

# この広い宇宙いっぱい I 「ギリシャ時代から」

2016年10月15日 2017年10月9日改 別当勉

## プロローグ

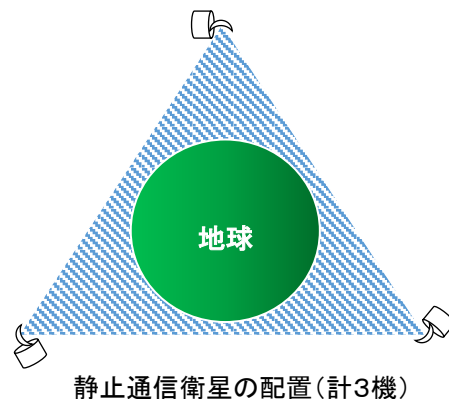
本当に私たちの地球は丸いのか、本当に太陽をめぐって自転しながら周回しているのであろうか。仮に私たちの誰かが、中央アジアの大平原に太陽の日の出と日の入りを見ながら暮らしていたら、さらに夜空の月と星々をながめたとしたら地球いや大地は動いているのではなく、静止しているものと思込んでしまうにちがいない。天空に見える天体はすべて動いてくれて、季節の移り変りを教えてくれ、豊かな実りも家畜の牧草も1年ごとに保証してくれる。あたかも、「小さい頃は神様がいて、毎日愛を届けてくれた」ように。ユーミンの名曲が夢のように頭によみがえる。そんな甘えた考えにひたっていて良いのだろうか。私たちは子供ではない。

それが問題なのである。古代ギリシャの知識人は、月食のとき月面に映る丸い地球の影をみて、この大地は丸いと判った。大気の透明度が抜群の中央アジアではスモッグという言葉がない、もっと鮮明に大地がまるく観えるはずである。これが私たちの目に客観性を産み付けた始まりであり、人類の英知を育て今日文明をもたらした原点の一つともいえる。

