、概念を様式化、あるいは規定した慣習的な reference system を検討し、目的とする精度に必要なパラメータを決定する。例えば、地球時 TT (Terrestrial Time) の秒の長さ (歩度) を回転するジオイド上の SI 秒 (国際単位系の秒の歩度) に一致するように定義することは、国際天文学連合 IAU (International Astronomical Union)^{*5} の決議案 A4 (IAU1991 Resolution A4) [6] に記述されている。

4. 現示

上記 1～3 で考慮した time system を現示する。ET の例では、太陽や月、衛星といった天体の運行位置や軌道とその変化の観測を実際に行い、基準点の早見表である天体暦が概念的な系を現示している。あるいは、標準時系の時刻や時刻差の公表が現示にあたる。標準時系の TAI や UTC、BIPM 地球時 (TT (BIPMxx)) は、定義の TT に基づく time scale である。

5. 拡張

より多くの基準点での実現を考慮する。時系の場合、系全体 (遠隔地) への供給がこれに相当し、日本標準時 JST (Japan Standard Time) の配布はこの例である。

3 5 つの time system の関係

1970 年代に相対性理論を取り入れた天体暦が普及し始め、速度や重力場の時系への影響を考える必要が生じた。ここでは、太陽系重心座標時 TCB (Barycentric Coordinate Time) と地心座標時 TCG (Geocentric Coordinate Time)、太陽系力学時 TDB (Barycentric Dynamical Time)、地球力学時 TDT (Terrestrial Dynamical Time)、TT の 5 つの time system を紹介

する。

TCB は太陽系の重心に空間座標の原点を持つ太陽系重心座標系 BRS (solar system Barycentric Reference System) の時間部分で、太陽系天体の運動など太陽系内における運動を記述する力学時である。太陽系重心に静止している正確な時計の固有時から、太陽を含む太陽系天体の重力場の影響を除いた時系と定義される。おおまかに言えば、TCB は太陽系の重力場が無視できるくらい太陽系から十分離れたところに静止している正確な時計の固有時であると言ってよい [3]。

TCG は空間座標原点として地球の重心を採用する地心座標系 GRS (Geocentric Reference System) の時間部分で、地上の実験室や地球の周りを回る人工衛星の運動など地球近傍の運動を記述する力学時である。TCG は地球の中心に静止している正確な時計の固有時から地球自身の重力場の影響を除いた時系として定義される。相対論的効果により、TCG は TCB に比べて、太陽系重心に対する地球の速度の分だけ遅れ、さらに地球における太陽や他の太陽系天体の重力場の分だけ遅れる。地球は太陽の周りをほぼ楕円運動しているため、太陽系の重心に対する地球の速度は一定ではない。また、地球と他の太陽系天体との距離の変化に応じて、地球が感じる重力場の強さも時間と共に周期的に変化する。この遅れは時間に比例する成分と周期的な成分に分けられる。この内の周期的な成分の振幅は 1.6 ms 程度であるが、時間に比例する成分の大きさが 1 日あたり 1.3 ms 程度であるため、このままで

*4 世界時 UT

1884 年に米国ワシントンで開催された世界の標準時を協議する国際子午線会議で国際的な標準時に採用された天文時 (正午から 1 日が始まる時系) であるグリニッジ平均時 GMT (Greenwich Mean Time) を、常用時 (正子 (夜中の 12 時) から 1 日が始まる時系) に統一する際に使われるようになった [1]。GMT はグリニッジ天文台 (本初子午線) での平均太陽時である。太陽時は太陽の子午線通過から次の子午線通過までを 1 日とする時系である。地球の公転軌道が楕円軌道であること、また公転軌道と自転軸が傾いていることに由来する太陽時の周期揺らぎを平均化した時系を平均太陽時という。精度を上げるため、実際には恒星の子午線通過から次の子午線通過までを 1 日とする恒星時を基に平均太陽時を求めている [21]。暦表時 ET 以前は秒の具体的な定義は明示されていないが、当時の秒の定義は平均太陽日の 1/86 400 ということになる。UT には、平均恒星時から直接求めた地球の北極方向を基準にした世界時である UT0、UT0 に地球の自転軸の歳差・章動による変化などの極運動を補正し瞬間軸方向を極とした UT1 や自転速度変動の修正を加えた UT2 がある [18]。のちに、UT2 の計算に使われた経験式が正しくないことが分かったため、世界時として現在ではもっぱら UT1 が用いられている [3]。

