天文文化研究会 (2016/9/3)

ケプラーの惑星運動の法則をめぐって

真貝寿明（大阪工業大）
hisaaki.shinkai@oit.ac.jp

ケプラーの惑星運動の法則はティコ・ブラーエによる天体観測データから得られた現象論的な法則である (1608, 1619 年)．ニュートンは，万有引力の存在を仮定することによってケプラーの法則を物理法則として説明した (1687 年)．日本が鎖国をしていたことと，イエズス会が地動説を認めなかったことが相乗して，これらの法則が日本に伝わるのには時間を要した．日本にニュートンの法則が伝えられたのは，志筑忠雄によって蘭語から訳された『暦象新書』(1798, 1802) とされる．ところが，1798 年に没した麻田剛立が日本においてケプラーの第 3 法則を独自に発見していた，という話が伝わっている．この真偽についての諸説を紹介する．

目 次

1　ケプラーの惑星運動の法則

近代物理学がどの時点ではじまったのかは諸説あるが，以下の 5 名の貢献は欠かすことができない．

- コペルニクス[1]（地動説の提唱，1543 年『天体の回転について』）
- ティコ・ブラーエ[2]（詳細な天体観測）
- ケプラー[3] (惑星運動の法則，1609 年『新天文学』，1618 年『宇宙の調和』)
- ガリレオ・ガリレイ[4] (慣性の法則，振り子の等時性，天体望遠鏡の発明など)
- ニュートン[5]（運動方程式，微分・積分，万有引力の法則）

ここでは，まず，ケプラーによる惑星運動の法則発見の経緯を紹介する．

もともとケプラーは，当時知られていた惑星の数が 6 つであることに理由付けを与えようとした．対称性が高く美しい形として，球の次に考えられるのは正多面体である．そこで，コペルニクスによって提唱された地動説と「プラトンの立体」を組み合わせた独自の太陽系モデルを考えていた（図 1）．正多面体には，正 4 面体（正三角形の面が 4 つで構成される三角錐），正 6 面体（立方体），正 8 面体，正 12 面体，正 20 面体の 5 種類のみが存在する．惑星が 6 つであるとすれば，その惑星間のすき間は 5 ヶ所であり，ケプラーは，惑星軌道は，軌道半径からつくられる球面間に，ちょうど 5 種類の正多面体を入れることで決まるのではないか，と考えた．つまり，一番外側の土星軌道を含む天球に内接するように正六面体を置き，その内側に内接する天球を考えるとそれは木星の軌道を含む球になる．次に木星の天球に内接する正四面体を考えるとその内側に接する火星の天球が得られる，という具合である．

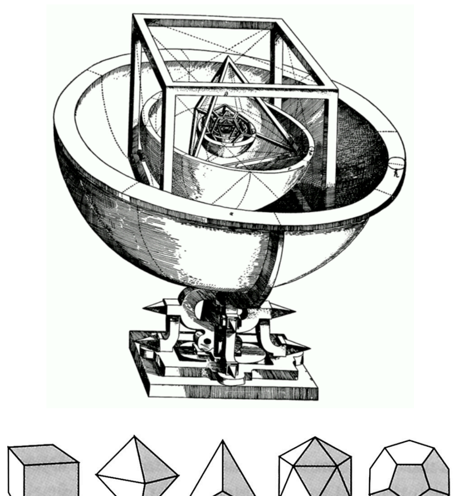

図 1: 『宇宙の神秘』(1596 年) に描かれたケプラーによる初期の多面体太陽系モデル

とても巧妙でおもしろいアイデアだが，これはまったくの偶然である．惑星の数が 6 つと考えたのは，当

[1]Nicolaus Copernicus (1473–1543)　尼古拉斯・哥白尼
[2]Tycho Brahe(1546-1601)　第谷・布拉赫
[3]Johannes Kepler (1571-1630) 刻白爾
[4]Galileo Galilei (1564-1642)　伽利略
[5]Isaac Newton (1642–1727) 牛頓

時まで発見されていた明るい惑星が 6 つだったからにすぎない．ケプラーは，しかし，この説を観測データで実証したいと考え，当時，最高精度の天体観測を行っていたティコのもとへ弟子入りをすることにした．1600 年のことである．

ティコは，突然訪ねてきたケプラーを快く思わなかった．せっかく積み重ねてきた観測データが，一族のもとから流出してしまうことを危惧したのだ．はじめにケプラーに渡されたデータは，ティコ自身も扱いに困っていた火星の観測データだったという [1]．他の惑星は円軌道で説明ができたのだが，火星はわずかにできなかった．厄介なデータだったのである．ところが，これが，歴史的な大発見へとつながることになる．