ここでは天空の深遠さに分け入りながら、個別にエポック・メイキングな天体を浮彫にしたい。意外に不可思議でいっぱいの星々の豊かで多様な活動がながめられる。



<http://www.nao.ac.jp/astro/sky/2015/lunar-eclipse.html>

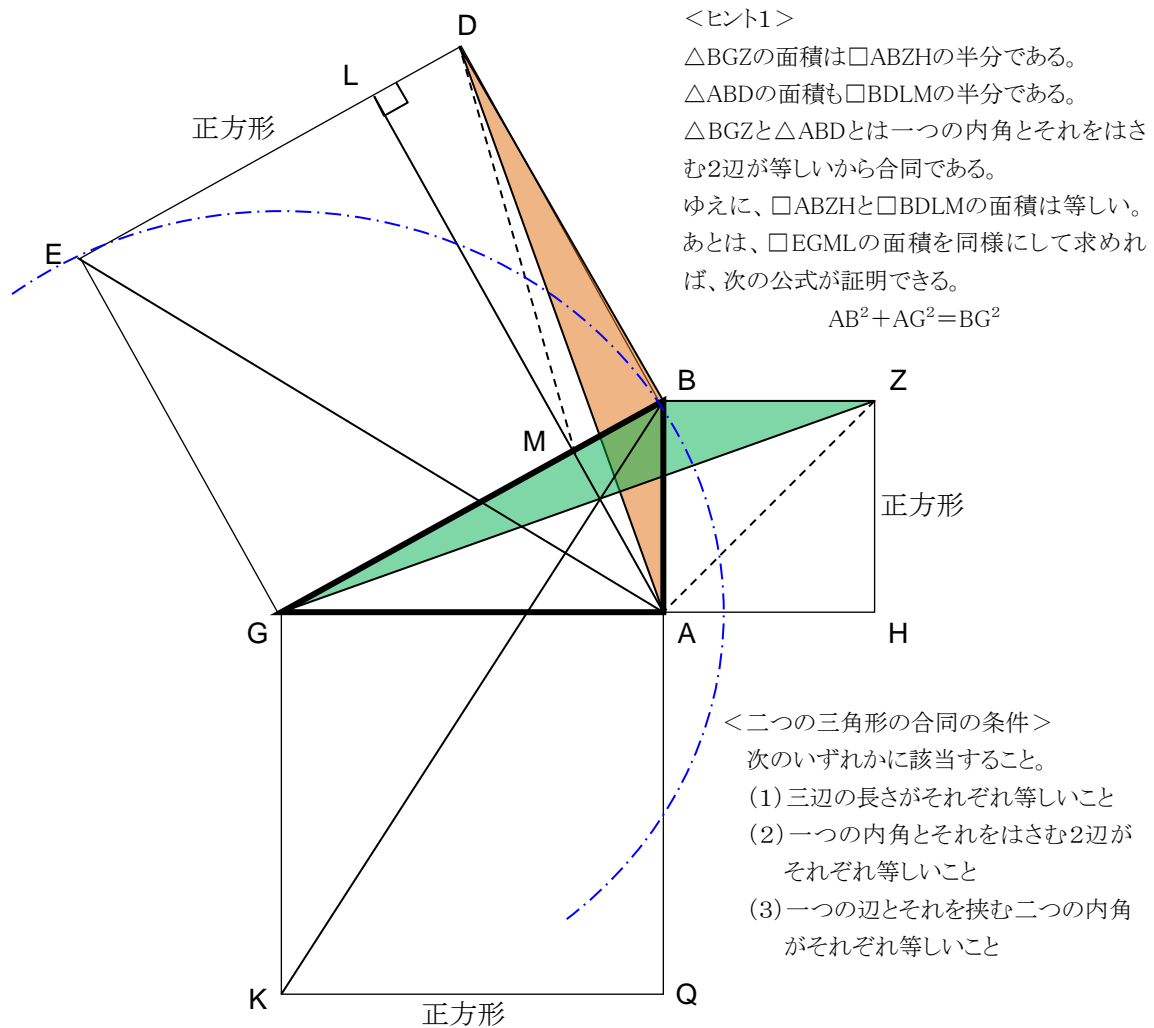


なお、筆者である私は、1970年代に国際通信キャリアである企業に入社し、社会人となった。そのときから、いきなり国際通信衛星の運用概略を教わった。赤道上36,000 km 上空に静止している人工衛星が大陸間の電信電話やテレビ映像まで全世界に中継しているという。なぜ静止しているのか、ニュートンのリンゴみたいに落ちないのか。そう、「リンゴはまっすぐ落ちるのに、どうして月は落ちないのか？」という彼の人生を決めつけたほどの疑問をもったと聞く。地球の自転と同じ速度で静止衛星は回っているから見かけ上動かないのだ、というカラクリも知らされた。私も、宇宙に静止できることに不思議さをいただいたが、人生後半になって本格的に興味をわいてきた。しかし、いまは違う。「見かけ」というのは人間の身勝手な主観であっても、私は、夜空の観測と探求にふけた秀才だらけのギリシャ時代を懐かしんでいる。

## ギリシャ時代

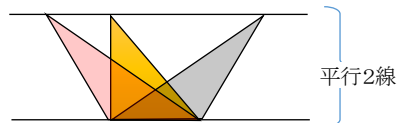
その時代とは、人類の文明が科学的に発火して今日に至るまで最良の手本とされてきたほど発展した時期（およそ600BC～100BC）である。数学においては、ユークリッド（Euclid：英語）により幾何学の不滅の金字塔『原論』が編纂された。ローマ帝国のラテン語では、ユークリッドではなくエウクレイデス（Eukleídēs：435BC-365BC）と読むらしい。専門家にはこのほうが通じるようだ。古代ギリシャ語の発音は絶滅してしまっているので本来の読み方は誰もわからない。文字にはあっても、発音に関する便利なロゼッタ・ストーンがないのだ。

