

フレッシュマンに贈る言葉

—科学的思考は計測にはじまる—

小野 敏 郎*

*岡山理科大学 工学部 知能機械工学科 岡山県岡山市理大町 1-1
*Department of Intelligent Mechanical Engineering, Okayama University
of Science, 1-1 Ridai-cho, Okayama, Japan
*E-mail: ono@are.ous.ac.jp

キーワード：陽光 (ひ) の計測 (day-time measurement; measurement of hours)、テシビオスの水時計 (Ktesibios' water clock)、漏刻 (Rou-koku).
IL00340694504-0272 ©2024 SK'LE

1. はじめに

制御理論でおなじみの微分方程式の例をあげるまでもなく、時間の概念を抜きにしては科学的 (数理的) 思考の展開は考えられない。計測用語集¹⁾には、計測とは「特定の目的をもって、事物を量的に捉えるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用いて初期の目的を達成させることである」と記されている。記述が高度に抽象化されているために、具体的イメージが湧きにくいのではないかとと思われる。そこで、時間の計測についての起源を探りながら、計測という行為に内在する基本概念のもつ意味を考えてみることにしたい。

2. 陽光 (ひ) の長さを計る

人類が集落を作り共同生活を始めた頃には、狩猟にしろ、農耕にしろ、陽光 (ひ) のある間に共同作業をする必要があった。したがって、その日の陽光の長さをあらかじめ知り、それを有効に使用するには、人類は知恵を働かせ、工夫をしてなんらかのデバイスを生み出す必要に迫られた。日差しと指針の影を利用した日時計の誕生にはそのような社会的ニーズがあったものと思われる。しかし、日時計は日差しのあるときにしか用をなさなかった。そこで、水時計が考案されることになったものと思われる。

水時計の根本原理は、おそらく最初は河川や谷川などの水の流れを具に (つぶさに) 観察し、その知見からヒントを得たものと思われる。そのうちに、先人たちは溜め池の水を笕 (かけひ) で導いて低い場所へ運ぶとき、取り入れ点と取り出し点との間の高低差 (落差) が取り出し点で流れ出る水の速さに関係することに気付いた。水時計の発明は、この知見をヒントにしてなされたものと考えられる (水槽の水位と水槽下部に設けられた小径孔から流出する水の流量変化との間には重力ポテンシャルが関係する)。

巧妙に考案されたさまざまな水時計の誕生によって、人類は昼夜に係わりなく時間を計ることができるようになり、その結果、合理的な思考方法や科学的な思考方法の基盤を築くことができるようになった。すなわち、日時計や水時計の発明によって、共同作業や共同生活の場で、個々の作

業の順序関係を整え、全体作業の段取りを合理的に進めるというアイデアが生まれるようになった。これが、今日では「スケジューリング」と呼ばれる 1 つの科学的思考方法の起源ではないかと筆者は考えているが、このように、科学的思考における「時間」の概念はきわめて重要であることがわかる。

3. Ktesibios の水時計

図 1 は、西暦前 300 年頃にギリシャで考案された Ktesibios の水時計の構造を描いたものである。この構造には、計測と制御に関心をもつものにとっては実に示唆に富んだ概念と原理が多く含まれているのである。

この水時計は、大きく分けると 2 つの水槽 A、B によって構成されている。2 つの水槽の役割は、それぞれ以下のように述べるができる。すなわち、水槽 A (調節槽) は外部から取り入れた水を溜めて、一定量の水を B へ供給する役割をもっている。水槽 B の役割は A から供給される水を溜めながら、その水位上昇の様子を浮き子 D によって外部へ出力することである。

ここで、注目すべき事柄は、タンク A の上部には注水孔と円錐形の内壁をもつ上蓋があり、A の内部には頭部が円錐形と同じ円錐形状の浮き子 C が入っていることである。この C は、A への流入水量が A からの流出水量に比べて多くなると、上昇して内壁との間隙を狭くして流入水量を減じる。逆に少なくなると、降下して間隙を大きくし、A が常にある一定水位を保つような働きをする。つまり、水槽 A の上蓋と浮き子 C によって、「流量調節器 (flow regulator) の機能」を実現しているのである。

