

「数学史研究 No.232 号」抜刷り

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

竹迫 忍

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

竹 迫 忍

1. 概 要

最小二乗法はドイツの数学者ガウスが発見された小惑星ケレスの観測値から精確な軌道を計算する方法として導入し、現在では正規分布の誤差の発生するいろいろな分野で使われている。最近、日本ではキトラ古墳の天文図の公開により、その天文図のもととなった星表の観測年代を推定する方法として、用いられその結果が発表されている。しかし、同じデータを使用している研究者により推定年代が違うという問題も生まれている。また、従来の最小二乗法による年代推定では、推定幅についての根拠や計算法は示されていない。

本稿では最小二乗法により中国の古代星図の年代推定を行うために、まず観測誤差と推定年のばらつき（推定年誤差の標準偏差）の関係をシミュレーションにより明らかにする。シミュレーションでは、中国星座で重要な28宿距星の場合と対象となる星の数が増加した場合の関係の変化を考察する。これにより最小二乗法を使い誤差の二乗和が最小になる推定年で、残った誤差（平均二乗誤差）から推定年のばらつきが計算できることになる。さらにそれを用いて中国古代星図に描かれた星の位置から星図が参照した星表の観測年代を推定する。

2. 最小二乗法による年代推定の考え方

最小二乗法による星表の観測年の推定方法の概要を説明する。

ある年 (year0とする) に星の位置観測を行い観測データを得たとする。その中の3つの星 (X, Y, Z) の観測値を X_0, Y_0, Z_0 、観測誤差を X_d, Y_d, Z_d 、その時の真の値を X_c, Y_c, Z_c とするとその関係は以下の式で表される。

$$X_0 = X_c + X_d, Y_0 = Y_c + Y_d, Z_0 = Z_c + Z_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

今適当な年yearでの真の値 X_c', Y_c', Z_c' を理論式から求め、観測値との差の二乗和をとる。

$$\text{SUM} = (X_0 - X_c')^2 + (Y_0 - Y_c')^2 + (Z_0 - Z_c')^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

その後、計算する年を変化させこの二乗和SUMが最小となる年year1を観測年と推定し、このときのroot (SUM/(n-1))を残差(平均二乗誤差)と呼ぶ。(nはサンプル数。母集団の一部の観測値で全体を予測するため不偏分散としてn-1を使用する。この例ではn=3)

また観測年year0と推定年year1との差を推定年誤差とする。観測誤差Xd, Yd, Zdは観測装置の精度や観測者により最大値が一定でランダムな正規分布をする。残差が同じであっても、各星の歳差の特性と各星に加えられた誤差が違うため、推定年year1も実際の観測年year0を中心に正規分布をする。

また測定装置が傾いていた場合全ての観測値に固定の誤差を含む。推定観測年において次の式の固定誤差dを変化させて二乗和が最小となるときのdの値が固定誤差である。

$$\text{SUM} = (X_o - X_c' + d)^2 + (Y_o - Y_c' + d)^2 + (Z_o - Z_c' + d)^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

赤経については中国星図の場合春分点からの絶対値ではなく隣の距星との赤経差（宿広度）により計算するので、赤経方向の固定誤差は相殺される。以上の方法により赤経（宿広度）と赤緯（去極度）の2つの星位置にもとづく推定年と残差が求められる^{注1)}。

3. 日本での古代星図への最小二乗法による年代推定の適用事例

3.1 『格子月進図』^{注2)}

大崎正次（1985）p.270では『格子月進図』に描かれた星の位置を星図から読み取り、その去極度から最小二乗法での星表の観測年代（Epoch）を以下と推定している。

- ① 28宿距星の場合 epoch:319±58年 定数項^{注3)}:1.45° ±0.23° 平均誤差:1.22°
- ② 163星の場合 epoch:481±38年 定数項 :2.04° ±0.15° 平均誤差:1.84°

また宿広度については各年代の宿広度を表にして比較しているが、古代の赤経値はあまり信用できないのではないかとして最小二乗法による解析はしていない^{注4)}。

3.2 『キトラ天文図』

宮島一彦（1999）p.60に、使用できる図の南西部に偏った星のデータを使い、かなり大きな誤差はあるが、赤経の平均二乗誤差の結果によりごく大まかな目安として紀元前65年という数字を得たとある。

相馬充（2015）p.5-7では2004年に行われた高精細デジタルカメラによるフォトマップのデータをもとに、400年頃に赤道近くの9星のうち2等台までの明るい5星の赤緯の誤差が2度以内になることに注目し、最小二乗法により384年±139年が得られたとした。

中村士（2015①）p.200-202では相馬充（2015）と同じデータを使用し、BC100年で誤差が5度以下だった17星のデータをもとに100組の疑似データを作りシミュレーションした結果として、ピークがBC73年で信頼度90%における誤差幅が±280年を得たとしている。さらに誤差幅を狭めるためにブートストラップ^{注5)}という統計手法で解析を行い結果として[BC123~BC39]（信頼度90%）を得たとしている^{注6)}。

3.3 『天象列次分野之図』（以下『天象図』と略す。）^{注7)}

宮島一彦（2014）p.60に、『天象図』の赤緯方向のずれが最小になる年で、かつて計算を試みたところ西暦500年代ぐらいの数値になったとある。

中村士（2015 ②）p.9に、距星の同定が困難な宿が5～6宿に達したので、星図のデータには余り重点を置かなかったが、碑文の去極度からはBC51年、星図から測定した去極度からはBC53年、碑文の宿度と去極度を併用した場合BC72年（柳宿を基準）になったとある。またブートストラップを用いた手法では [BC78～BC54] になり『石氏星経』の数値と同じ原点から取られた可能性が高いとしている。

4. 推定誤差の標準偏差と信頼区間

推定誤差の標準偏差と区間推定（信頼区間）という考え方を整理しておく。区間推定にはいくつかの方法があるが、ここでは母集団の分散 σ^2 が分かっている条件で母集団の平均値 μ が、ある確率（たとえば90%）で存在する区間を求める^{注8)}。

具体的には分散 σ^2 が分かっている母集団から n 個の標本を取りその標本の平均値が μ_0 のときに母集団の平均値 μ が90%ある確率の区間は次の式から計算できる。

$$\mu_0 + \sigma \times 1.64 / \text{root}(n) \geq \mu \geq \mu_0 - \sigma \times 1.64 / \text{root}(n) \quad \dots\dots (4)$$

係数は90%の場合：1.64, 95%の場合：1.96, 99%の場合：2.58。

たとえば、母集団の推定年の標準偏差 σ が20年と分かっている、その母集団から抽出した28個の距星の標本の平均値 μ_0 が1000年だった場合、母集団の平均値が90%の確率で推定できる区間は以下のとなる。

$$\mu_0 \pm \sigma / (\text{root}(28) / 1.64) = \mu_0 \pm \sigma / 3.23 = 1000 \pm 20 / 3.23 \text{ (年)} \quad \dots\dots (5)$$

したがって、標準偏差で考える場合より約1/3の推定幅となる。本稿では28宿距星による年代推定の場合は主に90%信頼区間を用いる。また28星より多くの標本がある場合は標準偏差を用いることにする。