この『原論』では、誰でも中学生の時に無理に覚えたピタゴラスの定理が見事に幾何学で証明されている。暇なときには知恵の輪みたいにドリルしてみることを薦める。即座に解ける高校生あるいは大学生は幾らかいるかもしれないが、中学生でも、次に掲げる図を参考にしてみれば証明できるかもしれない。

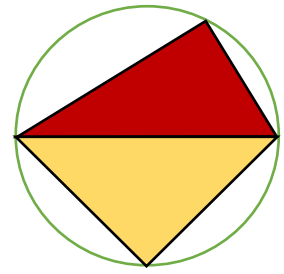


<ヒント2>

三角形の面積は、底辺×高さ÷2である。  
 したがって底辺が等しく高さが同じ二つの  
 三角形の面積は形が変わっても等しい。



この定理により、円の方程式は  $[x^2 + y^2 = r^2]$  となる。わざわざピタゴラスの定理を述べたのは、これから分け入る古代の宇宙観がすべて円と球で記述・構成されているからである。円は、右図のように直角三角形の三つの頂点が内接している。さらに、直角三角形が宇宙の果てまで適用でき、恒星観測技術の枢要として絶えず応用されてきている。これが現代宇宙論では「**宇宙の平坦性**」と言われている。



しかしながら、近代の数学にある‘sin’‘cos’‘tan’という便利な手法が生まれてはいなかった。一部の三角関数の数値はあったらしいが。

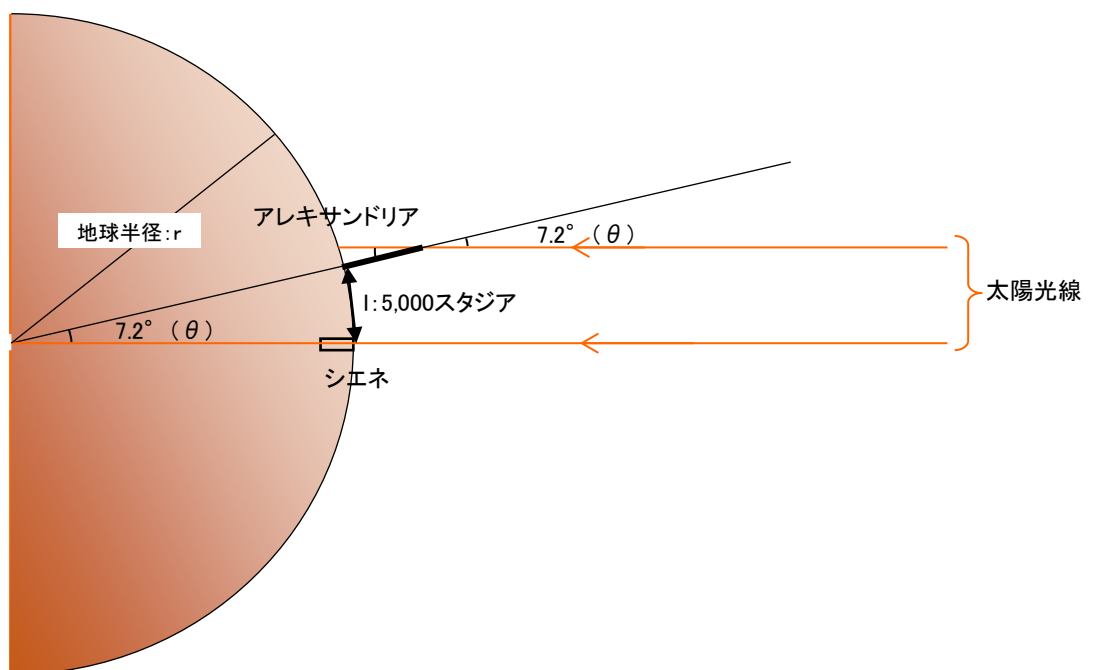
さて、古代ギリシャ人が見ていた大地（ギリシャ語：Gaia、ラテン語：Terra）と天空は、どのように見えたのであろうか。