膨大な計算の結果，ケプラーは，火星の軌道は円ではなく，太陽を焦点の 1 つとする楕円であることを発見した．実はデータの揃っていた 5 惑星（水星を除く）の中で，離心率が一番大きい（円軌道から一番ずれている）のは火星だったのだ [6]．

ティコは，ケプラーが訪ねてきた翌年に急逝する．残されたデータを解析したケプラーは，自らが提案するプラトンの立体モデルと，ティコのデータが合致しないことを見いだした．ケプラーは悩んだ末，自分のモデルを捨て去ることにした．

ケプラーは，その後，惑星の動く速度が一定ではなく，楕円軌道の焦点からの扇形を用いた面積で決まっていることを発見し，『新天文学』(1609 年) を著して発表する．さらにその 10 年後には，惑星の公転周期と軌道長半径の関係についても法則を発見した（『世界の調和』(1619 年)）．これら 3 つをケプラーの惑星法則と呼ぶ．まとめると次のようになる．

ケプラーの惑星の運動についての 3 法則

第 1 法則：**楕円軌道の法則**
惑星は太陽を 1 つの焦点とする楕円軌道を描く．
第 2 法則：**面積速度一定の法則**
太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積（面積速度）は，惑星それぞれについて一定である．
第 3 法則：T^2/R^3 **一定の法則**
惑星の公転周期 T の 2 乗と，惑星の描く楕円の長軸半径（長軸の長さの半分）R の 3 乗の比 T^2/R^3 は，惑星によらず一定である．

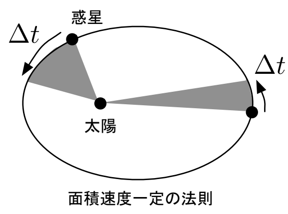

図 2: 面積速度一定の法則

万有引力の法則

ニュートンが万有引力の考えを，リンゴが目の前で落ちることから思いついた，というエピソードは有名である．ニュートンは，リンゴが何故いつも地球の中心に向かって落下するのかを考えはじめた．明らかに地球がリンゴを引っ張っているからであるが，あらゆる物質と物質の間には引力がはたらくと考えたらどうだろうか．地球は球形なので，全部の質量は中心に集まっていると考えてもよいだろう．だから，リンゴは地球の中心に向かって落下する．物質と物質の間に引力がはたらくならば，リンゴも地球を引っ張っているはずだが，あまりに質量が違うために地球に落ちてゆくように見えているのではないか．こうして得られた仮説が，次の万有引力の法則である．

万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき，両質点に働く力 F は，大きさが

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{1.1}$$

で常に引力である．G は定数であり，万有引力定数と呼ぶ．

(1.1) の力の大きさが，2 つの物質の距離の 2 乗に反比例する，という部分は当初は仮定だった．しかし，この万有引力（あるいは重力）の仮定をすると，天体の運動が計算でき，ケプラーの惑星運動の法則が「導ける」ことが判明したのである．すなわち，万有引力で引き合う物体は楕円や双曲線・放物線などの 2 次曲線軌道を描いて進むのが普通であり，円運動はその特殊な状況にすぎないこと，面積速度一定の法則は角運動量保存の法則の言い換えであること，そして，束縛された楕円運動軌道ではケプラーの第 3 法則が必ず成り立つことである．導出については，添付した資料（[2]，第 6 章）をご参照いただきたい．

[6] 離心率はどれだけ円軌道からずれているかを示す．長半径を a，短半径を b とすると，離心率 e は，$e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$．円ならば $e = 0$ となる．火星軌道の離心率は 0.09，地球は 0.02 である．

2　西洋科学の中国・日本への伝来

中国経由の伝来

コペルニクスが『天体の回転について』を出版したのは1543年である．同年，種子島に鉄砲が伝来し，49年にはザビエルが日本で布教をはじめた．すでに大航海時代がはじまり，ヨーロッパの文明はキリスト教の布教とともに，世界各地へ伝わり始めた頃である．だが，宇宙観に関わることは宗教上の解釈も絡んでなかなかすぐには伝えられなかったようだ．

ガリレイの裁判にみられるように，キリスト教は地動説の解釈を認めなかった．そのため，イエズス会の宣教師たちは，天動説を頑なに守りながら，最新の天文観測データを日本と中国に伝えることになった [3, 4]．日本や中国では，暦を正確に作ることが政権を握った者の役目であったため，天動説であったとしても惑星の運行や日食・月食の予報が正確にできればそれで問題とはならなかった．

