

す。それでも、北極星を巡る周極星となったことを利用し、北極星の上下を通過する際に視差が出るかを調べました。もし月と同じ距離に超新星があれば、デンマークからでは1度ほどの視差が観測されるはずですが、検出されませんでした。そこで彼は、その超新星は極めて遠方の天体であって、アリストテレスが永遠に変わらない神の世界とした天界に存在することを示しました。ガリレオならここで「アリストテレスの馬鹿野郎！」などとうそぶくかも知れませんが、ティコはひたすら観測材料集めに集中します。若い頃に決闘し、鼻をそがれてしまったという武勇伝を有している割には慎重なティコです。同様の慎重さは後の天動説・地動説の折衷説にも垣間見ることができます。

このように、惑星や彗星の位置観測のためには恒星の位置表が必要で、そのためには測定機器と、精度向上のための工夫が必要でした。ティコはそれらを全部自分で考案し、作り、観測しなければなりません。これだけの仕掛けが整って、ようやく惑星位置観測なのです。ケプラーも大いに苦労したようですが、それはその前にティコの飽くなき情熱と奮闘があつての話でした。学問の進歩とは先人の業績の上に積み重ねるもの、ということを実例に示す例と言えそうです。



図2 ウラニボルグの主天文台。ティコの絵をもとに1800年代に描かれた外観

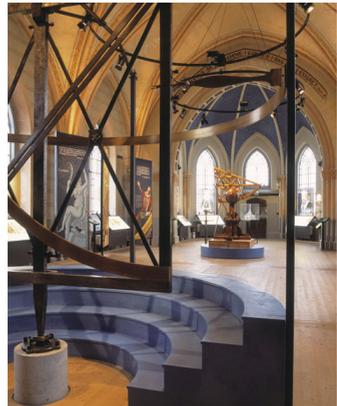


図3 現在、博物館となっている内部

3. ウラニボルグでの観測

超新星観測によって有名になったティコはドイツの封建領主ラントグラフ・ヴィルヘルム4世の知遇を得ます。1575年でした。この王様は大変な天体観測家で、自らスライド式屋根に四分儀、六分儀を備えた天文台を作り、観測に励んでいました。天体の位置観測に時刻を記録するようになったのはこのヴィルヘルムからと言われているほどです。やがて彼は星の位置表(ヘシアン星表)を作り上げますが、これがヨーロッパで最初に出版された近代的な星表と言われています(ティコ



の星表は未出版)。ティコはこの王様から強い影響を受けたようです。

そして、この王様がデンマーク王のフレデリックにティコを紹介したことがその後のティコの人生を一変させることになりました。ティコはフレデリック王の庇護を受け、以来20余年にわたってベーン島天文台で観測一途の生活を送ることができるようになったからです。

そんなこんなので、1576年、ベーン島の真ん中にウラニボルグという名前の天文台を作り、ここにいろいろ工夫した観測道具を置きました。なお、ベーン島はデンマークとスウェーデンの間の海峡にあって、ウラニボルグは現在博物館となり、当時の観測装置などが再現されて展示されています。

4. ステルンボルグ

ウラニボルグが手狭になってきたので、1581年、そこから少し離れた場所に第2天文台を置くことにしました。それがステルンボルグで、星の城という大胆な名前でした。ここには5つの観測所が設けられましたが、いずれも半地下式で、観測装置を地下に置き、屋根が地面に直接置かれている奇妙な形をしていました。風を避けるためと、精確に目盛りを読むための苦肉の策でした。新しい装置はステルンボルグに据え付けられましたから、観測の比重はこちらの方が大きくなっていきました。

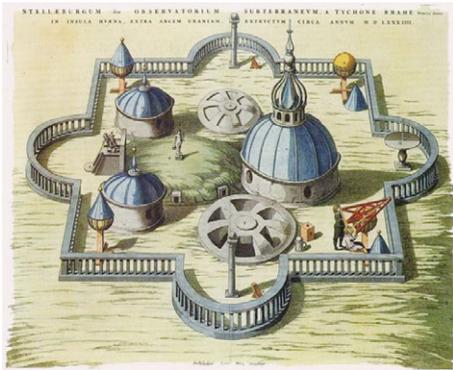


図4 ステルンボルグ。真ん中の暖房室を中心に5つの観測室が地下でつながっています

5. 壁四分儀

ティコはここで太陽、月、恒星、そして惑星の位置観測を行いました。その様子は有名なウラニボルグの壁四分儀の図からうかがうことができます。これは半径2.1メートルで、天体の南中高度を測定します。この図ではティコが指揮し、高度測定係、時計係、記録係の4人で行っています。0.1mmまで目盛りを読むと角度で10″が達成できましたが、実際には1′位だったようです。