5. シミュレーションの方法

基本的な考え方として、測定誤差が増えるにつれて、誤差の二乗和が最小となる推定年での残差（平均二乗誤差）が大きくなり、それにしたがって推定年の誤差の分布も大きくなるはずである。そこである想定した観測年にて測定誤差をランダムに発生させ、変化させた測定誤差での残差と推定年の誤差の標準偏差の関係をグラフに描けば、一般的な関係式を得ることができることになる^{注9)}。シミュレーションは28宿距星の場合だけでなく、星の標本数を大きくした場合も行った。計算は赤緯と宿広度の両方を考慮した方法で行うこ

とも考えられるが、独立した事象なので、赤緯と宿広度別々に行った。また宿広度の計算は隣の距星との引き算で行った^{注10)}。また当初測定値の四捨五入の位置を変化させることも行って見たが、測定誤差が増えるのと等価であるため、シミュレーションでは固定の位置で四捨五入した。シミュレーションでは恒星は「SKY2000 Master Catalog, Version 5」(2006)、星雲星団は「NGC 2000.0」(1988)の星表を使用し、歳差は「Astronomical Algorithms (2nd Ver.)」p.134の計算方式による。

6. シミュレーションの結果

28宿距星を使った場合のシミュレーション結果を表1と図1に示す。たとえば去極度(赤緯)の結果では、最大値±1度の正規分布の観測誤差を加えた場合、残差の平均が0.5925°、観測年との誤差の標準偏差の平均が28.4年、90%の信頼区間は28.4年に1.64/root(28)をかけて8.8年となる。宿広度(赤経)も同じ考え方だが観測単位を1度としているため去極度の結果より残差が上乘せされている。

表1 28宿距星による残差と推定年誤差の標準偏差のシミュレーション結果

観測誤差 (°)	去極度 (赤緯, 観測:0.5度単位)			宿広度(赤経, 観測:1度単位)		
	残差(°)	標準偏差(年)	90%区間(年)	残差(°)	標準偏差(年)	90%区間(年)
0.00	0.1440	4.8	1.5	0.3948	77.4	24.0
0.25	0.2029	9.7	3.0	0.4478	97.5	30.2
0.50	0.3211	15.5	4.8	0.5728	132.2	41.0
1.00	0.5925	28.4	8.8	0.9080	206.4	64.0
2.00	1.1581	55.6	17.2	1.6761	381.3	118.2
4.00	2.3029	110.6	34.3	3.2756	782.6	242.6
8.00	4.5993	220.9	68.5	—	—	—

図1より残差(宿広度誤差 $\Delta\alpha$, 去極度誤差 $\Delta\delta$)と誤差の標準偏差(片側)の関係は次の式となる。

$$\text{宿広度標準偏差(年)} = 4.9 \times \Delta\alpha^2 + 223.9 \times \Delta\alpha - 4.3 \quad \dots\dots (6)$$

$$\text{去極度標準偏差(年)} = 48.2 \times \Delta\delta - 0.5 \quad \dots\dots (7)$$

この式に1.64/root(28)をかけると90%の信頼区間(片側)となる。図1より同じ残差の場合去極度の標準偏差は宿広度の偏差の約1/5であり推定の確度が高いことがわかる。また広宿度の標準偏差からは、残差が大きくなれば推定中心年が実際の測定年より大きくはずれてしまい推定に使えないことを示している。したがって去極度による推定が重要となる。

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

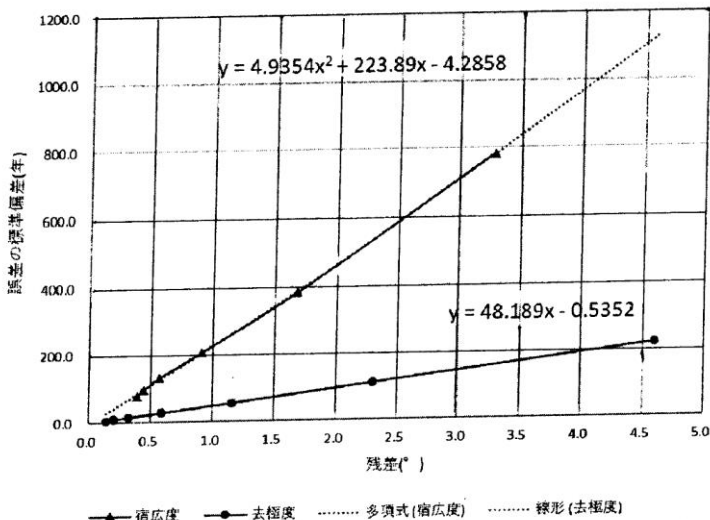


図1 28宿距星による残差と推定年誤差の標準偏差のシミュレーション結果

表2に標本数（観測星数）を増加した場合のシミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは星表（SKY2000）の中から中緯度までの明るい星1600個を抽出し赤経順の星表を作り用いた。たとえば観測星数100個の場合は星表から16個おきを選ぶ方法をとった。

表2 標本数を増加した場合の推定年誤差の標準偏差の変化

赤緯（観測誤差±2度，観測値：0.5度単位）			
観測星数（n）	観測誤差（°）	残差（。）（°）	標準偏差（年）
28	2.0	1.1582	59.4
100	2.0	1.1622	30.7
200	2.0	1.1627	21.4
400	2.0	1.1631	15.2
800	2.0	1.1634	10.6

表2により28星とn星の標準偏差の違いは標準偏差の計算の母数の違いによることがわかる。たとえば400個では、残差が違うので結果は若干違うが、28個の結果をもとに、
 標準偏差 = $59.4 \times \sqrt{(28-1) / (n-1)} = 59.4 \times \sqrt{(28-1) / (400-1)} = 15.5 \text{年} \dots \dots (8)$
 と計算できる。28距星の90%の信頼区間は標準偏差の約1/3なので、表2の200個の標本を使い標準偏差で表示した場合と同じということもできる。また表2のn=28の標準偏差59.4年を表1と比較すると、表1の距星の場合は同条件（観測誤差±2度）で標準偏差年が55.6年となっており若干小さい。これは距星が赤道付近に分布しているためと考えられる。

従って (6) 式を距星以外に使用する場合はその割合を考慮し1.07倍する必要がある。

以上のシミュレーション結果をもとに3.1項の『格子月進図』の結果を検証する。

① 28宿距星の場合 epoch:319±58年 定数項 :1.45° ±0.23° 平均誤差:1.22°

② 163星の場合 epoch:481±38年 定数項 :2.04° ±0.15° 平均誤差:1.84°

まず28宿距星は平均誤差が1.22° なので標準偏差を計算すると (7) 式より、

$$28宿距星 = 48.2 \times 1.22 - 0.5 = 58.3年 (片側)$$

163星は平均誤差が1.84° なので標準偏差を計算すると、

$$163星 = (48.2 \times 1.84 - 0.5) \times \text{root}((28-1)/(163-1)) \times 1.07 = 38.5年 (片側)$$

となり、『格子月進図』の結果は標準偏差でばらつきの幅を表示していたことがわかる。

以上で去極度(赤緯)の推定年誤差の標準偏差についてはシミュレーションの結果が過去の計算事例と一致することが検証できた。

7. 実際の星図の検証

7.1 渋川春海の星図の検証

渋川春海は中国星座の星の観測を貞享元年(1684)から京都において行い、その後江戸に移り春海独自の星座の星の観測を行なったとされる。春海は元禄11年(1698)の著作『天文瓊統』に星表と星図を載せている^{注11)}。ここではその星表の28宿距星の観測年代を検証する。表3に考察の対象とする渋川春海の貞享暦の宿広度、『天文瓊統』星表の去極度、授時暦の宿広度、元朝の星表(『三垣列舍入宿去極集』)の去極度及びその計算結果を示す^{注12)}。