ケプラーの惑星運動の法則が，ニュートンの万有引力によって解明されたのは1687年だが，中国で紹介されている西洋天文学の書『崇禎暦書』(1620頃)『暦算全書』(1630頃)『西洋新法暦書』(1645)『天経或問』(1675)『暦象考成』(1723) では，いずれもプトレマイオスの周天円による説明か，ティコが信じていた「地球のまわりを太陽が周回し，惑星は太陽を周回する」という地動説の一歩手前の説が載っている（図3）．将軍徳川吉宗によって禁書令が緩められたのち，これらを唯一の天文書として研究してきた江戸の天文方も同様の知識で止まっていた．

江戸時代には，1685年に渋川春海[7]によって初めて日本独自の暦（貞享暦ていきょうれき）が採用された．その後，吉宗によって最新の天文学を導入した改暦が命じられるが，それが実現されるのは，やや中途半端な1755年の宝暦暦（ほうりゃくれき）を経て，1797年の寛政暦まで待たなければならない．ただし，寛政暦をつくるときには，ケプラーによる楕円軌道・不等速運動説（地動説含まず）を紹介した中国書『暦象考成後編』(1742) が入手できていたが，まだ天動説を採っている．

蘭学書経由の伝来

18世紀末には，西洋の物理学・天文学がオランダ語に翻訳された本（W.J.Blaeu 著 (1666)，G.Adams 著 J. Ploos 蘭訳 (1770)，J.Keill 著 J. Lulofs 蘭訳 (1741)，de Lalande 著 Strabbe 蘭訳 (1773)）が，蘭学者・本木良永[8]（『天地二球用法』(1774)）や高橋至時[9]（『ラランデ暦書管見』(1804)），志筑忠雄[10]（『暦象新書』(1802)）によって邦訳されはじめる．特に，志筑によって，内容が理解された上で物理学が紹介されるにおよび，地動説にもとづいた暦が天保暦 (1844年) として使われることになった．

一般向けには，司馬江漢[11]による『刻白爾（こっぺる）天文図解』(1808) で地動説が紹介された．（刻白爾はケプラーを指す中国名だが，司馬江漢はコペルニクスと間違えて紹介している）．

図4にこれらの受容過程を記す．

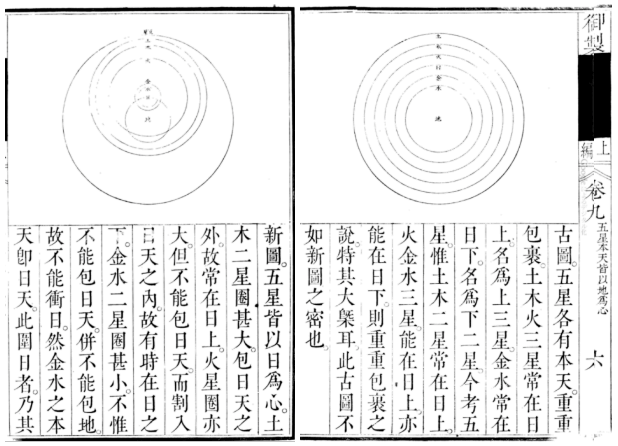
御製
曆象考成上編　卷九　五星本天皆以地為心　六
古圖五星各有本天重重包裹土木火三星常在日上名爲上三星金水常在日下名爲下二星今考五星惟土木二星常在日上火金水三星能在日上亦能在日下則重重包裹之說特其大槩耳此古圖不如新圖之密也
新圖五星皆以日爲心土木二星圈甚大包日天之外故常在日上火星圈亦大但不能包日天而割入日天之內故有時在日之下金水二星圈甚小不惟不能包日天併不能包地故不能衛日然金水之本天即日天此圖日者乃其

図 3: 『暦象考成 五星本天皆以地為心』にある古図と新図．天動説とティコ（第谷）の説が紹介されている．(https://books.google.co.jp/より)

[7] 渋川春海 (1639-1715)
[8] 本木仁太夫良永（りょうえい）(1735-1794)
[9] 高橋至時 (1764-1804)
[10] 志筑忠雄・中野柳圃（りょうほ）(1760-1806)
[11] 司馬江漢 (1747-1818)