それでもここまで達成するには目盛りや眼視装置に独自の工夫が必要でした。中でも有名なのは「対角対線目盛り」の発明です。1目盛りをさらに細分するのは不可能ですから、図のように、上下に目盛をつけ、1個おきに斜めに線を引き、それを10等分した目盛点を打つという方式で、これは伊能忠敬が使った四分儀にも採用されています。科学館4階

展示場のレプリカ四分儀をご覧になってください。パーニヤが副尺を発明する50年前のことだったそうです。ティコの発明が、200年後、江戸期の日本の天文学者たちに影響を与えていたのです。

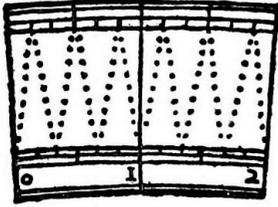


図5 対角対線目盛り

なお、この壁四分儀の絵は大変有名で、ティコと言えばこの絵を思い出す人が多いのですが、実際にこの観測室の壁にはこの通りの図が描かれていたそうです。ただし、手前の観測助手等は出版の際に加えられました。背景には実験室や観測室が見えますが、これは天文台内部そのものを模写したものですし、腕を挙げて指示しているティコの姿は実物大だったそうで、これを見たティコは

大変満足したことが書き残されています。自分が貴族の出であり、下々の者とは違うことを自慢して憚ることがなかったティコですから、このくらいのは平気だったのでしょ。

それはさておき、壁四分儀で測定するには3人がかりだったことから分かるように、ウラニボルグでは大勢の人が働いていました。それを経済的に支えたのはベーン島の住人で(そればかりではありませんでしたが)、お金を必要としていたティコはかなり厳しく取り立てたため、たびたび住人から訴訟を受けては敗訴していたようです。住人にはティコは迷惑な存在でしかなかったようです。

6. 大アーミラリー

壁四分儀に加え、ご自慢の器械は大アーミラリーでした。アーミラリーは通常、「渾天儀(こんてんぎ)」と訳されますが、渾天儀は赤経や赤緯にあたる円環が全球にわたって取り巻いているのが普通で、ティコのそれはやや異なっていますので、ここではアーミラリーと言っておきます。

さて、図を見ると、南北極に向いた極軸に大きな円環が乗っていて、その円環には角度目盛が打ってあり、そこをぐるりと照準が移動できるようになっています。そして、背部の北側には全体を取り巻くような半円環が斜めに付いています。これは赤道儀式望遠鏡と同じ原理で、2つの目盛環によって天体の赤経、赤緯を知ることができました。照準は2つ付いていて、そこから中心軸を狙い、目的の天体はその軸を挟むように見えたらきっちりと向いたということで、照準係が赤緯を、北側にいる1人が赤経値を読み取ります。そして、照準の付いている円環を180度回して、反対側の照準で同様に赤緯を読み取り、両者が一致すれば合格、としていました。

自重による歪みを小さくするため、全体を木製としました。円形劇場のように階段状になっているのは上下する目盛りをうまく読み取るための工夫でした。



図6 ご自慢の壁四分儀。南中高度測定用



図7 大アーミラリー。直径は2.9 m。赤経、赤緯測定用

7. 研究成果

彼は精度1分以下で天体位置を求めたと主張しましたが、全部がそうだったわけではなく、半分は2分程度でしたし、悪いことに助手が転記ミスをするこもしばしばでした。この精度になると、それまで分からなかった効果がいろいろあって、それらをきちんと把握しておかなければ角度1分は達成されません。大変な苦勞がつきまわっていました。

(1) 大気差の検出と測定

1年間の太陽の南中高度を観測してみると、奇妙なことに春・秋分～夏至の角度差の方が春・秋分～冬至の角度差より4′大きいのです。これは地球の自転軸の傾斜角ですから、そう簡単には変わるはずはありません。ティコは地球大気の屈折による現象(大気差)と見破りました。

