

連載

天文学史教材としての天体観測機器 3DCG 復元【4】

古観測機器「圭表」の 3DCG 復元

柳澤洋文、福江 純（大阪教育大学）、富田良雄（京都大学）

1 はじめに

前回、古観測機器の一つ、「渾天儀」について、その構造、使用法、3DCG 復元について解説した。最終回となる今号は太陽南中高度観測を目的とした機器「圭表」について解説する。前々回に簡単な紹介を行ったので、今回は圭表の構造、観測法、得られた観測データの処理方法、教育利用を目的とした 3DCG 復元等を詳しく解説していく。

以下、2 節で圭表の構造と観測方法を概観する。3 節で圭表の 3DCG 復元を紹介する。4 節で今連載をまとめる。

2 圭表

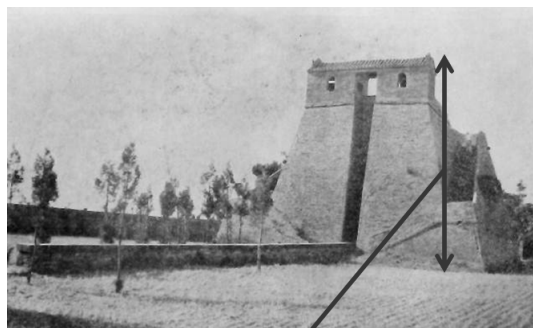
圭表は前述した通り、太陽の運行、特に南中高度の測定を行う機器である。圭表の「表」は水平な地面に立てた棒（ノーマン）のことを表し、これだけを用いて、南中高度の他に日中の太陽高度の推移を観測する。一方、「圭」とは「計」を意味し、表の落とした影を「計る」部位を意味する。現在の「時計」は、昔「土圭」と称し、日時計のことを指していた。すなわち、表の影を、方位・目盛を刻んだ圭部に落として、そこから時刻を読み取った歴史から来ているのだ。

圭表の歴史は長く、中国が周の時代、政治家であった周公旦が陽城の地に表を立て、冬至を計ったとの記録がある。[6]

現代の天文学は春分点が天球座標の原点とされているが、東洋の天文暦学では冬至が日の原点として扱われ重要視された。故に一年で一番日陰が長くなる冬至や短くなる夏至を正確に観測し、より確かな一太陽年を求めようと、時代とともに圭表やその補助機器に

様々な工夫を加えていくこととなる（図 1）。

日本においては、渋川春海の貞享改暦から科学観測が始まり、太陽暦導入まで様々な圭表が編み出された。その中でも、後述する寛政改暦時代の圭表は非常に工夫されており、日本天文学史上最高の精度を誇った機器に仕上がっている。