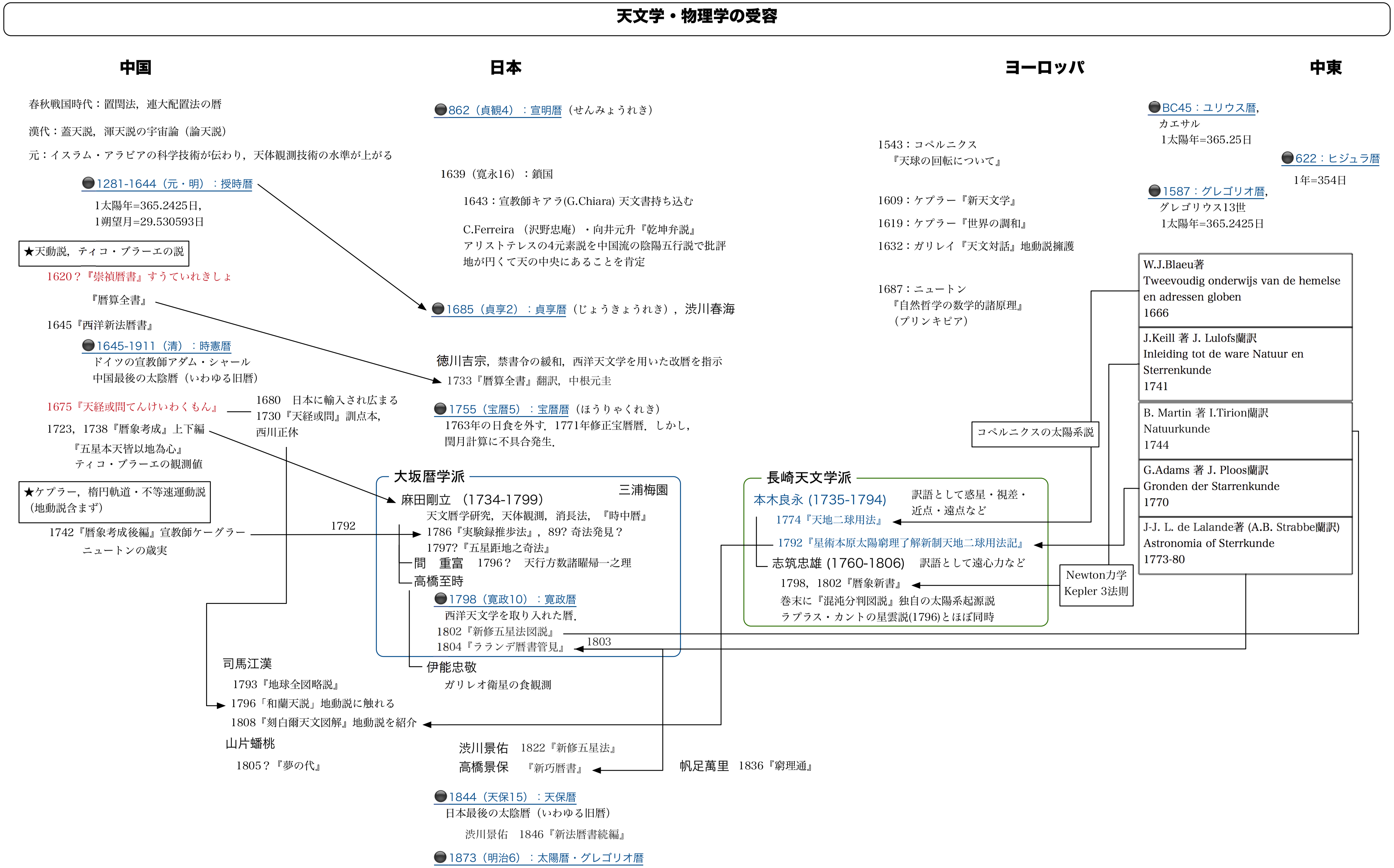

図 4: 中国・日本・ヨーロッパの天文・物理の受容に関する年表

3 麻田剛立とケプラーの惑星運動の第 3 法則

麻田剛立

豊後・杵築（現大分県）の綾部妥彰 [12] は幼い頃より天文現象に興味をもち，自ら渾天儀を改良するなど観測と天体位置の計算に勤しんだ．16 歳と 28 歳の頃には暦にない部分日食を予言し的中させた．後者の日食 (1763 年 9 月 1 日）は事前に地元で予言していたため，その的中は広く伝えられることになった．天体望遠鏡を作成し，日本ではじめて月面のクレーター図を残したことでも知られている．

医者として藩に仕える身分であったが，天文好きが高じて脱藩し，大坂に移り，麻田剛立と自身を名乗った．後に，先事館とよぶ天文研究の私塾を開き，寛政暦 (1798 年) をつくることになる高橋至時や間重富 [13] などの後継者を育てた．

独自発見か

麻田剛立が独自にケプラーの第 3 法則を発見した，という話がある．根拠とされるのは，次の文献である [8].

