

## 雨の日の天文学自由研究 「系外惑星の美しい公転周期関係について」

科学館学芸員 石坂 千春

### 概要

公開されている太陽系外惑星のデータベースを使って、系外惑星系で公転周期が尽数関係にあるものを調べました。特定の尽数関係にある組が多く存在することが分かりました。

### 1. はじめに

太陽系以外の惑星（「太陽系外惑星」、略して系外惑星）は2018年4月現在で、5000個以上、見つかっています。中には、太陽系のように複数の惑星が回っている系も少なくありません。

ところで太陽系の場合、金星と地球の公転周期の比は8:13で、ぴったり整数比になっています。こうした整数比になっているものを「尽数関係」と言います。尽数関係は惑星どうしが重力的に影響しあう「共鳴」とも関係が深く、惑星軌道の安定性を判定する指標にもなる可能性があります[1]。

では、太陽系以外にも、尽数関係にある惑星系はあるのでしょうか？公開されている系外惑星のデータベースを使って調べました。

梅雨時で、実際の星空を見る機会は少ないかもしれませんが、雨の日のできる天文学の自由研究です。

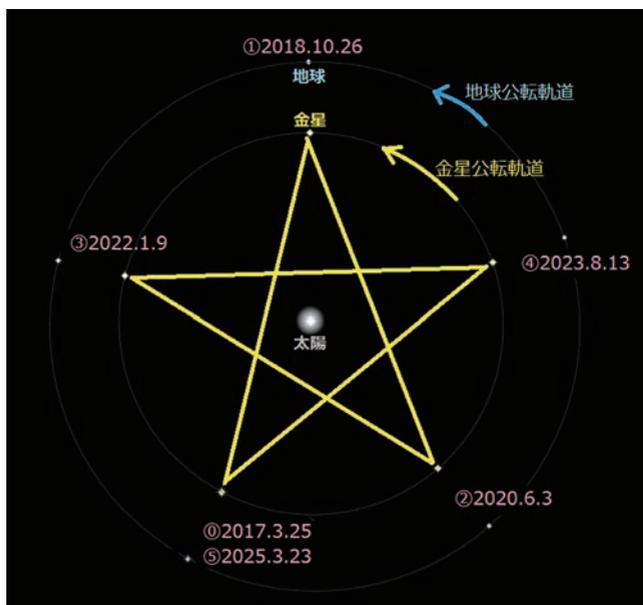


図1. 金星と地球の尽数関係8:13によって描かれる五芒星。金星が内合する場所を線でつなぐと8年毎に☆型を描く。

## 2. 系外惑星データベース

まずインターネット上で公開されている系外惑星のデータベースをダウンロードしましょう。私はパリ天文台の研究者が管理している <http://exoplanet.eu> (このサイトはありがたいことに日本語化されています) を利用しました。ここから太陽系外惑星のリスト「全てのカタログ」をCSVファイルとしてダウンロードできます。

2018年3月28日にダウンロードした「全てのカタログ」には3,758個リストアップされていました。このリストには恒星の名前、惑星質量、軌道周期、軌道要素、中心星の質量・光度・金属量・温度・赤経・赤緯・距離、それぞれの数値誤差、発見年、等、必要なデータが網羅的に記載されています。

このデータベースから複数の惑星が回っている系を選びだします。系外惑星は中心星名+アルファベット小文字で表され、発見順にb、c、d…と付きます。複数の惑星が回る系、つまりc以上のアルファベットが付いている系は616あ