それでは、水槽 B と浮き子 D の鉛直棒先に取り付けられた指針 E と指標 (目盛尺) F に注目することにしよう。浮き子 D の上昇の様子は指針 E の位置を指標 F に記された目盛尺で読み取ることによって知ることができる。したがって、水槽 B への流入水の速さが一定であれば、指針の相対位置を目盛尺で読み取ることによって時間の経過を知ることができる。つまり、計測用語を用いて説明すれば、水槽 B と浮き子 D によって、「時間の経過」を B の水位上昇の「変化量」に「変換する機能」が実現されているのである。

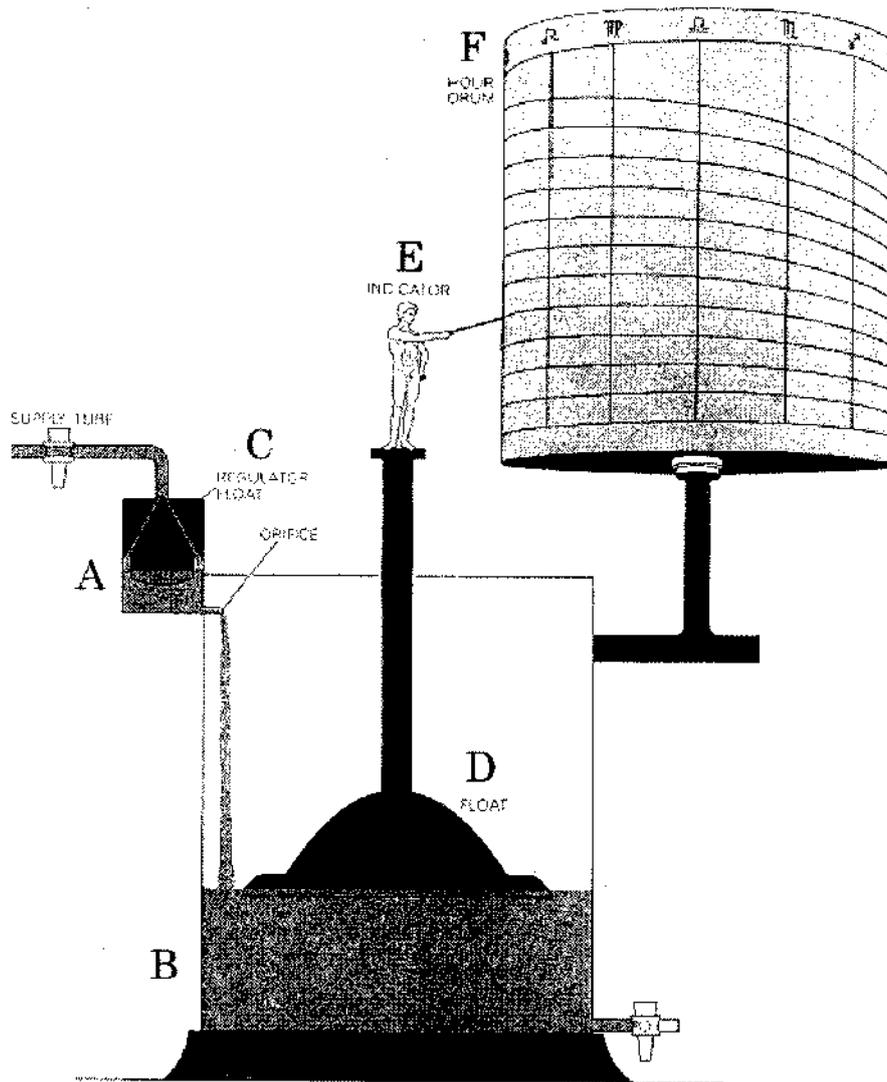


図1 Ktesibiosの水時計²⁾

つぎは、指標 F についてのコメントである。円筒形のドラム周辺に描かれているグラフ（日盛尺）に注目しよう。日盛尺の縦軸には星座のシンボルが記されており、ドラムを左に回転させると日盛尺は短くなっていく。冒頭で述べたように、時間を計るという行為のそもそもの動機（モチベーション）は、陽光の長さを計ることであったわけである。したがって、季節が変わると陽光の長さは一般には変化するわけであり、Ktesibiosの水時計はそのことを十分に配慮した水時計であることがわかる。

先人たちは、夜間に眺める星座を観測し、日時計で測った陽光の長さとの対応付けを行いながらさまざまな知見を得ていたわけである。季節ごとの時間尺度を定める時間標準（陽光の長さ標準）は、それらの知見に基づいて作られたものと容易に推測できる。それをドラム上にグラフとして描き、季節変化に応じて指標（日盛尺）を選択して実情

にあった陽光の長さを指示できるように、このような仕組みが考案されたことも容易に想像できる。

さらに興味深いことは、この水時計は、「計測」と「制御」の相補性を示唆する構成となっている点である。