まず大地であるが、船が港を離れていくとき段々と船体が水平線に沈み、マストが見えなくなることをもって海面は真平ではなく向こうにゆるやかに曲がっていることを認識した。逆に航海者からみると海に出るほど陸地や山が見えなくなる。これらの日常的な観測に加えて月食の時に月面に映る大地の丸い影をみた。ようやく大地ではなく地球と認めるようになったのである。

### エラトステネス (286BC-194BC)

ギリシャの文明がアテネで、数々の哲学者や科学者をはぐくんできたことは誰でも知っている。その後半を飾る哲人がアリストテレス (384BC-322BC) である。古代の宇宙観を観念的に定義した人でもあるが、文明の中心はエジプトのアレキサンドリアに移ってしまった。この港湾都市の開祖は、かの有名なマケドニアのアレキサンドロス大王 (356BC-323BC) である。その地で活躍したエラトステネスという数学者・地理学者がいた。

エラトステネスは、夏至のときにアレキサンドリアの真南のシエネという町で、深い井戸の水面に太陽が映ることを聞いた。



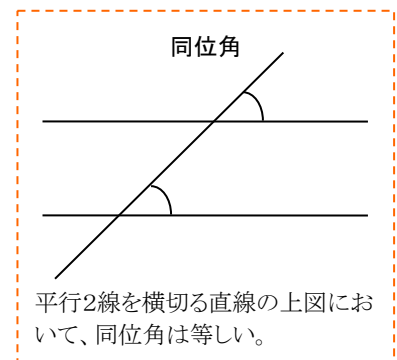
これにヒントを得て、アレキサンドリアで垂直のポールを立て同じ日時にその影とポールの角度を測り、かつシエネまでも距離について旅人たちをヒアリングして見積もった。結果、北回りの地球一周の距離が計算できたのである。

測定と計算は、次のような論理展開で行った。

- ・太陽光は、ほぼ平行して地球を照らしている。視差が感じられない。
- ・アレキサンドリアとシエネは同一子午線上にある。（同一時刻：重要）
- ・アレキサンドリア～シエネ間の距離  $l = 5,000$  スタジア
- ・ポールと太陽光のなす角度  $\theta = 7.2^\circ$

＝ ポール頂点とその影の頂点がなす角度は、  
地球中心にむかうシエネにさす太陽光とポールの  
地下延長線が地球中心でなす角度に等しい。

- ・  $7.2 / 360 = 5,000 / L$  (地球の子午線全周)
- ・  $L = 5,000 \times 360 / 7.2 = 250,000$  スタジア  
＝  $45,000 \text{ km}$  (1スタジア＝約180m説)  
(現在値：40,008 km；子午線全周)



これにより地球の半径  $r$  まで、7,165 km (現在値：6,357 km；極半径) と算出できており、当時の単位や計測精度の甘さを考えても相当な数値である。まさに驚嘆に値する。たしか、昔の高校の物理の教科書に掲載されていた記憶がある。この測定方法は今でも測量方法の一つに応用されているという。

スタジアという距離単位は当時のスタジアムの規模に由来しているようだが、残念ながら正確な数値の記録は失われている。すなわち、アレキサンドリアの大図書館が7世紀ごろに、アラビアに興隆したサラセン(カリフ)帝国の征西により燃やされて、人類の至宝ともいべき膨大な蔵書が一部を除き灰燼に帰してしまった。その後、プトレマイオスの「アルmagest」(原題：メガリ・シンタクシス(集大成という意味))という天文書などはアラビア語に翻訳されて重宝がられたというのだから歴史とは皮肉なものである。背景には、砂漠民族はほとんど遊牧民であり、夜空の星が道案内(ナビゲーション)となる。アラビア人には星の専門書ほど貴重な手引きはないからである。日本や欧州と違って、山や谷や川などのランドマークが無い。その違いを私たちは認識する必要がある。