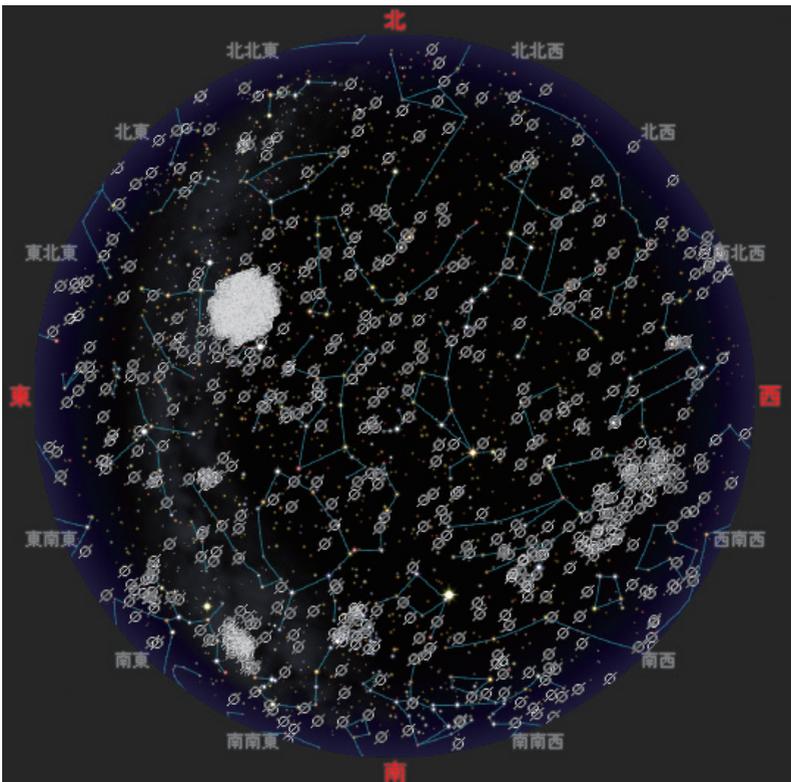


図2. 系外惑星系の分布(ステラナビゲータ10で作図)。

はくちょう座領域に密集しているのはケプラー衛星により発見されたもの。

りました。

なお、分析は全てエクセルを使いました（※言わずもがなですが、カタログに記載されている数値データを都合のいいように改ざんしてはいけません…）。

### 3. 公転周期比の分析

今回、調べたいのは隣り合う軌道の惑星の公転周期の比です。

#### 3.1 太陽系の場合

解析の方法を太陽系のデータ（表1）で説明します。

まず、それぞれの天体の公転周期を、一つ内側の天体の公転周期 $p$ で割った比を求めます（表1の3行目）。その逆数を分数表示にしたものが4行目、5行目は100と $100p$ をエクセルによって求めた最大公約数GCD（100, ROUND（ $100*p,-1$ ））で割って整数比で近似したものです（ROUND関数は指定桁で四捨五入し整数化します）。

分数表示と近似した整数比とで数値が違っているものもありますが、きれいな整数比になっている（尽数関係にある）組がいくつかあります。前述のように、金星—地球は8:13の尽数関係です。他に、木星—土星が2:5、天王星と海王星が1:2、それに、惑星ではありませんが、準惑星のケレスや冥王星についても、ケレス—木星が5:13、海王星—冥王星が2:3になっているようです。

表1. 太陽系天体の公転周期の比(赤字はきれいな整数比で書けそうなもの)

天体名	公転周期(年)	周期の比	分数表示	整数比
水星	0.2409	—	—	—
金星	0.6152	2.5538	9/23	5:13
地球	1.0000	1.6255	8/13	5:8
火星	1.8809	1.8809	42/79	10:19
ケレス	4.610	2.4510	20/49	2:5
木星	11.862	2.5731	7/18	5:13
土星	29.458	2.4834	31/77	2:5
天王星	84.021	2.8522	27/77	10:29
海王星	164.77	1.9611	26/51	1:2
冥王星	247.79	2.4834	2/3	2:3

#### 3.2 系外惑星系での公転周期の比

さて、同様にして、616惑星系の、隣り合う934組の系外惑星について2章のデータベースから公転周期のデータを抜き出し、上記の太陽系の場合と同様の方法で周期の比を調べてみました。周期比の頻度が表2と図3です。