この計算結果により宿広度による推定年代は1279±8.7年 [90%信頼区間]となる。この結果は中村士(2015②) p.24が指摘しているように、貞享暦の宿広度については授時暦の値に非常に近い。授時暦の宿広度と比較すると、同値が9個、±0.05～±0.1度の差が15個、±0.15～±0.2度の差が4個となるが、この差の分布は400年を隔てた独立の観測では起こりえず、渋川春海が授時暦の値を基準として観測したと推定できる。渋川春海は貞享暦の赤道宿度の注記に小渾天儀で観測したことを記述している。『天文瓊統』星表の表示単位も一部を除き0.5度であり、0.5度以下の識別は小型の渾天儀では困難だったと考えられる。それは平井正則/西村紀彦(2004) p.42では『天文瓊統』星表の赤経方向の観測誤差を距星の±0.31°に対し星表全数では±1.16°としており、渋川春海の観測環境では全般的に約1°の観測誤差があったことから分かる。

授時暦の宿広度の残差は0.1度以下であり高い測定技術があったことがうかがえる。授時暦を編纂した郭守敬が元朝の世祖から暦法の修訂を命じられた年の至元13年(1276年)も

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

90%区間推定に入っている。

春海の去極度については標準偏差で考えても 1654 ± 19.4 年 [標準偏差] で1684年に届かない。奎宿距星の誤差が大きく去極度を70度から69度に変更しても推定年は 1666.5 ± 16.4 年 [標準偏差, 残差 0.35° , 定数項 0.22°] となり1684年にぎりぎり届かない。推定年がずれている可能性としては1674年に清で南懷仁の『新製靈台儀象志』が完成しておりこれに基づいた値を参考に観測したことも考えられる^{注13)}。

最後に表3右端の元星表は郭守敬の測定ともされているが計算結果からは元朝末の測定であることが確実である。同定した星表全体 (733星) の去極度の計算からも推定年は 1357 ± 5.6 年 [標準偏差, 残差 0.5764° , 定数項 -0.1°] となる。

表3 洪川春海と授時暦/元星表の距星の位置 (中国度) と計算結果

宿名	HR	距星	洪川春海		授時暦	元星表
			宿広度	去極度	宿広度	去極度
角	5056	67 α Vir	12.00	101.0	12.10	99.2
亢	5315	98 κ Vir	9.30	100.0	9.20	98.7
氏	5531	9 α^2 Lib	16.30	106.5	16.30	104.5
房	5944	6 π Sco	5.70	117.0	5.60	115.6
心	6084	20 σ Sco	6.50	116.5	6.50	115.3
尾	6247	μ^1 Sco	19.00	130.0	19.10	128.2
箕	6746	10 γ^2 Sgr	10.40	122.5	10.40	121.6
斗	7039	27 ϕ Sgr	25.00	119.5	25.20	118.9
牛	7776	9 β Cap	7.30	108.0	7.20	108.0
女	7950	2 ϵ Aqr	11.30	102.5	11.35	103.0
虚	8232	22 β Aqr	8.95	98.5	8.95	99.7
危	8414	34 α Aqr	15.50	93.5	15.40	94.5
室	8781	54 α Peg	17.20	78.0	17.10	79.3
壁	39	88 γ Peg	8.50	77.5	8.60	79.6
奎	215	34 ζ And	16.70	70.0	16.60	69.9
婁	553	6 β Ari	11.80	72.5	11.80	73.4
胃	801	35 Ari	15.50	65.5	15.60	66.1
昴	1142	17(b) Tau	11.30	68.0	11.30	69.1
畢	1409	74 ϵ Tau	17.30	72.0	17.40	73.5
觜	1876	37 ϕ^1 Ori	0.20	82.0	0.05	82.5
參	1852	34 δ Ori	11.00	92.0*	11.10	92.3
井	2286	13 μ Gem	33.50	68.0	33.30	68.4
鬼	3357	31 θ Cnc	2.00	72.5	2.20	71.0
柳	3410	4 δ Hya	13.30	84.5*	13.30	83.3
星	3748	30 α Hya	6.30	99.0	6.30	97.5
張	3903	39 ν^1 Hya	17.30	105.0	17.25	103.5

翼	4287	7α Crt	18.80	108.0	18.75	106.5
軫	4662	4γ Crv	17.30	108.0*	17.30	105.5
		中心年	1279	1654	1272	1363
		偏差	28.1	19.4	15.3	6.0
		90%区間	8.7	6.0	4.8	1.9
		残差	0.1443	0.4128	0.0875	0.1353
		定数項	—	0.27	—	-0.07

注：*印は距星名に同定される星表の値を使っているため中村士（2015②）表2の値と違う。

HR番号は「The Harvard Revised Photometry Catalogue」の星表番号、現在は「Bright Star Catalogue」の星表番号として参照される。

7.2 宋代の星図の検証

ここでは中国宋代の2つの星図、蘇頌が作成した『新儀象法要』所収の星図である『蘇頌星図』と黄裳が作成した星図をもとに王致遠が石刻した星図である『淳祐石刻天文図』（以下『淳祐図』と略す）に描かれた28宿距星の測定年代を推定する。いずれの星図も藪内清（1990）p.125-26では元豊年間（1078～85）の観測を基礎にして描かれたとする。表4に宋代の星図の距星の位置（西洋度）と計算結果を示す^{注14}。

まず『蘇頌星図』の距星の値は赤緯方向が比較的正確に読み取れる方形図から読み取った。しかし赤経方向には大きな歪があるので宿広度にはもともとなった星表の情報が残っていない。南北半球図より読み込む方法も考えられるが、ここでは星図のもともとなった方形図に記載されている宿広度で計算した。この宿広度は7.3項で元豊（1080年頃）の観測とされる値と虚宿に加えてある0.25度を除き同じである。赤緯については残差が 3.1034° と大きい为中心年が1087年で元豊年間が中央で重なっている。

『淳祐図』の結果はともに元豊年間（1078～85）を含んでいるが、やはり赤緯の推定が的確である。残差は星図作成時の書き込み誤差や拓本撮影時の平面度によるところも大きい。

表4 宋代の星図の距星の位置(西洋度)と計算結果

宿名	HR	距星	蘇頌星図		淳祐図	
			宿広度*	赤緯	宿広度	赤緯
角	5056	67α Vir	12.0	-6.73	12.11	-6.69
亢	5315	98κ Vir	9.0	-6.28	9.46	-6.69
氏	5531	$9\alpha^2$ Lib	16.0	-10.48	15.22	-12.84
房	5944	6π Sco	6.0	-18.25	6.96	-22.42
心	6084	20σ Sco	6.0	-21.42	5.06	-23.39
尾	6247	μ^1 Sco	19.0	-36.82	20.39	-37.06