大気差により、地平線上近くの天体は、月1つ分ほど下にあるのに、地平線上にあるように見えます。この差は天体の高度によって違うので困りものです。そのため、赤道儀で星を追いかけるには高度によって運転速度を変えないといけません(現在の望遠鏡ではしっかりプログラミングされています)。ティコは高度毎の値を求めています。

大気差についてはプトレマイオスの研究があり、ティコの100年ほど前にヴァルザーが観測していますが、きちんとした値を示したのはティコが最初だったようです。

(2) 地軸の傾斜角(黄道傾斜角)

太陽高度の測定からティコは $23^{\circ} 31.5'$ と求めました。コペルニクスの値は $23^{\circ} 28'$ 。コペルニクスは大気差を知らなかったため、冬場の太陽高度が正しくなかったからだとしてティコは考えました。なお、現在の値から推定すると、この時代の角度は $23^{\circ} 30'$ ですから、ティコの値は大きく、太陽視差に1500年ほど前のヒッパルコスの値を採用していたのが原因だったようです。

太陽視差は地球の半径と太陽までの距離の比のことで、太陽までの距離が分からないと正しい値は求められません。これがほぼ正確に分かったのはティコの死後170年ほどたってからでしたから、ティコには望むべくもありませんでした。ですから、太陽視差が関係するティコの値には数分の系統的な誤差が含まれています。地軸の傾斜角も、結構、難しい問題なんですね。

(3) 太陽軌道の離心率、近日点経度変化

太陽軌道(地球軌道と同義)の離心率を0.03584(現在は0.0167)、近日点経度を 95.5° (現在は 103.0°)と求めました。離心率はコペルニクスの値と一致しましたが、近日点経度は 1° ほど違いましたので、太陽軌道面は回転し、近日点経度は変化すると考えました。近日点移動は水星が有名ですが、地球では1年間に約 $11''$ 変化することが、現在、知られています。

(4) 歪んだ月の軌道

月の軌道が楕円状であろうことは、現代の視点からは容易に想像できますが、ティコは満月時・新月時の軌道の歪みと半月時のそれとは異なることと、そして、満月時・新月時には動きが早く、半月時にはゆっくりとなることを見出しました。また力学が確立していなかった時代ですから、その理由は全く霧の中でした。その後、ニュートンが主著プリンキピアの中で、この現象は太陽の引力の影響による効果であることを示し、見事な決着を迎えました。

また、軌道面の傾斜が4分の1度ほどの幅で変動することや、1月に月の運動速度はやや遅くなり、7月には少し早くなることも見出しています。ティコの死後、ケプラーはこれらの効果を取り入れて、ブトレマイオスの月の運動理論を改良しました。

月の位置観測には太陽からの離隔測定も含まれていますが、これは決して容易なことではありませんでした。同時に見えるとは限らないからです。そこで、ティコは昼に金星が見えることを利用することを思いつきました。日中、太陽と金星の離隔を測定し、夜になったら金星と月、という具合に金星を仲介役にしました。この結果、精度がうんと上がったそうです。もちろん、大気差はしっかり補正されていました。

(5) 彗星と新星の視差

カシオペア座新星のことは初めに触れたとおりですが、彗星についても同様の



観測から視差が見出せないことを示しました。特に1585年の彗星では念入りに観測が行われ、1'の精度で計測されましたが、視差は見出せませんでした。彗星は月より6倍以上遠くにあり、そこはアリストテレス流宇宙観では神の世界とされていた場所でした。

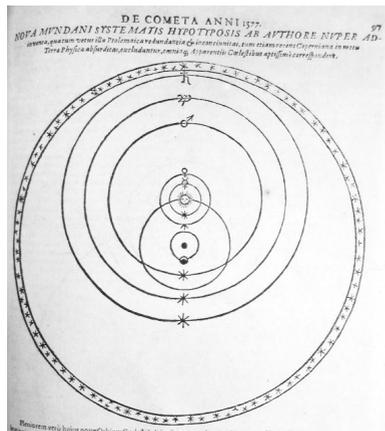


図8 ティコの太陽系モデル。1587年

ティコは、地球が宇宙の中心にあって、太陽は地球を巡り、その太陽を中心に他の惑星たちが回るという宇宙観を提示したことは有名ですが、これはコペルニクスの太陽中心説同様、大昔から知られていた構成であり、決して新しいアイデアではありませんでした。もっとも、ティコは地球公転に伴う年周視差を見出せないことからそう帰結した点では重みが違いますが。