高さ40尺（約12m）

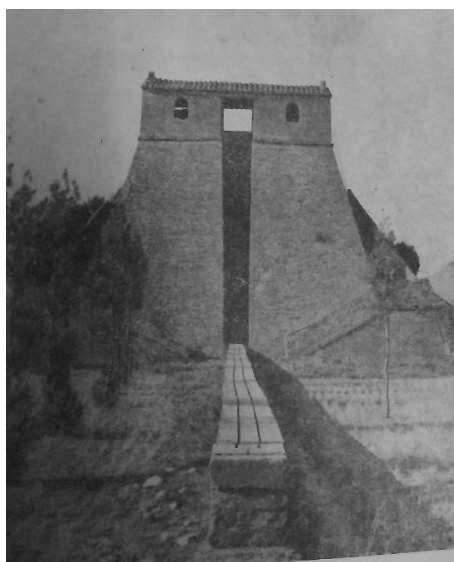


図 1 元の測量台の圭表儀（周公測景臺調査報告一冊より抜粋）

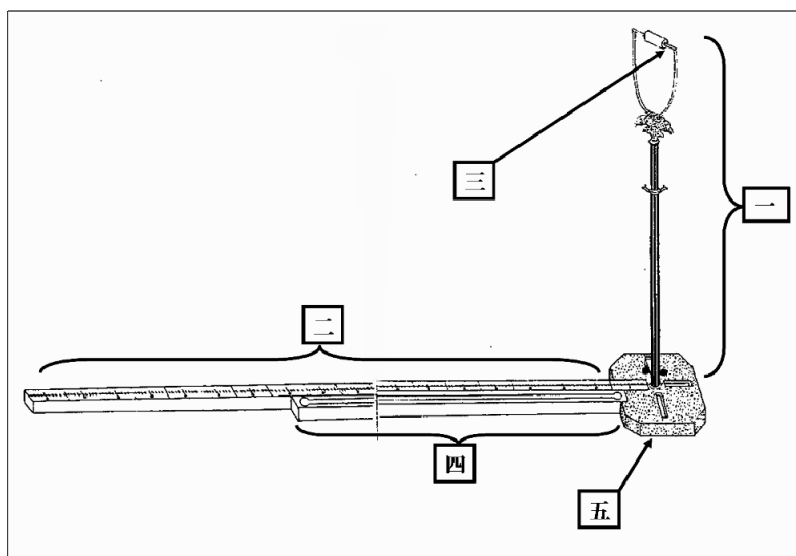


図2 圭表の構造図解（[8] 暦法新書 P.181 を編集）モデルは宝暦改暦時代の「泰邦の圭表」

2.1 圭表の構造

圭表の全体はL字型構造で、全体を南北に寝かし、影を投じる南方を背にした縦板（表盤）と、北方へ向かって寝かせた影の長さを読み取る横板（圭盤）からなるシンプルな構造である（図2）。大きさは時代によって異なるが、8尺（約2.4m）程度のものが主流である。

圭表は表が高くあればあるほど精度良く太陽高度を測定することができるのだが、その代わり圭盤に投じる影が淡くなり視認しがたくなる。そのため後述する「景符」を用いて陰影をシャープにし、観測精度を高めている。

では圭表の構造を、図2を参考に確認していこう。図中に一～五まで記号を振ったので、それぞれ対応する部位を順に説明する。

・一、表… 鉛直に立て、木材を使用し、下部をしっかりと台石で固定した不動の柱。大きいものだと風雨に年中さらされる事になるので、表面の腐食を防ぐため金属の板を張る等の工夫がなされている。また、寛政暦時代

の圭表では、表の高さを一定とせず（材の伸縮を考慮した）、（三）から糸をたらし鉛直を確保した上で、「表尺」（（三）に引っかけ、表の高さを正確に測るための目盛を刻んだ板）という補助器具を用いて観測毎に表の高さを計測した。

・二、圭… 南北に走らせた（三）の落とす影の長さを測定する部位。木材を使用し、その下には石材を合わせた頑丈な造りになっている。目盛を刻み、目測により表との交点からその長さを測定する。

・三、横梁（おうりょう）… 表最上部に固定した東西に横たわる真鍮製の丸棒。この影の位置を（二）上で観測する。ただその陰影は淡く、判別しにくいいため、景符を用いて鮮明な像にする。

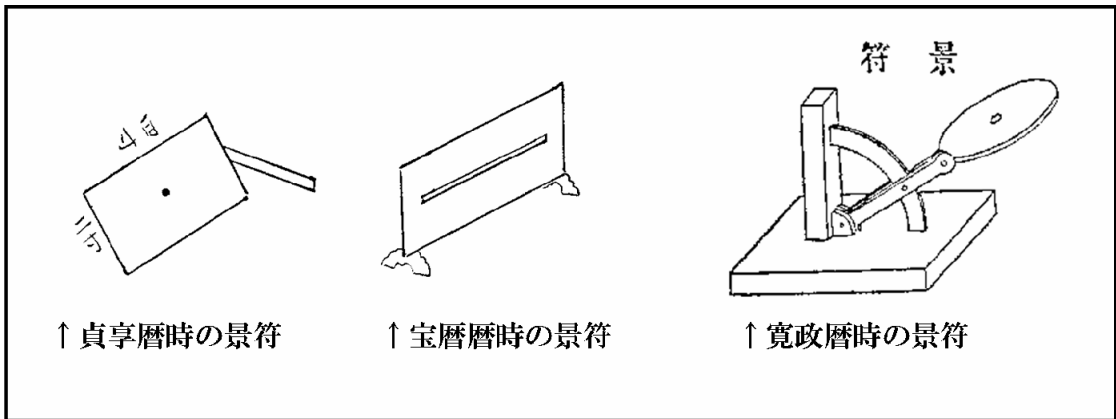


図5 日本の改暦で使用された景符一覧 ([1])

・四、水準器… (二)の水平を確保するための装置。図中の圭表ではこの他に(五)内部にも水準器を配し、(一)の水平を確保している。

・五、台石… (一)、(二)の始点を固定する台石。図3の圭表台石は京都の梅林寺に現存している。

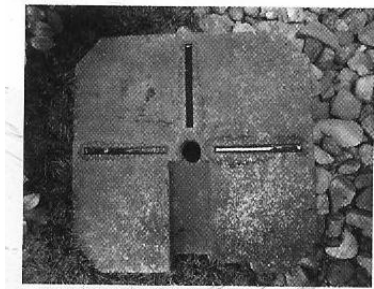


図3 泰邦の圭表台石 ([7])