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

箕	6746	$10\gamma^2$ Sgr	11.0	-28.99	10.44	-29.81
斗	7039	27ϕ Sgr	25.0	-22.13	26.12	-27.74
牛	7776	9β Cap	7.0	-10.42	5.05	-20.85
女	7950	2ϵ Aqr	11.0	-11.26	11.58	-10.14
虚	8232	22β Aqr	9.25	-6.41	9.84	-5.50
危	8414	34α Aqr	16.0	-8.41	10.02	3.85
室	8781	54α Peg	17.0	14.17	20.82	10.60
壁	39	88γ Peg	9.0	10.16	13.10	9.45
奎	215	34ζ And	16.0	24.65	12.99	13.84
婁	553	6β Ari	12.0	22.45	12.26	17.09
胃	801	35 Ari	15.0	20.38	11.43	21.36
昴	1142	17 (b) Tau	11.0	20.12	11.78	19.48
畢	1409	74ϵ Tau	17.0	13.01	15.00	17.01
觜	1876	$37\phi^1$ Ori	1.0	10.48	1.71	7.09
参	1852	34δ Ori	10.0	0.06	10.45	-2.47
井	2286	13μ Gem	34.0	24.01	32.82	23.51
鬼	3357	31θ Cnc	2.0	27.31	0.75	22.88
柳	3410	4δ Hya	14.0	11.91	15.86	9.24
星	3748	30α Hya	7.0	-8.99	6.71	-6.37
張	3903	$39\nu^1$ Hya	17.0	-7.70	17.32	-10.99
翼	4287	7α Crt	19.0	-11.26	19.52	-12.93
軫	4662	4γ Crv	17.0	-10.29	15.23	-12.02
		中心年	947	1087	1018	1108 ₂
		偏差	95.2	149.1	501.7	114.9
		90%区間	29.5	46.2	155.5	35.6
		残差	0.4401	3.1034	2.1579	2.3941
		定数項	-	-1.63	-	0

注：*中国度

7.3 宋代の観測記録の検証

宋代には景祐（1030年頃）、皇祐（1050年頃）、元豊（1080年頃）、崇寧（1102年頃）の4回の観測が行われたとされ、藪内清（1936）ではそれぞれ観測記録について検証が行われている。

表5にそれぞれの観測における28宿距星の記録と計算結果を示す。記録については元豊を除き藪内清（1936）の表三から表五の値を参照した。元豊の記録は授時曆議【歷代天文律曆等志彙編・第九冊】p3322-3325を参照した。なお元豊、崇寧は宿広度のみ現存している。

表5の計算結果をみると皇祐、元豊、崇寧の観測は時代につれて観測精度が上がってきておりその時代に観測が行われたと思われる。しかし、景祐の観測は計算結果から明らか

にその年代で行われた観測値ではない。観測が行われたとしても、去極度の結果から唐の開元年間（713-741）に行われた観測結果を確認したにすぎないと思われる。また、宿広度についてはそれよりも古く370年ぐらいの観測値が宋の初めの頃にも参照されていたことになる。

藪内清（1936）の景祐の観測値は乾象通鑑第四卷p.35-42を参照しているが、宋史天文志[歴代天文律曆等志彙編・第三冊] p842-911で景祐測驗として引用されている値とほぼ同じである。宿広度については曆法上の0.25度を除き大衍曆（一行編纂）の宿広度と同じである。

表5 宋代の観測の記録と計算結果

宿名	HR	距星	景祐 (1030)		皇祐 (1050)		元豊 (1080)	崇寧 (1102)
			宿広度	去極度	宿広度	去極度	宿広度	宿広度
角	5056	67 α Vir	12.0	97.0	12.0	97.5	12.0	12.00
亢	5315	98 κ Vir	9.0	95.0	9.0	96.0	9.0	9.25
氏	5531	9 α^2 Lib	15.0	104.0	16.0	104.5	16.0	16.00
房	5944	6 π Sco	5.0	115.0	5.0	114.5	6.0	5.75
心	6084	20 σ Sco	5.0	114.0	6.0	114.5	6.0	6.25
尾	6247	μ^1 Sco	18.0	128.0	19.0	127.0	19.0	19.25
箕	6746	10 γ^2 Sgr	11.0	123.0	10.0	121.5	11.0	10.50
斗	7039	27 ϕ Sgr	26.0	122.0	25.0	119.0	25.0	25.00
牛	7776	9 β Cap	8.0	110.5	7.0	108.5	7.0	7.25
女	7950	2 ϵ Aqr	12.0	105.0	11.0	104.5	11.0	11.25
虚	8232	22 β Aqr	10.0	103.0	10.0	100.5	9.0	9.00
危	8414	34 α Aqr	17.0	98.0	16.0	96.0	16.0	15.50
室	8781	54 α Peg	16.0	85.0	17.0	80.5	17.0	17.00
壁	39	88 γ Peg	9.0	85.0	9.0	80.5	9.0	8.75
奎	215	34 ζ And	16.0	76.0	16.0	72.0	16.0	16.50
婁	553	6 β Ari	12.0	80.0	12.0	75.5	12.0	12.00
胃	801	35 Ari	14.0	69.0	15.0	67.5	15.0	15.00
昴	1142	17 (b) Tau	11.0	71.0	11.0	70.0	11.0	11.25
畢	1409	74 ϵ Tau	17.0	77.0	18.0	75.0	17.0	17.25
觜	1876	37 ϕ^1 Ori	1.0	84.0	1.0	82.5	1.0	0.50
參	1852	34 δ Ori	10.0	94.0	10.0	92.5	10.0	10.50
井	2286	13 μ Gem	33.0	69.0	34.0	69.0	34.0	33.25
鬼	3357	31 θ Cnc	3.0	68.0	2.0	69.5	2.0	2.50
柳	3410	4 δ Hya	15.0	83.0	14.0	82.5	14.0	13.75
星	3748	30 α Hya	7.0	97.0	7.0	96.0	7.0	6.75
張	3903	39 ν^1 Hya	18.0	103.0	18.0	102.5	17.0	17.25
翼	4287	7 α Crv	18.0	104.0	18.0	104.0	19.0	18.75
軫	4662	4 γ Crv	17.0	101.0	17.0	103.5	17.0	17.00
		中心年	370	707	864	1048	952	1079

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

	標準偏差	135.6	55.6	107.3	22.3	95.2	42.8
	90%区間	42.0	17.2	33.3	6.9	29.5	13.3
	残差	0.6167	1.1646	0.4933	0.4727	0.4403	0.2093
	定数項	—	1.05	—	-0.13	—	—

注：藪内清（1936）と同じく、宿広度は虚宿に暦法上の0.25度加えず365度で計算した。

7.4 『格子月進図』の検証

『格子月進図』には、その名にあるように1度間隔の格子があるために星表の情報をそのまま書き込むことができる。表6の計算結果では残差も少ない。使われた星表の観測の推定年代は去極度の推定から 417 ± 18 年[90%信頼区間]となる。3.1項の推定値 319 ± 58 年[標準偏差]と中心年が食い違うのは去極度の読み取り方の違いと同定違いの星がいくつかあるためである^{注15)}。宿広度については大崎正次（1985）p.268で指摘のように距星が宿経線を避けて描かれているので、星図からの読み取り値ではなく、星図の枠外に書かれている度区切りの宿広度の値を使用した。筆者が行った『格子月進図』の暫定の同定星表を使い中緯度までの星1346星を使った推定でも 397 ± 22.7 年[標準偏差, 残差 3.1233° , 定数項 -1.36°]となり、上記の28宿距星による推定とも重なる。したがって、400年頃の観測星表により『格子月進図』の原因が作成されたことはこの最小二乗法による検証から確実である。