それよりも、この彗星・新星までの距離の問題の方が新たな宇宙観形成には重要だったのではないのでしょうか。年周視差も力学も知られていない時代です。

太陽が中心か、地球が中心か、これは所詮、水掛論争に終始してしまいます。しかし、彗星や新星が月より遠いことがはっきりして、地球中心のアリストテレス流宇宙観では具合が悪いことは誰の目にも明らかになったのではないのでしょうか。



図9 バイエルの上ノメトリア星図のオリオン。姿だけが裏返して、やや奇妙

(6) 恒星位置表

この時代に出版された恒星位置表で最も精度が良かったのは、先に書いたように、ヴィルヘルム4世のヘシアン星表だったようです。ティコの星表はそれより良かったのですが、出版はされず、関係者に回覧されていたようです。これを形にしたのがバイエルで、1603年、ウラノメトリアという星図にして発表しました。バイエルはここで星座ごとに明るい星にα、β、…と名前をつけていきました。こうして今日でも使われているおなじみの表式ができあがりました。

ティコは最後まで観測に基づくとという姿勢を崩しませんでした。太陽中心説を正しいと考えるのは一種の信仰でした。この時代、何の証拠もなかったのですから。その証拠を見出せなかったティコはコペル

ニクスと同じ立場に立つことはありませんでした。現代から見れば、ティコの方がより科学的だったとも言えます。しかし、仮説を持たなかったからでしょうか、大きな飛躍を遂げることはできませんでした。これがティコの限界と言え言えるかも知れません。

8. ケプラーとの関係

国王の死によりベーン島を失ったティコはヨーロッパを数年さまよい、1599年、神聖ローマ帝国皇帝ルドルフ2世に迎えられ、プラハに移りました。ルドルフ2世は理科好きの王様で、研究所を持つほどでしたが、財政は火の車だったようです。

ここで新たに観測を始めたところに助手として採用されたのがケプラーでした。ティコの死の1年前でした。ケプラーの仕事はベーン島で行われた観測結果を整理することでした。ティコが持っていたのは四分儀やアーミラリーで得られた生の観測データそのもので、これを天文学的に有用な形に変換していくには数学の力を必要としましたから、ケプラーにはお誂えの仕事でした。それに、ティコのデータの重要性を理解できたのは、ティコ自身よりケプラーではなかったかと思われまから、その点では人を得た、と言えるでしょう。ティコのもっぱらの関心事は天体視差であり、火星の動きがコペルニクスやその前の予言では合わないことを知っていて精力的に観測したものの、その動機は正しい惑星位置によって正しく占星術を行うことだったからです。それに、ティコが新たな仕事に乗り出すには少々年齢を重ねていました。

こうしてケプラーにティコのデータが渡りました。ティコの最後の財産とも言えるデータでしたから、ティコの死後、親族がケプラーに返還を迫ったことがあったようです。それで、ケプラーがティコを毒殺し、データを我が物にしたのではないかというケプラー疑惑なるものが持ち上がることになりました。その真偽のほどはともかく、ティコの親族にデータがどうにかできたとも思えず、結果的にはケプラーによって日の目を見たのですから、最善の結果になったと言えるのではないのでしょうか。

名著に数えられている朝永振一郎の「物理学とは何だろうか」は「ケプラーの模索と発見」から始まっていて、ティコ・プラーエなくして近代科学の幕開けはなかったことを象徴的に示しています。しかし、その割にはティコの仕事はあまり知られていませんし、何となく、イメージが良くないようにも見えます。実際、自慢しいで、傲慢で、浪費家で、島民をしいたげた、と悪評まみれですが、観測装置を工夫し、飽くことなく測定に邁進し、あらゆる犠牲を払ってでも宇宙の真実に迫ろうとした彼の姿には崇高なものさえ感じるのは、判官鼻員でしょうか。

かとう けんいち(科学館長)