- 『五星距地之奇法 (1796–98 頃?)』(図 5 に全文掲載)．麻田が著したものを麻田の門人である西村太沖 [14] が写本したと考えられている．
- 『新修五星法図説 (1802)』麻田の門人である高橋至時による著の一部（図 5〔右〕の解説文中にあり)．同じ記載が『新修五星法 (1822)』渋川景佑 [15] による著の一部（図 6）にもある．
- 『ラランデ暦書管見 (1804)』高橋至時
- 『星学続稿』5 の 1224 章，間重富
- 『寛政暦書続録』巻 3，渋川景佑

しかし，いずれも麻田門下の者による記載であり，麻田本人がいつこの法則に思い至ったのかの年月日が定かではない．そのため，本人が本当に独自にケプラーの第 3 法則を発見したのかどうかが，諸説繰りひろげられている．

論点となるのは，

(a) 麻田剛立が独自に法則を発見した．

(b1) 麻田剛立がなんらかの形で蘭学書あるいはその翻訳原稿に書かれたケプラーの第 3 法則を知った．

(b2) 麻田剛立がなんらかの形で蘭学書の内容を知り得て，アイデアを得た．

(b3) 麻田剛立がなんらかの形で蘭学書を見て，内容を理解できなかったが，数字からアイデアを得た．

のどれか，という点である．この論点に関して，研究論文としては中山 (1969)[10], 研究書として渡辺 (1983)[8] が詳しく，それらを踏襲した上原 [9] がインターネット上で入手可能である．中山と渡辺は (b1)(b2)(b3) のいずれか，上原は (a) という立場である．

なお，一般書における記述としては，麻田がケプラーの第 3 法則を独自に導いたかどうかについては

- 独自に導いた（鹿毛 [11]）
- 真偽不明（中村 [12]，嘉数 [15]）
- 話題に触れず（中村 [13]，荒川 [14]）

となっている．

独自発見説への懐疑

麻田は中国書『暦象考成 上下編/後編』を通じて地動説の存在とケプラーの第 2 法則までは知っていたはずである．しかし，蘭語を学ぶ機会はなく，蘭学書の入手も難しかった．麻田が没する直前に寛政暦（寛政 10 年,1798 年）に改暦されたが，寛政暦はまだ天動説に依っている．ラランデの書が江戸の天文方に伝えられたのは 1802 年だった．

一方，同時期に，蘭学書の翻訳が志筑らによって進められていた．志筑はケイルの書からニュートン力学を知り，その中にはケプラーの第 3 法則が記載されている．ケイルの書を翻訳した『暦象新書』は 1798 年に上編，1802 年に下編が完成している．

中山 [10] によれば，志筑が『暦象考成』を批判した文章として『読暦象考成』という写本が残されている．ここでの『暦象考成』はティコのモデルを説明した上下編の方であり，志筑はケイルの書の立場（地動説・ケプラーの楕円運動）からその内容を批判し，自身の翻訳解説書『暦象新書 上編 (1798)』にもその内容があるという．したがって，ケイルの書を翻訳中であった志筑は，麻田が「第 3 法則を見つけた」という時期にすでにその知識を持っていたと考えられる．

[12] 綾部妥彰（やすあき）・麻田剛立 (1734-1798)
[13] 間重富 (1756-1816)
[14] 西村太沖（たちゅう） (1767-1835)
[15] 渋川景佑 (1787-1856)（高橋至時の次男）