*5 国際天文学連合 IAU

1919 年に創設された世界中の天文学者で構成されている国際機関 [22]。国際協力を通じてあらゆる側面から天文学の発展を図ることを目的としている非政府の国際組織。研究分野ごとに設置された 9 つの部会と、その下にある 35 のテーマ別委員会及び 50 あまりの作業部会からなる [23]。

2 現示精度に基づいた標準時系の階層

は TCB と TCG の差が増大することになる [3]。

TT は TAI の理想化として考えられているジオイド上に静止している正確な時計の固有時を理想化した座標時と定義される。したがって、TT は TCG に比べてジオイドの重力ポテンシャル分だけ遅れることになる。この遅れは、時間に比例する成分だけからなり、平均周波数差は同じである。その関係は、次式のように表せる [7]。

$$\frac{d(TT)}{d(TCG)} = 1 - L_G$$

ここで、 $L_G = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}$ 。 L_G は定義値で、ジオイドのポテンシャルを光速の 2 乗で割ったものである。この時間の遅れは 1 日当たり約 $60\,\mu\text{s}$ になる [3]。また、TT は ET との連続性を保つため、TAI に対して 32.184 秒の時刻差を持つことになった。

$$TT = TAI + 32.184\,[\text{s}]$$

1970 年代には上記のように歩度が異なる別々の時系が存在していた。そこで、平均的な歩度が TT と等しくなるように、TCB と TCG から時間に比例する成分を取り除く調整をした時系が 1970 年代後半に提案された。TCB から求められる時系が TDB、TCG から求められる時系が TDT である [3]。TDB と TCB の関係は下記のように定義される [7]。

$$\frac{d(TDB)}{d(TCB)} = 1 - L_B$$

ここで、 $L_B = 1.550\,519\,768 \times 10^{-8}$ は定義値である。また、TCG と TT の違いは時間に比例する成分だけなので、TDT と TT は事実上同じと考えてよい [3]。つまり、

$$TDT = TT$$

歴史的には、TDB と TDT の概念の方が TCB や TCG よりも先に導入されている。TDB と TDT は、1980 年代半ばに行われた天体暦の改定に伴って、それまでの ET に代わる時系として導入された [3]。地心における TDB と TDT との差は、先述したように 1.6 ms の周期項のみからなり、長期間の平均を取ればゼロにならされる。これらの関係は、国際地球回転・基準系事業 IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) ^{*6} が発行する IERS Technical Note No.36[7] に図 1 のようにまとめられている。現在では、高精度な原子時計に基づく原子時が TT を高精度に現示できるようになった。そのため、TT 以外の time system は、TT に関係付けられるようになっている。

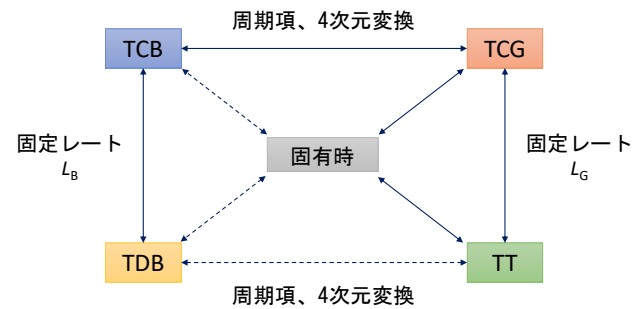


図 1 現在使われている主な time system の関係

TDT は省略しているが、TDT = TT の関係にある。実線の矢印は、IERS Technical Note No.36[7] にその関係が記述されている。点線の矢印はこの Technical Note には明確な記述は無い。TCB, TCG, TDB, TT は座標時であり、唯一の固有時に関係付けられる。

4 様々な標準時系とそれらの現示精度に基づく階層

地球上の活動に関しては、観測者の位置など地球上の位置・運動を記述するための基準座標系である地球空間座標系 TRS (Terrestrial Reference System) を用いるのが便利で、この時間部分である TT が標準時系に用いられている。現在では、time system である TT から導かれる様々な標準時系が存在する。これらの標準時系同士はそれぞれの現示精度に従い階層をなしている。