一方、民族の蛮性というか、17世紀にギリシャを支配していたオスマン・トルコがアテネのパルテノン神殿を弾薬の倉庫に使ったから、敵の砲撃を浴びて爆発、人類文明史上、貴重このうえない神殿の北側の真ん中を吹き飛ばしてしまった。その無残な名残を実際にみたとき、私の心は悲しく痛んだ。当然のように、そのような想いを強くいだいたであろう大英帝国のエルギン卿は、蛮族に荒らされてしまうおそれが消えない神殿の彫刻レリーフ(大理石)の大部分を剥がして運び(19世紀始め)、ちゃっかりと自分の屋敷に所蔵してしまった。その後英国議会の指示により大英博物館に売却したと伝えられている。これらは「エルギン・マーブル」として展示され、高い人気を博している。昨今、ギリシャ政府が何度も返還を求めたが、イギリスは毅然とし

て応じていない。我が国もそうありたい。

太平洋戦争末期の数十回に及ぶ東京大空襲でさえ、米空軍は皇居爆撃を厳禁した。不運にも風にしたがって焼夷弾が落ちて（昭和20年5月25日）一部の建物が焼失したといわれているが、民族の文明度レベルと質の違いというのは不可解な側面を私たちに投げかけてくれる。

## アリスタルコス (310BC-230BC)

ギリシャ時代に地動説を考えた学者である。

それまで、宇宙は地球を中心として太陽までの距離を半径とする天球概念が定着していたが、宇宙の大きさは桁外れであるといった。恒星と太陽は不動であり、地球は太陽を中心とする円の周りを動いており、宇宙に比べればその円は点のようなものであるとなえた。

これゆえに「古代のコペルニクス」ともいわれている。

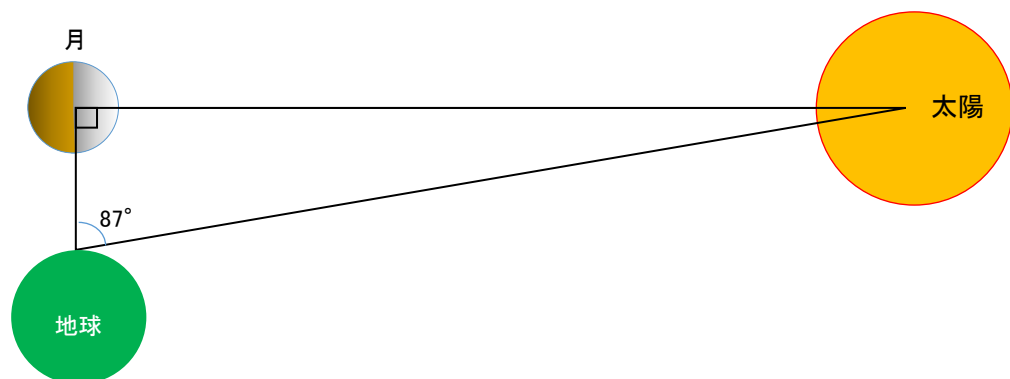
[参考：「コペルニクス著：天体の回転について」矢島裕利著 岩波文庫]

彼は、著書「太陽と月の大きさおよび距離」をあらわしたが、失われてしまった。後に、アルキメデス(287BC-212BC)がその内容をある程度引き継いで述べていたから、かろうじて私たちは彼の功績の一部を知ることができる。

次の図のとおり、彼は半月を目撃して地球と月と太陽がなす直角三角形を発想した。この構成にて地球上で内角の一つの角度を測った結果、 $87^\circ$  という値を求めることができた。‘sin’ という正弦数値表がわずかしかなない時代であったが、彼は、

$$\text{地球} \sim \text{太陽間距離} = \text{地球} \sim \text{月間距離の} 18 \sim 20 \text{ 倍}$$

というような比率を明らかにしたのである。現在では、約390倍(1.5億km)であるから違いすぎるが、彼の観測は、科学的でしかも宇宙空間を意識したものであり、画期的であった。