表2. 系外惑星系の公転周期の比の頻度(※比が3.4以上のものは省略)  
 頻度が10以上の欄を■、0の欄を■に色塗りしています。

比	件数										
1	1	1.2	2	1.4	4	1.6	4	1.8	3	2	7
1.01	1	1.21	0	1.41	3	1.61	7	1.81	2	2.01	4
1.02	0	1.22	0	1.42	3	1.62	5	1.82	4	2.02	8
1.03	0	1.23	0	1.43	5	1.63	4	1.83	4	2.03	5
1.04	1	1.24	1	1.44	2	1.64	3	1.84	3	2.04	14
1.05	0	1.25	3	1.45	2	1.65	6	1.85	6	2.05	7
1.06	0	1.26	6	1.46	9	1.66	4	1.86	6	2.06	5
1.07	0	1.27	1	1.47	2	1.67	7	1.87	4	2.07	6
1.08	0	1.28	1	1.48	8	1.68	3	1.88	3	2.08	3
1.09	0	1.29	3	1.49	4	1.69	6	1.89	5	2.09	3
1.1	0	1.3	0	1.5	4	1.7	12	1.9	4	2.1	4
1.11	0	1.31	1	1.51	19	1.71	3	1.91	11	2.11	3
1.12	0	1.32	0	1.52	10	1.72	6	1.92	4	2.12	2
1.13	0	1.33	4	1.53	6	1.73	6	1.93	4	2.13	4
1.14	0	1.34	5	1.54	8	1.74	6	1.94	7	2.14	5
1.15	0	1.35	2	1.55	4	1.75	0	1.95	3	2.15	8
1.16	0	1.36	3	1.56	4	1.76	3	1.96	3	2.16	7
1.17	2	1.37	4	1.57	6	1.77	4	1.97	1	2.17	6
1.18	0	1.38	2	1.58	2	1.78	6	1.98	0	2.18	7
1.19	1	1.39	3	1.59	9	1.79	3	1.99	1	2.19	7
比	件数										
2.2	5	2.4	2	2.6	2	2.8	3	3	2	3.2	1
2.21	2	2.41	1	2.61	1	2.81	6	3.01	0	3.21	0
2.22	6	2.42	4	2.62	1	2.82	0	3.02	2	3.22	1
2.23	1	2.43	2	2.63	2	2.83	2	3.03	3	3.23	0
2.24	1	2.44	1	2.64	0	2.84	4	3.04	1	3.24	1
2.25	2	2.45	5	2.65	2	2.85	2	3.05	2	3.25	2
2.26	6	2.46	1	2.66	2	2.86	2	3.06	0	3.26	0
2.27	2	2.47	3	2.67	1	2.87	1	3.07	0	3.27	1
2.28	1	2.48	2	2.68	5	2.88	1	3.08	0	3.28	1
2.29	2	2.49	4	2.69	0	2.89	2	3.09	3	3.29	1
2.3	3	2.5	3	2.7	2	2.9	1	3.1	2	3.3	2
2.31	3	2.51	0	2.71	1	2.91	1	3.11	1	3.31	1
2.32	3	2.52	4	2.72	3	2.92	1	3.12	1	3.32	0
2.33	4	2.53	2	2.73	4	2.93	2	3.13	0	3.33	0
2.34	5	2.54	3	2.74	2	2.94	5	3.14	1	3.34	1
2.35	4	2.55	3	2.75	2	2.95	1	3.15	2	3.35	0
2.36	1	2.56	3	2.76	4	2.96	0	3.16	1	3.36	0
2.37	1	2.57	5	2.77	0	2.97	1	3.17	2	3.37	0
2.38	4	2.58	0	2.78	2	2.98	1	3.18	2	3.38	1
2.39	2	2.59	3	2.79	3	2.99	0	3.19	0	3.39	1

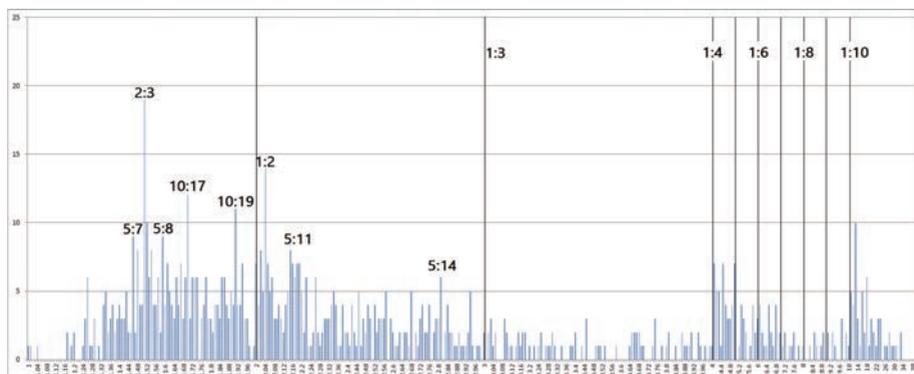


図3. 系外惑星系において、隣り合う惑星どうしの公転周期の比の頻度分布。特定の整数比(たとえば、2:3、1:2等)などにピークが見られます。系外惑星系でも尽数関係にあるものが少なくないようです。