三方に伸びる掘り込みは水準器

2.2 観測補助装置「景符(けいふ)」の威力

前述したとおり、横梁が落とす影は淡く、判別しにくい。そのため考え出された装置が「景符」と言われる補助器具である。この器具を使えば、肉眼でもmm単位で影の位置を読み取れるようになる強力なものだ。

景符の構造自体は非常に単純で、単に板に小孔やスリットを開けただけのものであるが、その威力は絶大である。どちらとも、圭盤上の影の光路の途中に直角に挿入して、その面を日光に正対させると、ピンホールの原理(ピンホールは波動光学上の多焦点レンズ)により、太陽と横梁との逆陰影像が圭盤上にくっきりと写像されるのだ(図4)。

日本では図5のような景符が考案され使用された。寛政改暦時代にはさらに「景筐(けいきょう)」なる器具が用いられた。これは景符とスクリーンの間にかます45°の面を持つ小箱で、景符が太陽光線に対し直角になっているか確認するための器具である。

これら装置を用いることで、目盛りの読み取り誤差は0.1mm程度にまで向上し。これを角度に直すと8尺(約2.4m)の表で6″、40尺(約12m)の高表で1″の精度を手に入れることが出来たのだ。

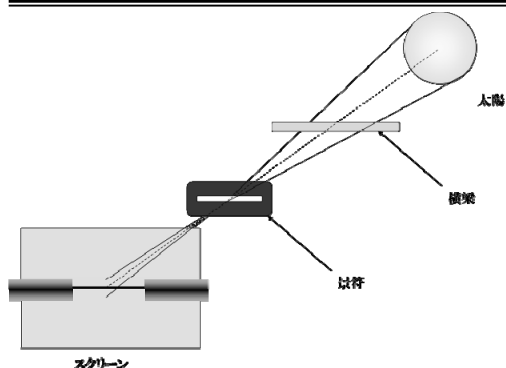


図 4 景符を用いた際の光路図

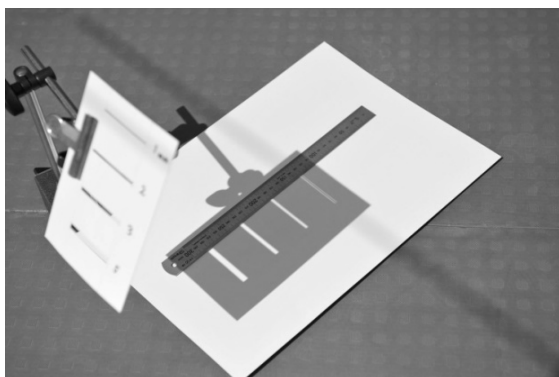


図 7 横梁の落とした陰影に景符（スリット型）を差し込む。



図 6 圭表を模した装置での観測実験風景
表の高さは 8 尺（約 2.4m）程度。

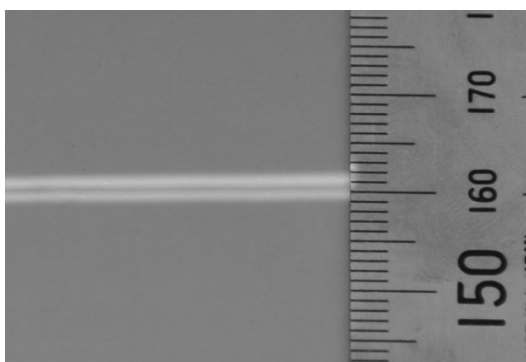


図 8 景符のスリットを通り、スクリーン上で鮮明に映し出された横梁の陰影

2.3 圭表での観測

圭表での基本的な観測手順を簡単にまとめる（図 6、図 7、図 8）。

① 表を、正確に南を背にして配置し（設置前に太陽の南中観測から南北線を決めておく）、圭を北方に向かって設置する。圭、表ともに、以後不動とする。

② 横梁が圭盤上に映しだされた頃から観測を開始する。景符を太陽光線に直角になるよう位置を調節し、鮮明な像が圭盤に投じられたことを確認する。

③投じられた像の両側の位置を数点プロットし、その中心が横梁の中心像となる。この作業を南中の瞬間を挟んで数回計測する。

④ 観測後、一日の観測の中で、最も影が短くなった時刻が、その日の太陽南中時である。

このように、日中晴れた日であれば、太陽高度観測が可能となり、この一連の作業を一年間通じて行うことで南中高度の年変化を見ることが出来る。ここから目的である一太陽年を、南中時刻と、その時の影の長さの関数から計算で求めることが出来る。