すでに述べたように、水槽 A の上蓋内壁部の円錐形状と同じ円錐形状頭部をもつ浮き子 C によって流量調節器（flow regulator）の働きを実現している。すなわち、この働きによって、水槽 A の内部水位が一定に保たれ、小径流出孔からの水の流量は一定に保たれる。その結果、時（とき）の進行と水槽 B 内の水位上昇とを対応付けることが可能となっているわけである。つまり、水槽 A の上蓋と浮き子 C を構成要素とするこの仕組みによって、「時の経過」（時間）という被計測量が水槽 B へ流出する「水の速さ」（流出水量）に巧みに変換されることになっている。このようにして、Ktesibiosの水時計では「計測」の目的に叶うように、

「制御」の考えが巧く導入され、活用されているのである。

周知のように、よりよい計測（測定）には外乱の影響を除去して測定環境条件を整えて、計測の目的が達成されるような工夫が必要である。このことは、計測工学の講義で教わる場所であるが、西暦前300年頃に考案されたKtesibiosの水時計は、制御機能が組み込まれた計測システムの典型的な具体例であったわけである。

上に述べたように、Ktesibiosの水時計は時間を測るための計測器として具備すべき重要な諸条件を満たしており、計測工学の観点から眺めても、まさに科学計測器と呼ぶにふさわしい優れた人工物の1つであったといえることができる。

4. 漏刻（ろうこく）

ご存知のように、わが国では6月10日を「時の記念日」と呼ぶ風習がある。これは「日本書紀」に記載された、「齋明6年（西暦660年）5月、中大兄皇子（天智天皇）が初めて漏刻を造り、人々に時刻を知らせた」という故事に基づくものである。「漏刻」の起源は、秦始皇帝の頃に遡るものと考えられる。

筆者は1992年に中国西安市郊外の陝西省博物館に訪れたことがあるが、そこには秦始皇帝の頃の漏刻と思しきの写真1のような出土展示品が展示されていた。その漏刻は、漏壺（水槽下部に小径の管と栓とを付けた水槽）と、刻箭（指標に相当する鉛直の物差し棒付き浮き子）と、刻箭のガイド孔のついた上蓋の3つの要素から構成されていた。

展示物の説明書には、まず漏壺にあらかじめ一定の水位まで水を入れてから上蓋を閉める。つぎに、日の出に合わせて水槽下部の栓を開けると、小径の管から水が漏れ始める。時が進むにつれて、刻箭（物差し）が徐々に下降するので、