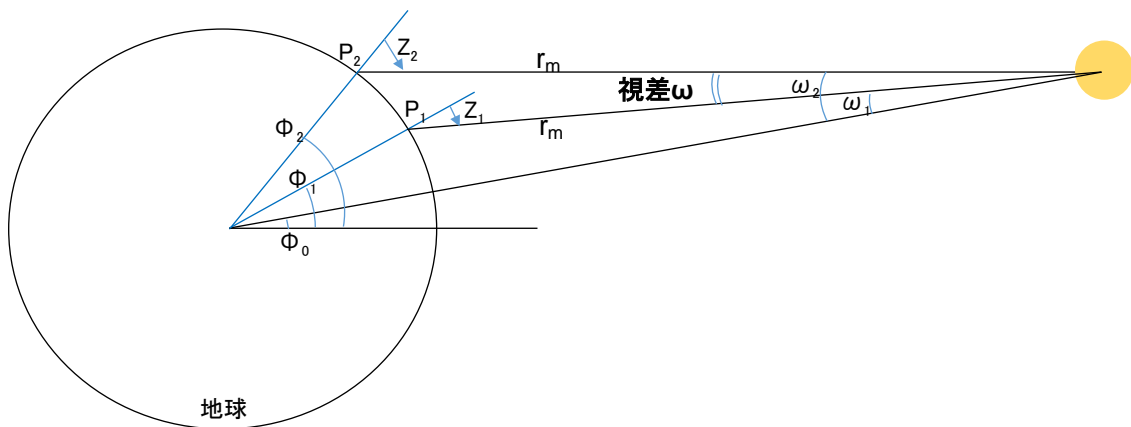
また、太陽と月の大きさも見積り、太陽は地球の6~7倍(現代:109倍)という値をえた。この結果、太陽の体積は200倍~300倍になることが解り、天動説のとおり太陽が地球の周囲を回れるはずはないと言ったそうだ。今で言えば、太陽の質量は地球の約17万倍であるから、なおさら回したときの遠心力で逆に地球がふっ飛んでしまう。まさにお笑い種だ。

## ヒッパルコス (160BC-125BC)

ギリシャ最大の天文学者である。ロードス島の生まれだが、彼の生涯は不明である。

しかしながら、天文史上、初めて恒星を観測して、位置と明るさを分類したことで有名である。その数は850以上になる。一等星から六等星まで見かけの明るさで等級を設けた。これが現在まで天文学の基礎になってきているから驚きでもある。さすがに現在は肉眼の感覚レベルではなく、きちんと数値で分けられている。すなわち一等星から順次1等級ごとに $1/2.5$ ずつ暗くなっていくのだ。それほどに礎に貢献した賢人だから、欧州宇宙機関(ESA)が打ち上げて運用した衛星(1989~1993年)の名に“ヒッパルコス”を使った。このヒッパルコス衛星は、恒星の年周視差を測定して実距離を求めるミッションなどが与えられ、結果、118,274個の恒星の年周視差を1,000分の1秒角の精度で実距離を調べあげた。また、100万個以上の恒星の光度測定、12万個以上の恒星の角運動量の測定など非常に多くの成果を挙げた。

さて、ヒッパルコスの大きな成果として、月までの距離を測定・算出したことを挙げざるをえない。その方法は次の図のとおりである。

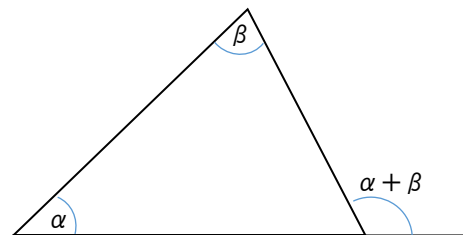


- 先ず、同一子午線上で観測点 $P_1$ と $P_2$ を決め、それぞれで月の中心をみて垂線との $Z_1$ と $Z_2$ を計測する。
- また、三角形の公理から、 $Z_1 = \omega_1 + (\Phi_1 - \Phi_0)$ 、 $Z_2 = \omega_2 + (\Phi_2 - \Phi_0)$  となる。
- 視差 $\omega$ は、 $\omega = \omega_2 - \omega_1 = (Z_2 - Z_1) - (\Phi_2 - \Phi_1)$
- $(Z_2 - Z_1)$ は計測結果から、 $(\Phi_2 - \Phi_1)$ は観測点の緯度差で、視差 $\omega$ が求められる。
- 視差 $\omega$ と $P_1$ と $P_2$ 間の距離により、円弧の公式： $l = r \theta$ より、  
 $r_m = P_1P_2 / \omega$  で月までの距離が求められる。