中国で圭表が発明されたころは、二至点(夏至と冬至)はほぼ近日点と遠日点に近かったため、影の変化は南中の前後でほぼ対称であり、計算は簡単だった。しかし、江戸時代の二至点は、近日点や遠日点から少しずれていて(冬至点は近日点から約 6° ずれている)、地球の楕円軌道は冬至点を通る軸について対称ではなくなっていたため、対称な2次関数では誤差が大きくなる。そのため高次の関数を解き、その接線の傾きがゼロになる点が冬至点ということになるが、当時の「和算」ではすでに多項式が極値を取る時その導関数がゼロになることが知られていた。そこで、この法を持ち、二至の時刻を決定することが出来、一太陽年の導出が可能になる。

3. 圭表の3DCG復元

今回3DCG復元対象にした圭表は、「貞享改暦時代の圭表」(図9)と、「寛政改暦時代の圭表」(図10)で、ともに文献にその構造が記録されている。前者は「初学天文指南巻之一」、後者は「寛政暦書」に載っており、これらのデータを基に復元を行った。

3.1 3DCG復元

今回も前回同様、「Shade」を用いて3DCGを作成した(図11~図14)。

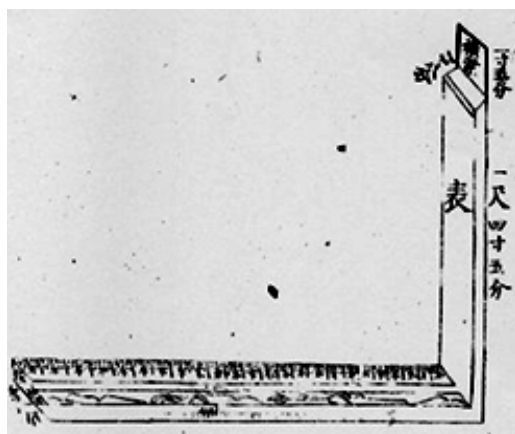


図9 貞享改暦時の圭表(馬場信武著 初学天文指南巻之一 圭表全景)

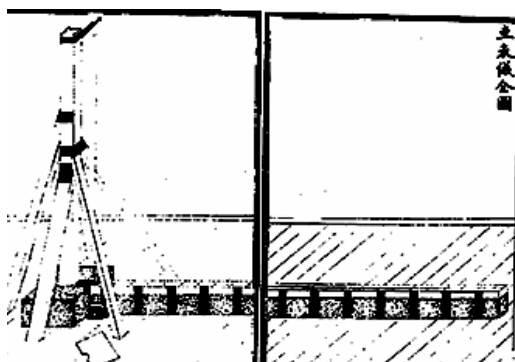


図10 寛政改暦時の圭表(寛政暦書 [8])



図11 貞享暦圭表復元

全体は木材で作られ、高さは43.5cmという小型の圭表である。他には8尺(約2.4m)の鉄表も用いられた記録もあるのだが、その構造等は残っていない。([1])



図 12 寛政暦圭表復元

木材に金属板で表面を覆っている。表の安定を保証するため 6 本の柱で支えている。圭盤は石材と合わせ上下緊縛、目盛は 8 寸(約 15cm)ごとに刻み、長さは 36 尺(11m)。また寛政暦圭表は専用の建屋があり、それも合わせて復元した(後述)。

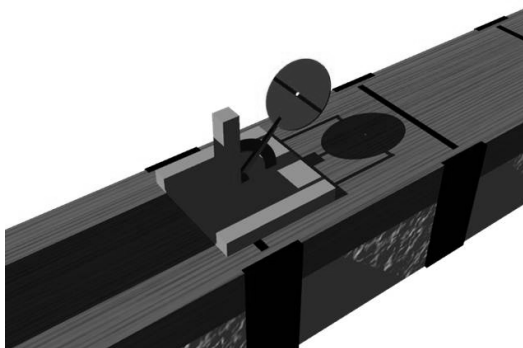


図 13 寛政改暦時のピンホール式景符復元

寛政暦圭表の構造は表の一部が露出した状態で、納まる形になっており、観測中屋根の一部が蝶番式に跳ね上がる構造により、ここから日光を導入し、圭盤に影を落とす仕組みになっている(図 15、図 16)。