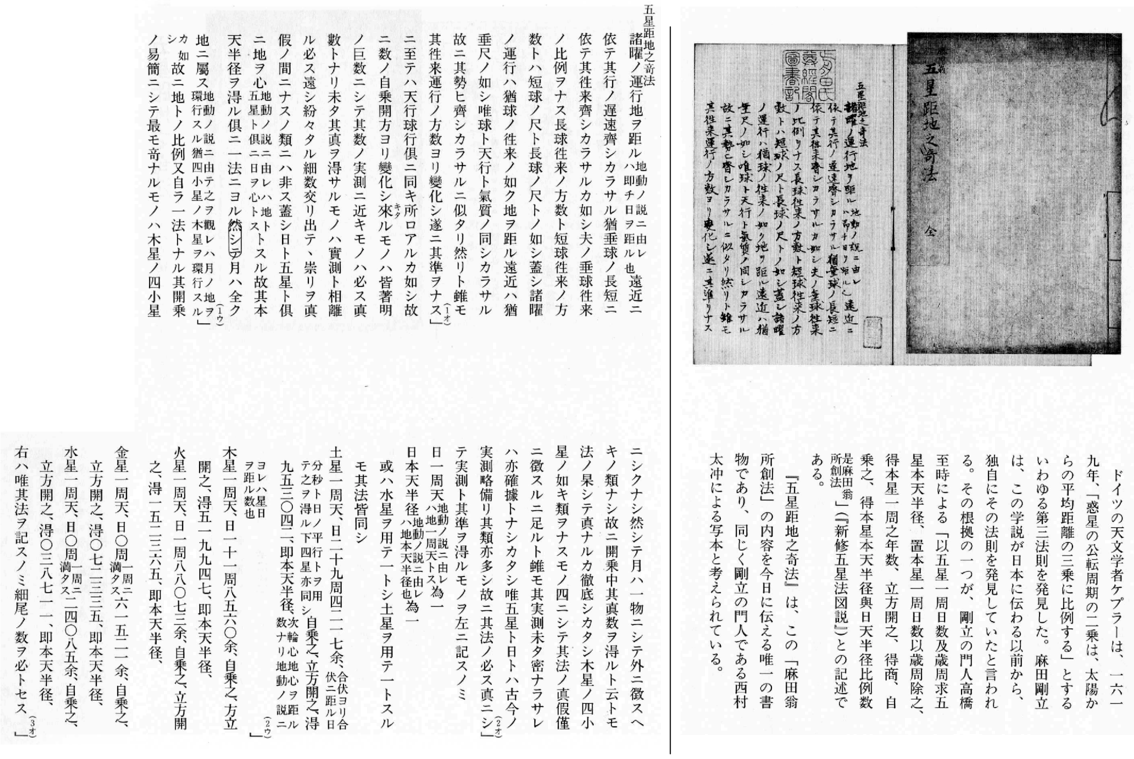

図 5: 〔左〕『五星距地之奇法』(1796–98?) の全文．西村太冲による写本と考えられている．〔右〕『五星距地之奇法』についての解説．高橋至時の『新修五星法図説』に関する記述がある．（どちらも [6] より）

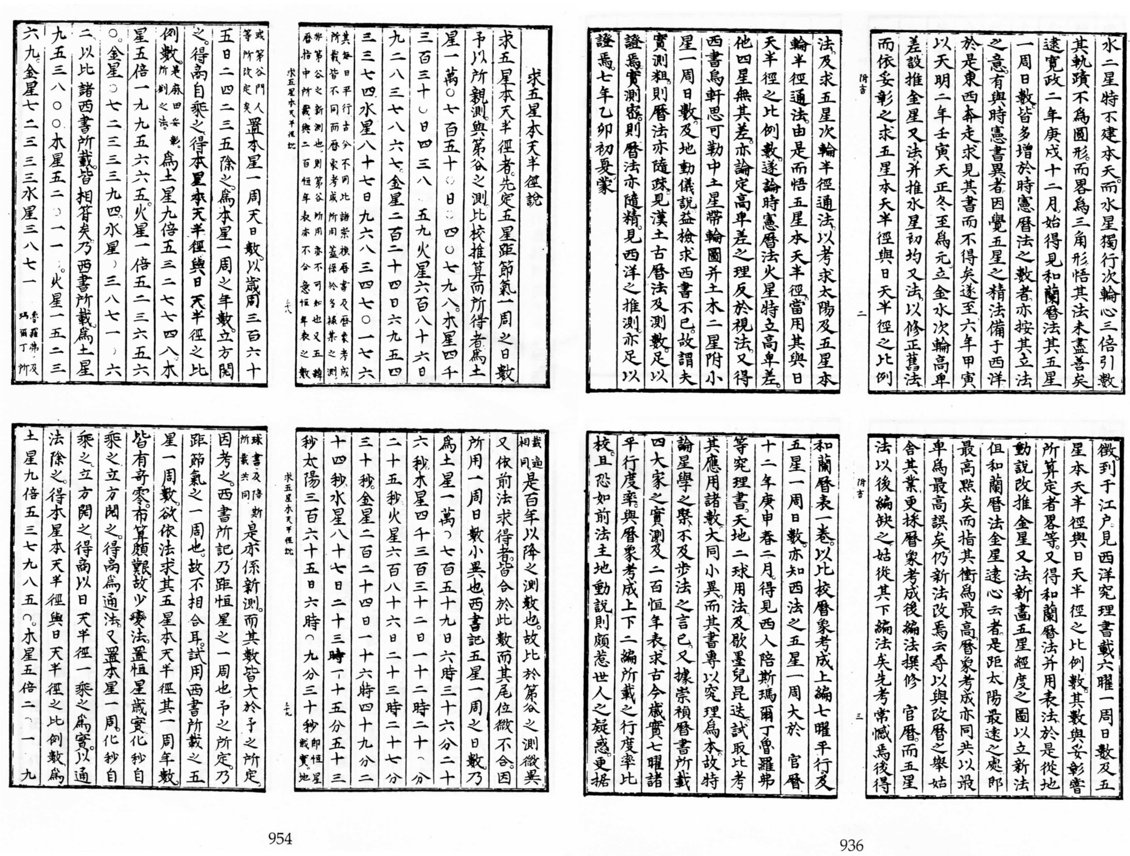

図 6: 渋川景佑撰『新修五星法』(1822) から．右下と左上のページに妥彰，麻田についての記載が見られる．([7] より)