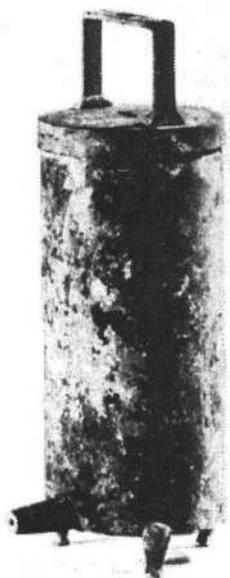


写真1 漏刻（ろうこく）

その様子を目盛で読んで時間を知るという「沈箭刻」であると記されていた。実にシンプルな構造のものであったが、物差しの目盛に工夫がされていたかどうかの記憶は定かではない。なぜなら、小径の管から漏れる水の速さは、原理的には水槽の水位の平方根に比例するので、もし目盛の間隔が一定であれば不都合が生じることになる。Ktesibiosの水時計のところで述べたように、水位の変化で時間を測るためには漏壺の水位を一定に保つ工夫が必要である。しかし、展示物の説明書にはそのことは触れられていなかったように記憶している。

その後、秦代の漏刻にはさまざまな改良が施されたようである³⁾。まず、前漢の末期には、「沈箭漏」から「浮箭漏」に変化した。すなわち、漏壺から出る水を受ける壺（Ktesibiosの水時計の水槽Bに相当する）を設けて漏壺より下位に配置し、さらに箭を下位の壺へ移すことによって、漏刻は初期の「沈箭漏」から「浮箭漏」（下位の水槽の水位上昇で時間を測る方式のもの）へと指示方式が変更された。つぎに、漏壺からの流量の安定化を図るために、水槽の多層化とサイフォン管による連結方法が考案された。ちなみに、唐代には四段式漏壺を採用した漏刻が呂才によって考案されている³⁾。

唐代の漏刻と比べてみても、Ktesibiosの水時計がいかに巧妙な考案物であったかが改めてわかるが、筆者の興味を強く惹いた中国とギリシャの水時計の特徴的な相違点をまとめると、以下ようになる。

まず、時刻の指示方式の違いである。具体的には、指針の動く上下方向の違いと、季節変化を考慮した指示部の実現方法の違いである。

中国では当初は指針が下降する沈箭漏（漢文の表記順序と同じ）で時間をはかり、ギリシャでは当初から指針の上昇で時間をはかる方式（中国の浮箭漏に相当する）が採用されていたことである。また季節変化を考慮した指示部の実現方法に関しては、ギリシャでは円筒ドラムの周囲上に指標を回転軸に平行に配置して利便性と省力化を図られていたのに対して、中国では各種の刻箭をあらかじめ用意しておき、箭の選択はその都度「漏刻博士」のような測定専門家に委ねるといって「人海戦術」によって対応していたものと推測できる。

つぎは、漏壺の水位を一定に保つ調節機能の実現方法の違いである。

ギリシャでは上位の水槽に自動平衡機構を組み込み、水位の制御を単一層で実現したが、中国では3~4個の水槽を階段状に配置し、サイフォン管によってそれらを連結した多層構造によって調節機能の実現を図っていたわけである。

いずれも、ほぼ同時代を起源とする水時計で、その基本原理も同じである。しかし筆者は、それらの実施形態に見られる相違点の内容から、ギリシャと中国の文化の違いを物語る一面を垣間見たような気がして、大変に興味深いので

ある。

5. 計測のころは科学する心

自然現象を観測し、その背後に横たわる法則性を数量的に記述するためには、「計測」という行為が必要不可欠であることは明らかである。冒頭で記したように、計測とは特定の目的をもって、事物を量的に捉えるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用いて初期の目的を達成させることである。つまり、「計測のころは、科学する心である」ともいえるのである。

ところが最近では、わが国の高等教育機関である大学等の学科名称リストの中で「計測学科」、「計測工学科」などの「計測」を陽に表わした学科名称がきわめて少なくなっている。同様のことは、「制御」についてもいえることである。