渡辺敏夫（1987）p.762では、『格子月進図』の製作年代を一行の大衍暦の宿広度などと比較し、720年以降と推定したがそれが誤りだったことは明らかである。この誤りの原因は表6の大衍暦の宿広度の推定年代が、従来考えられていた開元年間より300年以上も古い370年頃の観測と同等であることにもよる。一行も、渋川春海のように400年頃の星表を参考に観測を行い、このような結果になった可能性がある^{注16)}。

表6の『格子月進図』と『大衍暦』の値は大変近く、「箕宿」「昴宿」「井宿」は全く同じ値、虚宿も0.25を虚宿に加えなければ同じである。また「室宿」も去極度が0.25度違うだけで読み取り方によっては同じである。28個の距星でこれだけ多く値が一致するのは同じ星表を使っていた可能性が高いためと考えられる。7.3項の景祐（1030）の観測値を考慮すると、一行の観測値とされる去極度が、一行が参照した値である可能性も残る。

表6 「格子月進図」距星の位置と計算結果

宿名	HR	距星	筆者読み取り値			大崎	差	大衍曆(一行観測)	
			宿広度	去極度	赤緯(A)	(B)	(A-B)	宿広度	去極度
角	5056	67 α Vir	12.0	93.00	-1.5	-1.0	-0.5	12.0	93.5
亢	5315	98 κ Vir	9.00	90.50	1.0	0.4	0.6	9.0	91.5
氏	5531	9 α^2 Lib	16.00	97.25	-5.7	-5.3	-0.4	15.0	98.0
房	5944	6 π Sco	5.00	109.00	-17.2	-16.8	-0.4	5.0	110.5
心	6084	20 σ Sco	5.00	110.00	-18.2	-17.7	-0.5	5.0	111.0
尾	6247	μ^1 Sco	18.00	123.00	-31.0	-30.4	-0.6	18.0	124.0
箕	6746	10 γ^2 Sgr	11.00	120.00	-28.0	-28.1	0.1	11.0	120.0
斗	7039	27 ϕ Sgr	26.00	117.00	-25.1	-24.6	-0.5	26.0	119.0
牛	7776	9 β Cap	8.00	108.75	-17.0	-16.8	-0.2	8.0	104.0
女	7950	2 ϵ Aqr	12.00	105.50	-13.8	-13.3	-0.5	12.0	101.0
虚	8232	22 β Aqr	10.00	101.00	-9.3	-8.9	-0.4	10.25**	101.0
危	8414	34 α Aqr	17.00	98.50	-6.9	-6.4	-0.5	17.0	97.0
室	8781	54 α Peg	16.00	83.25	8.1	7.7	0.4	16.0	83.0
壁	39	88 γ Peg	9.00	82.75	8.6	8.4	0.2	9.0	84.0
奎	215	34 ζ And	16.00	71.25	19.9	18.7	1.2	16.0	73.0
婁	553	6 β Ari	12.00	76.00	15.2	12.8	2.4*	12.0	77.0
胃	801	35 Ari	14.00	71.00	20.2	19.7	0.5	14.0	-
昂	1142	17 (b) Tau	11.00	72.00	19.2	18.7	0.5	11.0	72.0
畢	1409	74 ϵ Tau	16.00	75.00	16.2	15.8	0.4	17.0	76.0
觜	1876	37 ϕ^1 Ori	1.00	83.00	8.4	7.9	0.5	1.0	82.0
參	1852	34 δ Ori	10.00	92.50	-1.0	-0.5	-0.5	10.0	92.0
井	2286	13 μ Gem	33.00	68.00	23.1	19.7	3.4*	33.0	68.0
鬼	3357	31 θ Cnc	3.00	67.00	24.1	23.2	0.9	3.0	68.0
柳	3410	4 δ Hya	15.00	81.00	10.3	9.9	0.4	15.0	80.5
星	3748	30 α Hya	7.00	95.00	-3.4	-1.0	-2.4*	7.0	93.5
張	3903	39 ν^1 Hya	19.00	100.75	-9.1	-8.4	-0.7	18.0	100.0
翼	4287	7 α Crt	18.00	101.00	-9.3	-8.9	-0.4	18.0	103.0
軫	4662	4 γ Crv	17.00	98.00	-6.4	-7.2	0.8	17.0	100.0
		中心年	464	417				363	512
		標準偏差	168.5	57.7				138.5	39.0
		90%区間	52.2	17.9				42.9	12.3
		残差	0.7592	1.207				0.6293	0.8041
		定数項	-	-1.58				-	-1.12

注：*印は距星の同定の違い。**曆法上の0.25度が加わっている。

7.5 『キトラ天文図』の検証

3.2項の事例では主に2004年のデータにより検証が行われていたが、本稿の検証では奈良文化研究所（20016）PL.3の復元トレース図からデータを読み取り行った。前者の研究では25星の距星で行っていたが、残りの3星についても「カ」と疑問符がついてはいるが、同定された星座の星を使用して28星すべてを使い行った。表7に解析に使用したデータと中村士（2015①）のデータ及びその計算結果を示す^{注17)}。

表7左の欄の筆者の読み込み値による計算結果では推定中心年が宿広度では-732年、赤緯では549年となった。赤経方向の誤差が小さいのは、赤経方向は28宿で分けてあるため変動の余地が小さいが、赤緯方向は星座絵が2~3倍に拡大されているためである。しかし、観測誤差で考えると5度以上あることになり宿広度の推定年は意味をもたない。また赤緯の推定も25星の場合よりも古代になってはいるが残差も大きく、値を大幅に修正した結果なのでこれも信頼できない。

『キトラ天文図』は星図をモデルとして描かれたデザイン画なので、そのデザイン画からもとの星表の年代を復元するのが不可能なのは当然の結果とも言える。このような場合に、特定の年代で誤差の大きい星を排除しても正しい結果が得られる保証はない。最小二乗法は正規分布の誤差を前提とした解を得る方法なので、正規分布ではない大きな誤差を含む『キトラ天文図』からもとの星表の観測年代を推定は出来ないというのが結論である。

表7 『キトラ天文図』距星の位置(西洋度)と計算結果

宿名	HR	距星	筆者読み取り		値中村士 (2015①) 表1		赤緯差 (A-B)
			宿広度	赤緯 (A)	宿広度	赤緯 (B)	
角	5056	67 α Vir	11.3	-1.3	11.0	-2.2	0.9
亢	5315	98 κ Vir	8.7	6.4	9.0	5.4	1.0
氏	5531	9 α ² Lib	15.1	-4.9	15.0	-5.5	0.6
房	5944	6 π Sco	6.7	-13.5	6.8	-14.3	0.8
心	6084	20 σ Sco	8.2	-21.3	7.8	-22.2	0.9
尾	6247	μ ¹ Sco	18.8	-35.9	19.1	-36.3	0.4
箕	6746	10 γ ² Sgr	13.1	-26.5	12.9	-27.4	0.9
斗	7039	27 ϕ Sgr	27.0	-28.3	54.4	-29.5	1.2
牛	7776	9 β Cap	7.7	-14.4	-	-	-
女	7950	2 ϵ Aqr	10.8	-18.6	-	-	-
虚	8232	22 β Aqr	9.0	-11.0	-	-	-
危	8414	34 α Aqr	16.5	-7.5	16.1	-8.1	0.6
室	8781	54 α Peg	16.2	6.5	16.1	6.4	0.1
壁	39	88 γ Peg	9.4	8.3	5.1	8.3	0.0
奎	215	34 ζ And	11.7	14.5	19.8	22.7	-8.2
婁	553	6 β Ari	11.6	13.0	7.9	18.6	-5.6