まずは標準時系の生成方法を通してそれらの関係を説明する。図 2 のように、国際度量衡局 BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ^{*7} は世界中の国立標準機関などから集めた原子時計データを加重平均して自由原子時 EAL (Échelle Atomique Libre) を計算する。EAL の生成には NICT の原子時計群を含めて現在では世界中の 400 台以上もの原子時計が参加している。EAL は究極の周波数長期安定度を求める時系である。BIPM は、世界中の一次及び二次周波数標準による EAL の歩度評価を集め、ジオイド上で定義の SI 秒を積算した時系になるように周波数校正をして TAI を決定している。装置としての原子時計において機差は避けがたく、その出力周波数は完全に

^{*6} 国際地球回転・基準系事業 IERS

IAU と国際測地学・地球物理学連合 IUGG[24] によって 1987 年に設立され、地球回転に関連する観測データを提供する国際機関 [25] で、世界時の決定がひとつの業務となっている。

^{*7} 国際度量衡局 BIPM

1875 年に締結されたメートル条約に署名した国々が創設した恒久的な学術機関。国際度量衡委員会 CIPM の監督の下に計量標準に関する事業を行い、物理的な諸測定の世界統一を確保することを使命としている [26]。パリ郊外のセーブルにあり、時間・周波数分野については、UTC を計算・決定し、その結果等を Circular T と呼ぶ報告書で毎月発表するなど大きな役割を担っている。

は一致しない。そのためできるだけ多数の原子時計の加重平均をとることで、より安定で正確な標準時系を実現している。地球の自転周期と帳尻の合った時刻の方が天体観測による航海等において歴史的に便利であったため、現在においても世界時 UT1^{*4} とのずれが± 0.9 秒以内を保つよう、1 秒ステップで調整して、UTC を生成している。

TAI あるいは UTC は、BIPM が算出するバーチャルな時系であり実信号は存在しないため、そのまま実

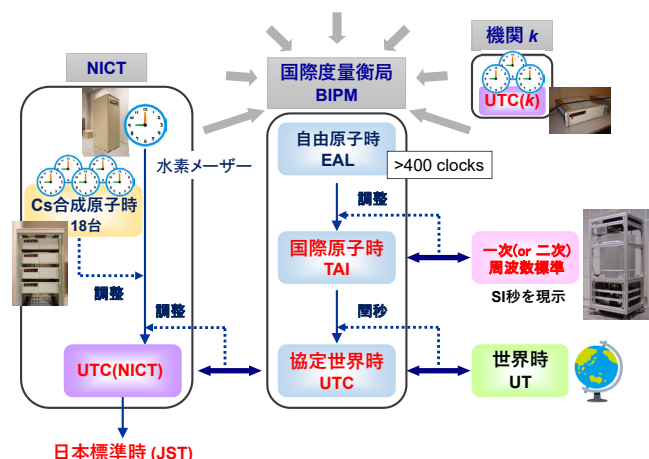


図2 標準時系の生成方法

生活で利用するのは不便である。そこで、各機関は自局の原子時計を利用するなどして、UTC を実信号としてローカルに現示した標準時 UTC(k) (“k” は機関名の略称) を生成している。生成方法に国際的な決まりはないが、秒の定義諮問委員会 CCDS (Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde) 勧告 (CCDS1993) によれば、UTC と 100 ns 以内で同期することが望ましいとされている [6]。UTC (NICT) に基づく JST については本特集 [8] を参照いただきたい。各機関は UTC(k) と自局の各原子時計の 5 日ごとの時刻差データ及び GPS time と各 UTC(k) の時刻差データ等の時刻・周波数リンクの情報を BIPM に提供している。これらのデータにより、GPS などを経由して各 UTC(k) 間の時刻比較が可能になり、さらに各 UTC(k) 間の時刻比較を経由して世界中の全ての原子時計間の時刻比較も可能となる。BIPM はこの原子時計の比較データを基に EAL 及び UTC を計算し、月報 Circular T 内で前月の 5 日おきの UTC - UTC(k) をまとめて報告する (Circular T からの抜粋例 [9] を図 3 に示す)。UTC は非常に安定である [10] ため、最近では一次及び二次周波数標準を基にした TAI 秒 (TAI の歩度) の調整は頻繁に行われていない。2012 年の 9 月以前はほぼ毎月の調整があったが、それ以降は 2016 年 11 月から 2017 年 4 月の半年間を除き調整は無かった。た

CIRCULAR T 372
2019 JANUARY 10, 10h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 tai@bipm.org

The contents of the sections of BIPM Circular T are fully described in the document "Explanatory supplement to BIPM Circular T" available at ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/notes/explanatory_supplement_v0.2.pdf

1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k) and corresponding uncertainties.
From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.