中山 [10] は，次のように記している．

> 志筑忠雄は寛政改暦以前にあって『暦象考成』を批判し，中国の水準をすでに抜いていたということができる．麻田一統が『暦象考成』を有難がって読んでいる間に，志筑忠雄はケイルをマスターした上で，『暦象考成』を批判できたのである．

天行方数諸曜帰一之理

中山 [10] も渡辺 [8] も言及しているが，麻田がケプラーの第 3 法則「五星距地之奇法」を導いていたとしても，その意味を理解していたかどうか，という問題がある．渡辺 [8] は，麻田の門下である間重富が「五星距地之奇法」の原理として「天行方数諸曜帰一之理」を思いつき，麻田に絶賛された，というくだりを紹介している．出典は，間重新（重富の息子）の『先考大業先生事迹略記』に記載されているそうだが (原著未確認)，渡辺 [8] の解説も上原 [9] の解釈も腑に落ちない．以下は，例示されたものを並べただけの私の解釈である．

- 間は，ふりこ（垂球）の周期（往復する時間）T が，ひもの長さ ℓ によって決まることを知っていた．ガリレオが見つけた

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \tag{3.2}$$

  という関係式である．g は重力加速度 (=9.8 m/s^2) である．全体を 2 乗して，$T^2 = k_1\ell$ (k_1:定数) という式になる．周期の逆数が振動数 f であるので，$f = 1/T$ を用いると，

$$f^2\ell = (\text{定数}) = f_1^2\ell_1 = f_2^2\ell_2 = \cdots \tag{3.3}$$

  となる．添え字は 1 番目, 2 番目のひもを考えたときも同様に成り立つことを明示したものである．

- 間は，天秤ばかり（衡器）において，支点からの距離 L_1, L_2 とそこに吊り下げられるおもり M_1, M_2 の間にはモーメントの式

$$M_1L_1 = M_2L_2 = (\text{定数}) \tag{3.4}$$

  が成り立つことに思い至る．おもりの大きさを正方形（一辺の長さをそれぞれ x_1, x_2）としてその面積で測るとすれば，

$$x_1^2L_1 = x_2^2L_2 = (\text{定数}) \tag{3.5}$$

  が成り立つ．

- 麻田の見つけた「五星距地之奇法」は，

$$\text{「周期，自乗之，立方開之，得半径」} \tag{3.6}$$

  すなわち，惑星の公転半径を R，公転周期を T として

$$R = \sqrt[3]{T^2}, \quad \text{あるいは} \quad R^3 = T^2 \tag{3.7}$$

  という法則である．ケプラーの第 3 法則の形で書けば，$T^2 = k_1R^3$ (k_1:定数) という式である．ここで，惑星が一定速度で公転していると考えて角速度を ω とすれば，$T = 2\pi/\omega$ より，

$$\omega^2R^3 = (\text{定数}) = \omega_1^2R_1^3 = \omega_2^2R_2^3 = \cdots \tag{3.8}$$

  と書ける．添え字は 1 番目，2 番目の惑星の意味である．

この前二者の事例から麻田は合点したそうだが，どう考えても私にはつながらない．(3.3) と (3.5), (3.8) は全く異なる式だが，2 つの数を乗じたものが一定値になる関係は共通している．そこで，式の形からもっともな関係だ，と合点したと解釈することにする．そうすれば，「五星距地之奇法」(図 5〔左〕) に

> 蓋シ諸曜ノ運行ハ猶球ノ往来ノ如ク地ヲ距ル遠近ハ猶垂尺ノ如シ唯球ト天行ト気質ノ同シカラサル故二其勢ヒ斉シカラサルニ似タリ

とあることにもつながる．

しかし，この議論が「こじつけ」であることは渡辺 [8] に同意する．つまり，麻田の理解は，(3.8) を得ていたとしても，数値上の一致を見た以上のものではない．

数値の一致

さらに指摘したいのは，麻田の提示している数値である．「五星距地之奇法」に掲げられた各惑星の数値（表 1）を用いると，5 惑星のデータ $\{R,T\}$ の組を $T \sim R^\alpha$ の数式でフィットさせてみると

$$T \sim R^{1.50000} \qquad (T^2 \sim R^3) \tag{3.9}$$

と，ピタリと（あまりにもピタリと）ケプラーの法則の式に一致する．ケプラー自身の『宇宙の調和』にある惑星データを使って同様のベキを求めると

$$T \sim R^{1.50369} \tag{3.10}$$

である．また，現代の数値を用いると

$$T \sim R^{1.50444} \tag{3.11}$$

である．

表 1: 『宇宙の調和』の数値 T_0, R_0 と『五星距地之奇法』の数値 T_1, R_1（それぞれ基準値が異なるので値は違うが，有効数字を比較されたい）．

	周期 T_0	半径 R_0(長, 短)		周期 T_1	半径 R_1
水星	87.97	308	476	0.24085	38711
金星	224.7	716	726	0.61521	72335
地球	365.25	983	1017	1	100000
火星	686.983	1384	1661	1.88073	152365
木星	4332.62	4948	5464	11.856	519947
土星	10759.2	8994	10118	29.4217	953042