備考1 三角形の二つの内角の和は対向する外角に等しい。  
なぜなら三つの内角の和は $180^\circ$  だから。

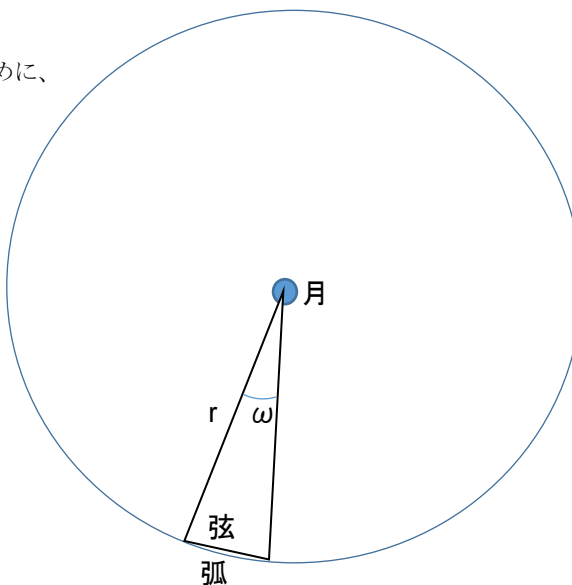
備考2 円弧の長さ $l$ は、半径 $\times$ 角度(ラジアン)で表される。  
一周すると“ $2\pi r$ ”になる。  
角度が小さくなればなるほど弧と弦の長さは等しくなる。

“sin”関数は角度が小さくなると“ $y=x$ ”に近づくことと同じ。



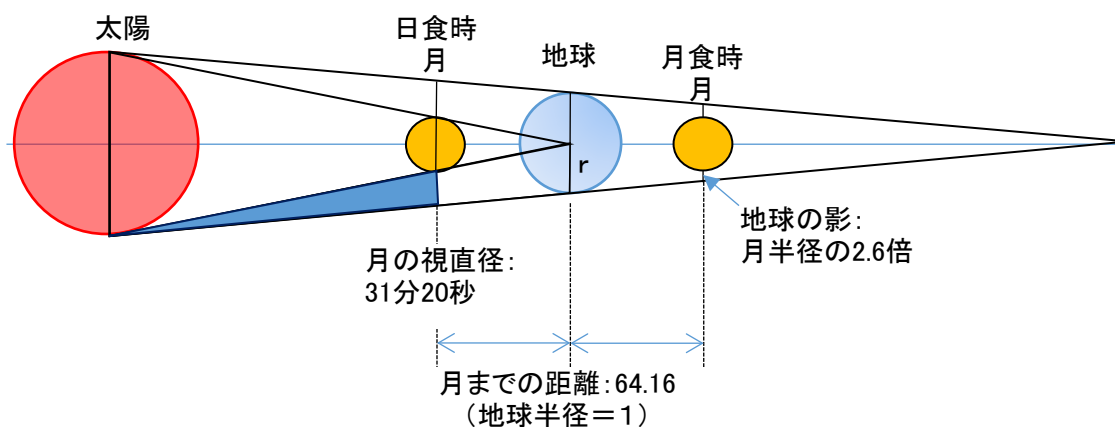


備考3  $P_1$ と $P_2$ 間の距離は、作図しやすいように誇張して長めに、書かれている。かつ、右図のように月を真上辺りにもってくれば月からみた $P_1P_2$ の円弧は弦とほぼ同じ長さに見えるほど短い。三角測量ではこの弦を基線という。