Date 2018	0h UTC	NOV 27	DEC 2	DEC 7	DEC 12	DEC 17	DEC 22	DEC 27	Uncertainty/ns Notes		
MJD		58449	58454	58459	58464	58469	58474	58479	uA	uB	u
Laboratory k					[UTC-UTC(k)]/ns						
AOS (Borowiec)		-5.4	-5.2	-4.6	-3.5	-2.8	-2.5	-2.5	0.4	4.2	4.2
APL (Laurel)		3.6	1.5	4.2	4.1	2.8	2.8	3.4	0.4	11.3	11.3
AUS (Sydney)		-54.9	-48.5	-44.4	-41.6	-37.9	-47.4	-27.7	0.4	6.5	6.5
BEV (Wien)		1.5	-9.0	-14.9	-18.7	-29.0	-23.7	-22.7	0.4	3.2	3.2
BIM (Sofiya)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BIRM (Beijing)		5.8	5.0	-	4.7	3.1	1.6	1.7	0.5	3.2	3.2
BOM (Skopje)		-1150.4	-1178.5	-1207.7	-1227.1	-1255.1	-1289.7	-1311.8	1.5	8.3	8.4
BY (Minsk)		-0.1	-0.5	-0.3	-0.5	-0.3	0.0	-0.1	1.5	12.2	12.3
CAO (Cagliari)		-8150.1	-8255.9	-8358.7	-8455.8	-8566.0	-8672.1	-8771.8	1.5	20.0	20.1
CH (Bern-Wabern)		-3.0	-3.1	-2.8	-2.2	-2.8	-3.2	-3.8	0.5	2.2	2.3
⋮											
MASM (Bayanzurkh)		-81.6	-102.0	-119.7	-146.8	-159.2	-182.7	-196.8	0.7	20.0	20.0
MBM (Podgorica)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MIKE (Espoo)		6.1	6.3	7.0	7.7	6.2	4.2	2.1	0.4	4.6	4.6
MKEH (Budapest)		-3888.4	-4100.4	-4327.5	-4544.7	-4757.4	-4982.8	-5216.8	1.5	20.0	20.1
MSL (Lower Hutt)		437.6	439.1	410.2	393.0	369.7	349.1	333.6	1.5	20.0	20.1
MTC (Makkah)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NAO (Mizusawa)		-304.4	-311.2	-319.0	-320.1	-325.8	-336.4	-343.0	2.0	20.0	20.1
NICT (Tokyo)		11.1	13.7	15.8	15.4	14.9	14.5	12.2	0.4	1.8	1.8
NIM (Beijing)		2.0	1.1	1.1	0.9	0.7	0.4	0.2	0.4	1.8	1.8
NIMB (Bucharest)		4045.4	4098.6	4149.8	4196.4	4246.9	4296.5	4343.6	0.5	7.5	7.5

図3 BIPM の 2019 年 1 月の月報 Circular T 372 からの抜粋 [9]

2019 年 11 月末から 12 月末までの 30 日間の UTC と UTC(k) の時刻差 (単位は ns) が報告されている。ここでは割愛しているが、Circular T には、一次及び二次周波数標準による評価に基づいたこの 30 日間の TAI 秒の校正値も報告される。