麻田の記した惑星の公転半径と周期の値が理論値と厳密に一致するのは科学の視点から考えると「問題」である．ケプラーの法則は太陽の周りを 1 つの惑星だけが公転するときにはそのまま成り立つが，複数の惑星が存在する現実では，惑星間にも万有引力がはたらくために，それほど理想的な関係にはなり得ないからだ．麻田のデータは，周期 T_1 の観測値から，(3.9) を用いて，半径 R_1 を計算したものとも考えられる．

ニュートンがケプラーの第 3 法則を導出して以降は，惑星の公転軌道半径は，周期の観測値からケプラーの法則を用いて計算されることが主となり，データの精度が向上した [10]．もし，麻田が，中国書に記載されたデータを参考に，自らの観測によって得られたデータを補正しているような場合，元の中国書（『天経或問』や『暦象考成上下編』）のデータに，すでにケプラーの法則が適用されていた可能性はないだろうか．非常によいデータが手元にあれば，それらの数値から関係式を「見つける」ことは可能だったであろう．しかしそうなると「法則を発見した」とは言えなくなる．

とりあえずの結論

麻田剛立がケプラーの第 3 法則に相当する関係を独自に見つけたのか，あるいは何らかの形で蘭学書かその翻訳原稿に接してケプラーの法則もどきを見聞してそれを元に関係式を導いたのかは不明である．しかし，物理的な理解に至らなかったことは確かだ（その点ではケプラーと同じかもしれない）．また，仮に法則を独自に発見していたとしても，元のデータにすでにケプラーの法則が適用されていた可能性も新たに指摘した．これらの点は当時の蘭学書，中国書，そして麻田の観測データ書である『実験録推歩法』([6] 所収）の数値やその依存関係を調べれば解決できるものと思われる．

たとえ麻田の五星距地之奇法が独自の発見ではなかったにしろ，間の天行方数諸曜帰一之理が的外れであるにしろ，当時の日本人としては仕方のない話だ．むしろ，科学的な態度が醸成されていく過程が見られることはもっと積極的に評価されるべきだと考える．

謝辞

本調査では，漢文・古典文の解読に，大阪工業大・横山恵理氏のお世話になりました．感謝申し上げます．

参考文献

[1] 山本義隆『重力と力学的世界　古典としての古典力学』（現代数学社，1981）

[2] 真貝寿明『徹底攻略　微分積分』（共立出版，2009）

[3] N・セビン著　中山茂・牛山輝代訳『中国のコペルニクス』（思索社，1984）

[4] J・ニーダム著　東畑精一・薮内清監訳『中国の科学と文明 (5) 天の科学』（思索社，1991）

[5] 有坂隆道「山片播桃の大宇宙論について」（『日本洋学史研究 IV』（創元社学術双書，1982）所収）

[6] 大分県立先哲資料館編『大分県先哲叢書　麻田剛立　資料集』（大分県教育委員会，1999）

[7] 『近世歴史資料集成　第 III 期 日本科学技術古典籍資料　天文編 2』（科学書院， 2000）

[8] 渡辺敏夫『近世日本科学史と麻田剛立』（雄山閣出版，1983）

[9] 上原貞治『我が国におけるケプラーの第 3 法則の受容』東亜天文学会「天界」2005 年 6/7 月号，『同 II』2006 年 6 月号，『同 III』2007 年 2 月号，『同 IV』2007 年 5 月号，『同 V』2007 年 7 月号

[10] 中山茂『ケプラーの第 3 法則と志筑忠雄・麻田剛立』科学史研究 II (1969) 49

[11] 鹿毛敏夫『月のえくぼを見た男 麻田剛立』（くもん出版，2008）（鹿毛敏夫『月に名前を残した男　江戸の天文学者　麻田剛立』（角川文庫，2012）として入手可能）．

[12] 中村士監修『江戸の天文学』（角川学芸出版，2012）

[13] 中村士『東洋天文学史』（丸善 （サイエンス・パレット） 新書，2014）

[14] 荒川 紘『日本人の宇宙観 飛鳥から現代まで』（紀伊國屋書店, 2001）

[15] 嘉数次人『天文学者たちの江戸時代: 暦・宇宙観の大転換』（ちくま新書，2016）