胃	801	35 Ari	11.5	16.3	11.9	16.9	-0.6
昂	1142	17 (b) Tau	16.4	20.6	15.7	28.3	-7.7
畢	1409	74 ε Tau	16.8	21.9	17.2	21.7	0.2
觜	1876	37 φ ¹ Ori	1.9	23.0	1.9	22.3	0.7
參	1852	34 δ Ori	7.9	-4.4	8.0	-4.6	0.2
井	2286	13 μ Gem	30.3	26.0	29.6	25.2	0.8
鬼	3357	31 θ Cnc	4.0	27.1	4.3	26.3	0.8
柳	3410	4 δ Hya	16.1	13.3	16.1	12.3	1.0
星	3748	30 α Hya	10.2	-1.3	10.3	3.5	-4.8
張	3903	39 υ ¹ Hya	22.8	-4.2	23.4	-4.6	0.4
翼	4287	7 α Crt	11.9	-18.7	11.9	-19.1	0.4
軫	4662	4 γ Crv	8.3	-23.5	8.7	-24.4	0.9
		中心年	-732	549	-286	871	-
		標準偏差	708.7	268.4	821.0	303.9	-
		90%区間	219.7	83.2	269.3	99.7	-
		残差	2.9891	5.5791	3.2457	5.9538	-
		定数項	-	-1.24	-	-2.07	-

7.6 「天象図」の検証

『天象図』は原図の拓本をもとに再刻された石刻星図なので、推定する年代は原図に使われた星表の観測年代となる。『天象図』は星図上で距星の取り違いがあり、これまでは星図とともに1395年に彫られた碑文にある宿度と去極度による検証が行われてきた^{注18)}。その結果として星図は碑文のデータに値の近い前漢の時代（BC70年頃）に観測されたとする『開元占経』に記載されている『石氏星経』にもとづく推定されてきた。今回の検証ではその碑文と星図の両方の情報を比較検討する。星図では距星を取り違えているが、今回の検証では本来の距星に同定される星図上の星を選択し解析する。

表8に『天象図』距星の位置と計算結果を示す^{注19)}。距星は本来の距星を選択しているため、たとえば、2行目の亢宿の宿広度は碑文の値の約半分の4.6度となっている。表8の計算結果をみると、碑文の結果は宿広度からは51年と赤緯からは-45年ではは漢代で整合している。しかし、星図のデータからは宿広度からは漢代、赤緯からは400年代と数百年も年代が違う。赤緯の推定は宮島一彦（2014）p.60の結果に近い。6項のシミュレーション結果により残差が大きい場合宿広度による推定は確度が低い。したがって原図の情報が残っているのは赤緯方向と考えられ、星表の観測年代は472±57年 [90%区間] と推定される。

さらに28宿の星座に含まれる141星の去極度を使い計算したところ推定年代は415±106年 [標準偏差,残差4.6849°, 定数項-1.41°] となった。念のため、距星28星に中緯度の明る

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

い星33星を加えた61星の計算結果でも誤差は大きいが287±172年【標準偏差, 残差4.9910°, 定数項-1.39°】となり明らかに前漢の時代ではない。したがって『天象図』の原図もこれらの推定に含まれる400年頃に観測された星表にもとづいていた可能性が高い^{注20)}。

表8 「天象図」距星の位置と計算結

宿名	HR	距星	星図(西洋度)		碑文(中国度)	
			宿広度	赤緯	宿広度	去極度
角	5056	67 α Vir	11.35	-6.42	12.0	91.0
亢	5315	98 κ Vir	4.61	-5.46	9.0	89.0
氏	5531	9 α^2 Lib	19.15	-1.86	15.0	97.0
房	5944	6 π Sco	5.08	-13.36	5.0	108.0
心	6084	20 σ Sco	5.14	-13.95	5.0	108.0
尾	6247	μ^1 Sco	17.96	-29.98	18.0	120.0
箕	6746	10 γ^2 Sgr	10.77	-24.41	11.0	118.0
斗	7039	27 ϕ Sgr	26.27	-22.64	26.3	116.0
牛	7776	9 β Cap	7.44	-8.12	8.0	106.0
女	7950	2 ϵ Aqr	11.56	-11.81	12.0	106.0
虚	8232	22 β Aqr	10.08	-11.11	10.0	104.0
危	8414	34 α Aqr	16.93	-7.28	17.0	99.0
室	8781	54 α Peg	15.83	7.24	16.0	85.0
壁	39	88 γ Peg	8.67	6.86	9.0	86.0
奎	215	34 ζ And	15.52	17.88	16.0	77.0
婁	553	6 β Ari	11.68	13.70	12.0*	80.0
胃	801	35 Ari	16.38	19.28	14.0	72.0
昂	1142	17 (b) Tau	10.59	23.99	11.0	74.0
畢	1409	74 ϵ Tau	14.39	14.14	16.0	78.0
觜	1876	37 ϕ^1 Ori	1.86	9.76	2.0	84.0
參	1852	34 δ Ori	6.69	-4.21	9.0	94.0
井	2286	13 μ Gem	35.77	27.52	33.0	69.0
鬼	3357	31 θ Cnc	1.60	24.73	4.0	68.0
柳	3410	4 δ Hya	15.91	12.79	15.0	80.0
星	3748	30 α Hya	10.51	-1.85	7.0	91.0
張	3903	39 ν^1 Hya	17.56	-14.25	18.0	97.0
翼	4287	7 α Crt	13.67	-15.23	18.0	99.0
軫	4662	4 γ Crv	17.03	-7.80	17.0	98.0
		中心年	-18	472	52	-45
		偏差	459.9	182.8	146.4	44.7
		90%区間	142.5	56.7	45.4	13.9
		残差	1.9869	3.8033	0.6635	0.9383
		定数項	-	-1.82	-	-1.28

注：*渡辺敏夫(1987) p.771表12.6の13度は誤り

8. 最小二乗法による中国古代星図の評価のまとめ証

『格子月進図』については、これまで行われた緯度方向に加え赤経方向の推定も行い、400年頃観測された星表をもとに描かれたことが確実となった。また、『天象図』の原図を描いた星表の年代はこれまで1395年に刻まれた碑文により、漢代の『石氏星経』によるものとされてきたが、今回『天象図』の星図に描かれた28宿距星やその他の星の位置を用いた推定により、『格子月進図』と同じ400年頃観測された星表により描かれた可能性が高いことを明らかにできた。これにより、『キトラ天文図』の原図も同様に同じ星表をもとにしていると推定される。さらに、開元年間（720年頃）の観測と考えられていた大衍曆宿広度や宋代の観測とされる景祐（1030年頃）の観測値も、370年頃の観測値と同等と分かり、400年頃の星表が宋代初めまで影響していたことが数値的にも裏付けられた。