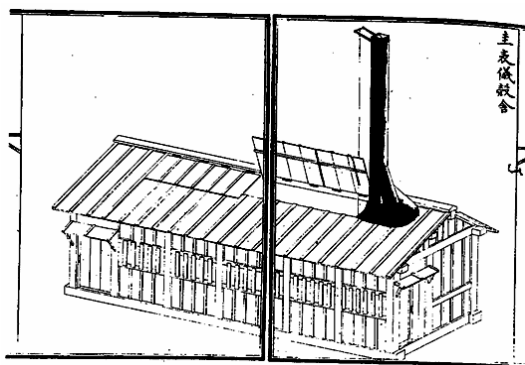


図 14 圭表建屋 ([8])



図 15 圭表建屋の 3DCG 復元 1



図 16 圭表建屋の 3DCG 復元 2

3.2 アニメーションレンダリング

以上の圭表 3DCG 復元をアニメーションレンダリングし、動画教材に仕上げたのだが、この誌面上で動画を載せることはもちろんで

きない。なので、動画中のキャプチャー画像を以下に載せる(図17; 動画は大阪教育大学天文学研究室HPに掲載予定)。

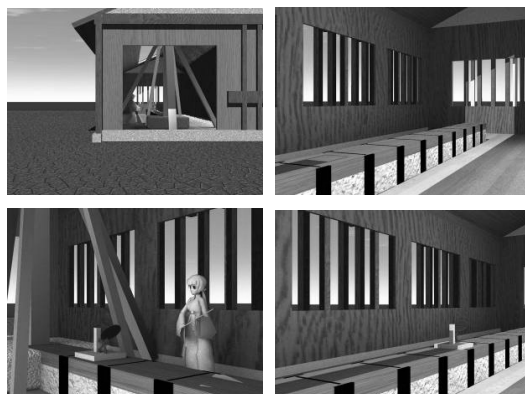


図17 アニメーションレンダリングキャプチャー画像集

4 今連載のまとめ

本誌で全4回、日本、中国の天文学の変遷、歴史、暦作成に使用された観測機器など様々な「歴史」を語ってきた。普通、天文学と言えば最新かつ最先端の技術を駆使し、未知なる現象や天体を発見、研究するという印象が強く、分かりきった天文学の歴史を再度研究するといったことは今の業界ではかなりの異端である。しかし、その「分かりきったこと」でも使い方や視点を変えてみるだけでまた新しい天文学の見方ができるのではないだろうか。特に中国、日本では特有の天象の捉え方が生まれ、西洋の天文学とは一線を画している。故にユニークな観測機器やドラマティックな暦作成の背景が存在しえたのである。

そんな歴史をまとめてみると十分読み応えがあり、読者の方々も楽しめたのではないだろうか(と願いたい)。

我々は今連載を通して天文の歴史、天文学史を紐解くだけでなく前回、今回と紹介したような観測機器の3DCG復元でもって紹介させていただいた。何度も誌面上で言ってきたことだが、文献でしか見ることのできない

ユニークな古観測機器達を復元してみることで、分かりにくかった詳細が明らかになり、またアニメーションレンダリングを行うことにより教材的な価値も見出すことができた。天文学史の教材など今まで聞きもしないことだったので、3DCGと合わせてこれをきっかけに活用していただければと思う。

しかしまだまだ、まったく少数派な天文学史研究の世界である。読者に限らず色々な方々に興味を持っていただけたら幸いである。そしてこれを機に研究を始められたらもっと幸いである。

文 献

- [1] 渡辺敏夫(1987)『近世日本天文学史 上巻』, 恒星社
- [2] 堀源一郎 編(1981)『現代天文学講座 14 天文計算セミナー』, 恒星社
- [3] 中山茂 編(1982)『現代天文学講座 15 天文学史』, 恒星社
- [4] 中山茂 編(1983)『現代天文学講座 別冊 天文学人名事典』, 恒星社
- [5] 湯浅光朝(1957)『解説 科学文化史年表 著』, 中央公論社
- [6] 斉藤国治(1982)『飛鳥時代の天文学』, 河出書房新社
- [7] NHK テレビテキスト(2011)『趣味工房 シリーズ 直伝和の極意 あっぱれ! 江戸のテクノロジー』, NHK 出版
- [8] 浅見恵 編 安田健 編 科学書院(2001)『日本科学技術古典籍資料 ~ 天文学篇 1、天文学篇 2』, 霞ヶ関出版

柳澤洋文