計測技術が知的情報生産活動のインフラとして一般常識化されたことは喜ばしいことではある。しかし、はかる（測る、計る）という行為があまりにも日常的となったためか、計測という行為の由来やその背景にある学術的意義を忘れがちになっているのではないかと懸念される。

「計測」という行為は、人類が集落を形成し、共同生活をはじめた頃に始まり、その基本概念は延々と時代を越えて受け継がれているのである。しかし、エレクトロニクスの急激な進歩によって、今日では使い勝手のよい各種測定器やインテリジェンスをもった計測機器が数多く開発されて市販されるようになった。その結果、計測の「心」（計測行為のもつ本来の意味と概念）を無視した、「作業」（計測機器の取り扱い方法）の皮相的なマニュアル化のみが進んでいるような印象を受ける。

6年ほど前のことであるが、あるウラン加工施設で臨界事故という放射能漏れ事故があった。報道記事（たとえば、1999.10.06 朝日朝刊）によれば、正規の作業マニュアルが整備されており、マニュアルを作った当時の人たちは「この手順を踏まなければ危険だ」とその内容を十分に理解していたと考えられる。しかし歳月が流れて、臨界についての教育がなされないままマニュアルだけが生き残った。その結果、後の人たちにとってはマニュアルに記載された手順はただ単に時間のかかる段取りでしかなく、それが不可欠な重要な手順であるという認識が十分に培われていなかった。そのために、手順を飛ばすことが日常化していたというのが事故の原因であったとのことである。

しかし、この報道記事を読んで筆者は、マニュアル作成の動機付けとなった手順についての基礎概念の継承が等閑になっていたことが、その事故の遠因ではなかったかと推測するのである。

わが国では、科学的思考を経て得られた結果を利用することを「科学的」と称する傾向が強いが、本来、科学的とは言うのは、科学的思考のプロセスそのものを踏むことを指すのである。計測という行為は、まさにこの本来の科学的思考プロセスの源流に相当するものであることを忘れてはならない。

6. おわりに

人口に膾炙した語句に「温故知新」（ふるきをたずねて新らしきを知る）という言葉がある。

本稿では、この語句の教えるところにしたがい、総論の展開を試みてきたが、計測は今日の文明社会の礎（いしずえ）を築いた基礎概念であることには間違いない。それでは、最後にフレッシュマンへ贈る一言を述べ、本稿を終えることにしよう。

計測工学という専門分野は、計測という行為と同様に、便利屋的で地味な存在である。そこには、華やかな場面も、また役割もそれほど多く巡ってこないかもしれない。しかし、人間社会のより良い発展をこれまで堅実に支えてきた、誇るべき工学の基礎分野である。計測と制御に係わるエンジニアの真摯さとその技術の確かさのゆえに、長く社会の信頼を得てきたわけである。

フレッシュマンが、このことをしっかりと肝に銘じ、それぞれの持ち場でその任を確実に果されることを大いに期待してやまない。

(2006年1月15日受付)

参考文献

- 1) 日本規格協会（編）：計測用語（JIS Z 8103-1990 準拠），日本規格協会（1993）
- 2) Otto Mayr: The Origins of Feedback Control, Scientific American, 223-4, 110/118 (1970)
- 3) 飛鳥資料館：http://www.asukanet.gr.jp/ASUKA4/mizutokei/tokei02.html

[著者紹介]

小野敏郎君（名誉会員）



1965年京都大学大学院航空工学専攻博士課程修了。67年京都大学工学部数理工学科助手、講師、68年大阪府立大学工学部機械工学科助教授を経て、83年同学科教授、2000年退職、大阪府立大学名誉教授。現在、岡山理科大学工学部知能機械工学科教授（工学博士）。動的質量計測、制御理論の応用研究などに従事。日本機械学会永年会員、本会フェロー。

故小野敏郎先生の多大なご業績を再確認しながら、ご寄稿いただきました本記事を本特集「計測工学 温故知新」へ敬意を表して再掲いたします。