9. おわりに

最小二乗法による星図や星表の年代推定は、実際の観測年代を検証する確度の高いツールであることが確認できた。従来星図の製作年代の推定には星の位置による年代推定が重要視されてきたが、今回の考察により、中国では400年頃の星表が長い期間影響していたことが判明した。これにより唐代の星図の作成年代推定には、星の位置（星表）による年代推定は有効ではなく、その他の特徴（星座名、星座の形、星座の位置等）による推定が必要になった。

注

- 注1) 現代の天文学では星の経度を、春分点を0度として360度で表示するが、数字を扱いやすくするため、古代ギリシャ天文学では360度を30度毎に12宮に分けて表示した。同様に中国の古代天文学では赤道の一周を28宿の星座に分けて、それぞれに明るい距星（基準星）を決め、距星からの角度（入宿度）で星の経度（赤経）を表示した。この距星間の角度を28宿の宿広度と呼ぶ。距星から特定の星までの角度や宿広度は春分点からの角度と違い相対的な角度なので歳差の影響が少なく、中国では同じ星表が長期間使われた。なお中国では赤道一周を太陽の恒星に対する平均角速度（1度/日として）に合わせて恒星年の日数に対応する約365.25度としたので宿広度の合計も約365.25度となる。また緯度（赤緯）は北極を0度とし南方向の角度を去極度として表示した。
- 注2) 『格子月進図』は土御門家伝来の星図で文保元年（1317）ごろ安部泰世が所蔵の原図から筆写した。戦時中に公開されたが有楽町東日会館で展示中に空襲（1945）を受け焼失した。幸い焼失前に撮影された写真が残されており、佐々木英治（1984）の復元版も発行されている。『格子月進図』は通常中国度赤道一周365.25とは違い366度として描かれている。竹迫忍（2017）では『格子月進図』の原図は初唐の作成と推定した。
- 注3) 2項の固定誤差と同じ。
- 注4) 赤経方向の推定を最小二乗法で行っていないのは、中国の赤経表示システムを最小二乗法で評価する方法を確定できなかったのでは無いかと考える。また多数の星の入宿度から観測された推定年を推定する方法では推定誤差が拡大し確度は低くなるとも考えられる。本稿では赤経方向の評価は28宿距星の宿広度のみで行った。
- 注5) ブートストラップは、得られた標本から繰り返しを許してランダムに標本を再抽出し、母数の確率分布や誤差を推定する方法である。したがって、ブートストラップによる母数の推定が正しければ、本稿で行うランダムな観測誤差によるシミュレーションと結果が一致するはずである。またブートストラップは得られた標本からその都度擬似標本をつくりシミュレーションすることが前提だが、正規分布で想定される標本を作成し実行すればその定義により本稿のシミュレーションと同じ結果になると推定される。ブートストラップの概略については岡本雅典他（2012）p.171-75を参照。
- 注6) 中村士（2015②）では『キトラ天文図』に加え、『天象列次分野之図』、『アルマゲスト』の星表、呉越国墳墓、渋川春海の28宿の観測結果などを同じ手法で解析している。
- 注7) 李氏朝鮮の初期（1395）に作成された石刻星図。『天象図』はその碑文より、高句麗末期（668）に戦乱により川に沈められた石刻天文図の印本（拓本）が李氏朝鮮の初めに見つかり、その原図をもとに洪武28年（1395）に再刻されたものとされる。
- 注8) たとえば北川敏夫/稲葉三郎（1950）p.133「(2) 母分散 σ^2 の値が知られている正規母集団の母平均 μ の区間推定」を参照。
- 注9) シミュレーションの手順は以下とした。
- 1) 測定年 $year_0 = -100$ 年において歳差を考慮した28宿距星の精確な値を計算する。
 - 2) 最大値一定（例えば $\pm 1^\circ$ ）のランダムな誤差を1)に加える。（疑似測定値）
 - 3) 測定年 $year_0$ から数百年前の年 $year_m$ で28宿距星の精確な値を計算する。

- 4) 2) で設定した疑似測定値との差をもとめる。
- 5) 4) の差の二乗和が最低値でなければyearmに1年を加えて3) に戻り繰り返す。
- 6) 4) の差が最低値であればその年を推定年とし、観測年との誤差 (yearm-year0) と残差を記録する。
- 7) 1) に戻り次の標本の計算を500回繰り返す。
- 8) 500回終われば、あらかじめ加算しておいた誤差の二乗和から標準偏差をもとめる。また残差の平均も求める。
- 9) year0に100年を加えて1900年でなければ1) に戻る。
- 10) year0が1900年なら終了し100年毎の偏差と残差の平均をもとめる。

これにより500回の誤差の標準偏差と残差の平均の20回分の平均が計算できる。

以上のルーチンを測定誤差の最大値を変えてくりかえす。これである測定誤差における残差 (平均二乗誤差) と母集団の誤差の標準偏差 σ との関係を得ることができる。

- 注10) 中村士 (2015①②) では、一つの距星を固定しその距星からそれぞれの距星との差を求め計算しその誤差が最低になる推定年を求めた上で、次の距星に移動し同じ方法を繰り返し、28個の推定年の平均を求める方法で求めている。筆者も同様の方法でシミュレーションを行ってみたが推定年の誤差の標準偏差が宿広度 (隣接の距星との経度差) の場合より広がったのでこの方法はとらなかつた。
- 注11) 洪川春海が貞享年間に観測したとされる中国星座の星のうち中緯度までの1063星を同定し測定年代の計算を最小二乗法でおこなったところ推定年代は 1681.5 ± 6.8 年 [標準偏差, 残差 0.8390° , 定数項 -0.14°] となり貞享年間の観測が裏付けられた。また春海独自の星座の星について中緯度までの同定した250星で計算したところ推定年代は 1712.5 ± 14.5 年 [標準偏差, 残差 0.8614° , 定数項 -0.06°] となり『天文瓊統』の元禄11年 (1998) を含む結果となった。
- 注12) 洪川春海の宿広度は「貞享暦」近世歴史資料集成第3期 第8巻 日本科学技術古典籍資料/天文學篇 [1] (2001) p.82を参照。去極度は渡辺敏夫 (1963) の星表を参照。授時暦宿広度は中華書局編集部編「授時暦」歴代天文律曆等志彙編・第九冊, 中華書局 (1976) p.3379を参照。元星表 (『三垣列舍入宿去極集』) は潘鼎 (1989) p.237を参照。
- 注13) 貞享暦や『天文瓊統』本文では觜宿の宿広度が20分とある (參宿距星 (δ Ori) が觜宿距星 (ψ^1 Ori) の20分東)。しかし『天文瓊統』の星図では參宿距星 (δ Ori) が觜宿距星 (ψ^1 Ori) より西にあり、貞享暦と違い、実際の星空と合致している。したがって『天文瓊統』(1698) の時点では何らかの文献により貞享暦の觜宿の宿広度が間違っていることを知っていたことになる。そのため内閣文庫本『天文瓊統』の星表では參宿距星 [δ Ori] に距星の表示[距]を付けず [觜同度] として距星の特定を避けている。渡辺敏夫 (1963) p.33では [ϵ Ori] を距星としているが同本『天文瓊統』星表の [ϵ Ori] には去極度の記載さえない。なお『新製靈台儀象志』星表 (巻12及び巻13) のなかで距星28星と同定される星を用いて計算すると『新製靈台儀象志』星表の観測推定年は 1663.5 ± 2.5 年 [90%信頼区間, 残誤差 0.1723° , 定数項 -0.13°] となる。
- 注14) 『蘇頌星図』は大崎正次 (1985) p.232-34を参照。『淳祐図』は奈良文化財研究所 (2016)