だ 2019 年以降は 2、4、6 月と 2 か月ごとに調整がなされている。

TAI 校正の結果は翌月に評価されるが、仮に先月の TAI 秒が SI 秒からずれていたとしても TAI の過去値を遡って修正はしない。また TAI の周波数安定度を維持するために急激な補正も行わない。そのため TAI の歩度のずれは後追いで徐々に打ち消していくことになる。それに対し BIPM は、より SI 秒に即した時系として BIPM 地球時 TT (BIPM_{xx}) も報告している (“xx” は計算に使用した全データの最終年の下 2 桁。2016 年までのデータによる BIPM 地球時は TT (BIPM16))。これは、毎年 1 月頃に前年までの一次及び二次周波数標準による TAI 秒の校正履歴を基に TAI を修正した時系である。BIPM によれば、「TT (BIPM) is a realization of Terrestrial Time as defined by the International Astronomical Union」[11] と記述されており、この標準時系は、後処理の時系ではあるが、我々の持ち得る最大限の素材と解析方法を使って妥協無く計算し、その時点で我々が知り得る最も SI 秒に則した間隔で時を刻む理想的な時系ということになる。そのため、近年急速に発展した光周波数標準の SI 秒に基づく周波数 (絶対周波数) 測定 (NICT の Sr 光格子時計 NICT-Sr1 の絶対周波数測定については文献 [12]) や、自転周期の驚異的な長期安定性で注目されるミリ秒パルサーの周期計測 [13]、生成した高精度な時系 (NICT-Sr1 に基づく高精度時系生成については文献 [14][15]) を評価する際など、精度が要求される学術目的に主に利用されている。

標準時系は、現示精度の観点から以下の階層をなしている。

A. BIPM 地球時 TT (BIPM_{xx})

一次及び二次周波数標準による TAI 秒の校正データをフルに活用して、BIPM が 1 年に 1 度算出する正確な標準時系。2012 年からは不確かさは 2×10^{-16} 程度 [16]。主に学術目的に利用される。

B. 国際原子時 TAI、協定世界時 UTC

世界中から集結した原子時計データを用いて BIPM が毎月計算する国際的な標準時系。2013 年以降の不確かさは 2×10^{-15} 以下 [16]。UTC は各国の標準時の基準として利用される。

C. 機関 k が生成する標準時系 UTC (k)

各機関独自の方法で生成する UTC を現示した実信号の標準時系。常時配信され、産業と社会の基盤となっている。UTC (NICT) の場合は、不確かさは 4×10^{-15} 程度 [9]。

この次に位置するのが、各企業、団体、個人の時計の時系であり、その不確かさは様々である。

5 あとがき

四次元基準座標系は、概念的な定義である “reference system” とそれを現示する “reference frame” に分類される。特に、基準座標系の時間部分である時系は、概念的な “time system” とそれを現示した “time scale” に区別される。本稿では、四次元時空座標系を概説し、現在利用されている time system である TCB, TGC, TDB, TDT, TT の関係を紹介した。そして現在の標準時系 TT を基にした time scale である TT (BIPM_{xx}), TAI 及び UTC, UTC (k) の現示精度に基づく階層を示した。

近年の光周波数標準の進展は目覚ましく、既に現在の SI 秒を現示するセシウム原子時計の性能を凌駕することが明らかになってきた。これを受け国際度量衡委員会 CIPM (Comité International des Poids et Mesures) 傘下の時間・周波数諮問委員会 CCTF (Comité Consultatif du Temps et des Fréquences) *8 では、セシウムのマイクロ波遷移から、光周波数標準を実現するいずれかの原子の光学遷移に基づく秒での再定義を検討している [17]。2018 年秋に開催された第 26 回国際度量衡総会 CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) *9 において、SI 基本単位のうち、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの 4 つの単位が再定義され、翌 2019 年 5 月 20 日に発効したことは記憶に新しい [11]。秒は他の SI 基本単位に比べて圧倒的に高い精度で定義を現示しているうえ、SI 基本単位のほとんどは時間・周波数に関係付けられていることから、時間・周波数標準は科学技術の根幹を成していると言える。そして今、この定義が更に高精度に現示できる定義へと変わろうとしている。この新しい定義に基づいた国際標準時系の現示方法や維持については、今後具体的に検討されることになるだろう。

*8 国際度量衡委員会 CIPM 傘下の時間・周波数諮問委員会 CCTF

CIPM はメートル条約に基づく活動を行うための実行団体。CGPM*9 で選出された最大 18 名の委員から構成され、毎年の会合を持つ。測定単位の世界的統一を確保することが主な使命 [26]。CIPM は物理量の種類に応じて 10 個の諮問委員会から成る。時間・周波数諮問委員会 CCTF はそのうちのひとつで、前身が秒の定義のための諮問委員会 CCDS。諮問委員会には、担当する分野で国際的に行われる業務を調整し、CIPM に単位に関する勧告を提案する責任がある [26]。