頻度が多いものについて、詳しく見てみましょう。

### 3.3 周期比「2:3」

太陽系の海王星—冥王星と同じ関係です。2:3の関係は、楕円軌道の場合、会合の時に最も遠ざかるような配置にあれば、安定であることが分かっています。

系外惑星でも最も出現頻度が高く、前後の比率(1.45~1.55)を含めると74組ありました。

どんぴしゃり2:3になっていたのは、Kepler-372星系の惑星cとdです(Kepler\*はケプラー宇宙望遠鏡が発見した惑星系。以下、Kと省略)。残念ながらK372星系の惑星の軌道離心率のデータがないので、海王星—冥王星のような共鳴関係にあるのかは不明ですが、いずれにせよ、中心星の温度が太陽とほぼ同じ(おそらく太陽とよく似た恒星)なのに、cとdの公転周期がそれぞれ20日と30日なので、たぶん、中心星に近すぎて、熱っちっちで、生命生存不可能な惑星です。

そのほか、「第2の太陽系」とも言えるような7つの惑星が回っているTRAPPIST-1系で、dとe、eとfが2:3の関係にあります。それぞれの公転周期は4日、6日、9日! モーレツに「1年」が短いですが、中心星の表面温度は2550Kしかなく、冷たい矮星なので、dもeもfも生命生存可能領域に入っています。

### 3.4 周期比「1:2」

ついで多かったのが、1:2です。

この「1:2」の関係は太陽系の天王星—海王星と同じ関係ですが、常に同じ

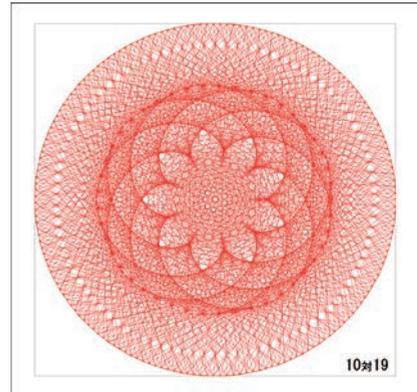
場所で会合が起きるので、安定な場合もあれば、不安定な場合もあります。それを反映しているのでしょうか、表2や図3では比が1.98付近は、ほとんど組が見つからない“空白領域”になっています。

### 3.5 周期比「10:17」「10:19」

尽数関係とは言えないかもしれませんが、周期比が1.7前後の組も多かったです。ここには3:5も含まれています。

また、地球—火星の関係でもある1.9前後の組も比較的多いです。

図4. 10:19の関係について、一定時間間隔で惑星間を線でつないだ模様。描き方は文献[1]を参照してください。



### 3.6 周期比「5:8」「8:13」

では、地球—金星の関係である「5:8」や「8:13」はあったでしょうか。

それほど頻度は高くありませんでしたが、1.55～1.65の範囲に48組ありました。うち、K84eとf、K107cとd、K252bとc、K352bとcは尽数関係8:13ですが、いずれも生命が生存するには熱すぎる惑星です。

## 4. まとめ

インターネット上で公開されている太陽系外惑星のデータを解析し、惑星どうしの公転周期が尽数関係（整数比）になっているものを調べてみました。

際立って多い比と、ほとんど見つからない比があることが分かりました。

2:3の尽数関係は明らかに頻度が高いです。一方、1:2の関係は多いとも言えますし、少ないとも言えます。1.9まで含めれば出現頻度が多いと言えますが、1.98のところは逆に組が見つかりません。1:2の尽数関係が安定でもあり、不安定でもあることを反映しているものと思われます。今後、離心率や惑星の質量比等のデータとも比較し、1:2が実現している系の共通的な特徴を探ってみようと思います。

みなさんも、雨や曇りの日にはコンピュータの中の宇宙を散策してみたいかがでしょうか。

## 参考文献

[1] 石坂千春、大阪市立科学館研究報告21号、2011、p29