PL.6を参照。星図はCRT上に約1500ピクセル四方で星図写真を広げマウスで星の中心をクリックする方法で位置を読み取っている。したがって円図の場合、1°当たり約4ピクセルあり読み取り誤差の影響は少ないと思われる。

- 注15) 『格子月進図』の読み取りは国立天文台蔵の写真の複写図から行った。大崎の去極度の読み取り方は大崎正次(1985) p.268あるように、赤道から±0.5度の間隔を0度とし+0.5度線と-0.5度の線をともに去極度91度として読んでいる。これでは全周が $91 \times 4 = 364$ 度となり『格子月進図』が採用している全周366度と合わない。筆者は単純に赤道線を全周366°の1/4の91.5度として去極度を読んだ。この場合+0.5度の線は91度、-0.5度の線は92度となる。この読み方をする事で方形図の上辺は去極度35度、下辺は去極度148度となる。これは、緯度が35度(全周366度として)の場合の内規(この線より上は一年中地平線の上)と外規(この線より南は一年中地平線の下)の線と一致する。従って『格子月進図』の星表の観測値もしくは星図の作成地は北緯 $34.4^\circ (= 35 \times 360 / 366)$ の洛陽/長安付近となる。大衍曆宿広度は中華書局編集部編「大衍曆」歴代天文律曆等志彙編・第七冊、中華書局(1976) p.2225を参照。去極度は「舊唐書天文志」歴代天文律曆等志彙編・第三冊、中華書局(1976) p.660-62を参照。
- 注16) 藪内清(1936) p.63-65に開元年間の観測の検証がある。複数の去極度の記述がある距星もあるが表6はこの検証と同じ値を使用した。また「第6表唐開元年間の観測」(p.64)の中で奎宿の距星を[δ And]としているが、その表の赤経、去極度の値より距星名は[ζ And]の誤植である。渡辺敏夫(1987) p.754の距星表などに引用されているので注意が必要。
- 注17) 中村士(2015①)表1の距星の赤緯と大きく違うのは、奎、婁、昴、星宿の値で、奎宿については距星ζと同定される星の値(最南の星から3番目)をとり、他の3宿については誤差を抑えるという観点から星宿のなかで古代において実際の距星に近い星である、婁宿と昴宿については最南端の星、星宿については最北の星から4番目の星を選択した。
- 注18) たとえば渡辺敏夫(1987) p.769-72。
- 注19) 『天象図』の値は奈良文化財研究所(2016) PL.7の再刻版を参照した。碑文の値については千葉市立郷土博物館(2002) p.19を参照した。『天象図』の星図の内外規と赤道の関係から計算すると、作成地は内規からは平均 37.7° でソウルとなる。しかし、外規では平均 33.1° となり、『格子月進図』と同じく洛陽/長安近辺で『天象図』の原図の作成地を示すと考える。竹迫忍(2017)では『天象図』の原図は晩唐の作成と推定した。
- 注20) 『天象図』の星図の宿広度による推定年の結果が碑文による推定年に近いのは『天象図』が碑文の宿広度により描き直されているのが原因とも考えられる。

参考文献

- 岡本雅典/鈴木義一郎/杉山高一/兵頭昌「新版 基本統計学」実教出版(2012)
- 大崎正次 「格子月進図」についての調査報告(大崎正次(1987)に収録)
「中国の星座の歴史」雄山閣出版(1987)
- 北川敏男/稲葉三男 「基礎数学 統計学通論」共立出版(株)(1960)
- 国立天文台蔵 「格子月進図」(貴重資料・広瀬秀雄文庫0100)

論 説

- 齊藤国治 「古天文学」恒星社厚生閣（1989）
- 佐々木英治 「格子月進図」佐々木英治（自費出版，1984），国会図書館蔵
- 洪川春海 「天文瓊統」国立公文書館蔵内閣文庫本（15巻本）（写本，WEB版）
「天文瓊統」国立天文台本（8巻本）（写本，WEB版）
「貞享曆」近世歴史資料集成3期8巻 日本科学技術古典籍資料／天文学篇
[1]（2001）
- 相馬充 「キトラ古墳天文図の観測年代と観測地の推定」国立天文台報，18
（2015）
- 竹迫忍 「古代星図の年代推定の研究」数学史研究228号（2017）
- 千葉市立郷土博物館 「星座の文化史」平成7年度特別展展示解説資料（1995）
「東西の天球儀」天文資料解説集 No.3（2002）
- 中村士 「キトラ古墳星図及び関連史料の成立年の数理的再検討」科学史研究，
275（2015①）
「東アジアの古星図・星表の成立年の数理的推定」東洋研究，197（2015②）
- 奈良文化財研究所 「キトラ古墳天文図 星座写真資料」奈良文化財研究所研究報告16（2016）
平井正則/西村紀彦 「Re-analysis of the first Japanese Star Catalogue appeared in "Tenmon Keito"」
福岡教育大学紀要 第3分冊 第53号（2004）
- 宮島一彦 「朝鮮・天象列次分野之図の諸問題」大阪市立科学館研究報告24（2014）
「日本の古星図と東アジアの天文学」京都大学 人文学報82（1999）
- 藪内清 「改訂増補 中国の天文曆法」平凡社（1990）
「宋代の星宿」東方学報 京都第七冊（1936）
- 渡辺敏夫 「保井春海星図考」東京商船大学研究報告 自然科学 14号（1963）
「近世日本天文学史〈下〉観測技術史」恒星社厚生閣（1987）
- 海外文献
- 中華書局編集部編 「授時曆」歴代天文律曆等志彙編・第九冊，中華書局（1976）
「大衍曆」歴代天文律曆等志彙編・第七冊，中華書局（1976）
「舊唐書天文志」歴代天文律曆等志彙編・第三冊，中華書局（1976）
「宋史天文志」歴代天文律曆等志彙編・第三冊，中華書局（1976）
- 北京圖書館古籍出版編輯組編 『『天文匯抄十一種』北京図書館古籍珍本叢刊78』書目文獻出版社（1988）
- 潘鼎 「中国古天文図録」上海科技教育出版社（2009）
「中国恒星観測史」学林出版社（1989）
- 孙小淳 「《天文匯抄》星表研究」（1996）（陳美東主編「中国古星図」遼寧教育出版
（1996）に収録）
- 南懷仁（清） 「新製靈台儀象志」早稲田大学図書館蔵（全14巻，pdf版）
- 李季（宋） 「乾象通鑑」（WEB版）
- J.Meus 「Astronomical Algorithms（2nd Ver.）」Willmann-Bell inc.（1998）
- Myers J.R.他 「SKY2000 Master Catalog, Version 5」（2006）

最小二乗法による中国古代星図の年代推定

R.W. Sinnott

〔NGC 2000.0〕 Sky Publishing (1988)

(2018年4月18日 受理)

(2018年7月14日 改訂稿受理)