*9 国際度量衡総会 CGPM

メートル条約全加盟国の政府代表から成り、4 年ごとに会合を持つ [26]。早くて 2026 年の CGPM での決議が想定されている秒の再定義については、まず、CCTF で十分な技術的検討がなされたうえで、CIPM に助言を行い、さらに CIPM が勧告を出したうえで、CGPM で決議される。

【参考文献】

- 1 青木信仰, “時と暦,” 東京大学出版会, Sept. 20, 1982.
- 2 森川容雄, “時間・周波数の定義と国際原子時 / 協定世界時,” 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.3-7, 2003.
- 3 福島登志夫, “基準座標系,” 現代測地学 3章, 日本測地学会, pp.105-155, Oct. 1994.
- 4 細川瑞彦, “四次元時空と基準座標系,” 通信総合研究所季報, vol.45, nos.1/2, pp.3-18, 1999.
- 5 J. Kovalevsky, I. I. Muleller, and B. Kolaczek, “Reference Frames in Astronomy and Geophysics,” Kluwer academic publishers, 1989.
- 6 C. Thomas, P. Wolf, and P. Travella, “Time scales,” BIPM Monographie 94/1. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/monographies-misc/Monographie1994-1.pdf>
- 7 G. Petit and B. Luzum, “IERS Conventions (2010),” IERS Technical Note no.36, 2010. <https://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.html>
- 8 松原健祐, 中川史丸, 伊東宏之, 蜂須英和, N. Nemitz, 藤枝美穂, 後藤忠広, 成田秀樹, 水野道明, 有村智, 齊藤春夫, 今村國康, 花土ゆう子, 井戸哲也, “日本標準時の維持と運用,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, nos.2, 3-1, 2019.
- 9 <https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html>
- 10 G. Panfio, A. Harmegnies, and L. Tisserand, “A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time,” Metrologia 49, 49-56, 2011. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1/008>
- 11 BIPM, “The International System of Units (SI),” Ninth Edition, 2019. <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- 12 蜂須英和, N. Nemitz, 李瑛, 石島博, 井戸哲也, “NICT におけるストロニチウム光格子の開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, nos.2, 4-3, 2019.
- 13 B. Guinot, “Atomic time scales for pulsar studies and other demanding applications,” Astron. Astrophys, vol.192, pp.370-373, Aug. 1987.
- 14 H. Hachisu, F. Nakagawa, Y. Hanado, and T. Ido, “Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock,” Sci. Rep., vol.8, pp.4243, March 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22423-5>
- 15 NICT プレスリリース, “光格子時計を利用した高精度な時刻標準の生成に成功,” March 2018. <http://www.nict.go.jp/press/2018/03/15-1.html>
- 16 G. Petit and G. Panfio, “Frequency standards in TAI and realization of TT(BIPM),” 21st CCTF Meeting. https://www.bipm.org/cc/CCTF/Allowed/21/CCTF_17-36_FS-TT.pdf
- 17 F. Riehle, P. Gill, F. Arias, and L. Robertsson, “The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures,” Metrologia 55, 188, 2018. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa302>
- 18 吉村和幸, 古賀保喜, 大浦宣徳, “周波数と時間,” 電子情報通信学会, Oct. 1, 1989.
- 19 Recommendation TF.460-6, “Satellite Communications,” Second Edition, New York, Van Nostrand Reinhold, 1991. <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460/en>
- 20 細川瑞彦, “秒の定義のこれまでとこれから - 単位の定義変遷から見えるもの -, ” 大学の物理教育, 14巻, 3号, pp.125-129, Nov. 2008.
- 21 花土ゆう子, “原子時系発生システムの高度化に関する研究,” 博士論文, 2008. <https://www.iau.org/>
- 22 <http://astro-dic.jp/>
- 23 天文学辞典 (日本天文学会), <http://www.iugg.org/>
- 24 https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html
- 25 産業技術総合研究所計量標準総合センター, “国際文書第 8 版 (2006) / 日本語版 国際単位系 (SI),” 日本規格協会, Dec. 19, 2007.



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
時空標準研究室
室長
博士 (工学)
光周波数標準、光周波数計測



細川瑞彦 (ほそかわ みずひこ)

情報通信研究機構
理事
理学博士
時空計測、時刻・周波数標準



蜂須英和 (はちす ひでかず)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士 (工学)
光周波数標準、光格子時計とその応用