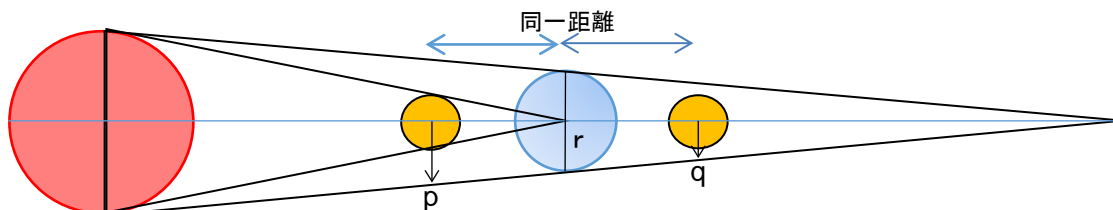


結果として、月までの距離は地球半径の“59倍”と算出できた。現代では、“60.27倍”（約38万 km）だから、かなりの精度である。月の半径は、地球半径の2/7と見積もれた。今は3/11である。

さらに、ヒッパルコスが太陽までの距離計測において、次の図のように皆既日食と皆既月食を利用した。これは、アルmagest著者のプトレマイオス（83AD頃-168AD頃）が受け継いで記している。[ADとは西暦 (anno Domini) による紀元後を示す略称]



- 月の半径:  $m = 64.16 \times \sin(31'20'' / 2) = 17'33'' = 0.2925$  (地球半径=1)
- 地球の影の半径:  $q = 2.6 \times 0.2925 = 0.76$  (地球半径=1)
- 相似三角形  $\rightarrow p+q=2r \rightarrow p=2r-q=1.24$  (地球半径=1)



- $P = p - m = 1.24 - 0.2925 = 0.9475$  (地球半径=1)

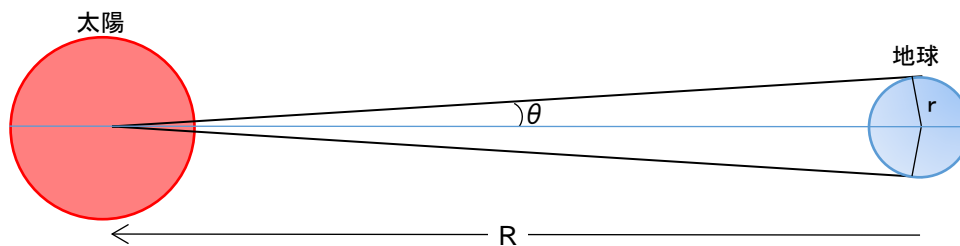
$$= [ \text{太陽までの距離}(L) - \text{月までの距離}(M) ] / \text{太陽までの距離}(L) = [ L - M ] / L$$

$$\rightarrow L = M / (1 - P) = 64.16 / 0.0525 = 1,222 \text{ (地球半径=1)}$$

ようやく、ヒッパルコスの子孫プトレマイオスは約1,200倍という値を出した。今の実際は、約23,500倍であるが、16世紀以降のコペルニクスやガリレオさえ1,200倍程度と推定したのだから、その精度たるや推して知るべし。このような労力的算出により、太陽の大きさまで視直径の測定で計算できたのである。

さらにいえば、ユークリッド幾何は完全に天文学者と切っても切れないツールになっていたことが分かる。19世紀には、カッシーニ等により700km離れた基線で太陽視差が計測され、9.5秒角で1.39億kmという値が出た。20世紀になると太陽視差が8.8秒角と確度が極められ、実距離は約1.5億kmと算出された。

なお、太陽視差 $\theta$ の定義図は次のとおり。太陽までの距離 $R$ は、 $r = R \cdot \theta$ により求められる。



[以上、参考： 測り方の科学史 I 「地球から宇宙へ」 西條敏美著（恒星社厚生閣）ほか]



## アリストテレス (384BC-322BC)

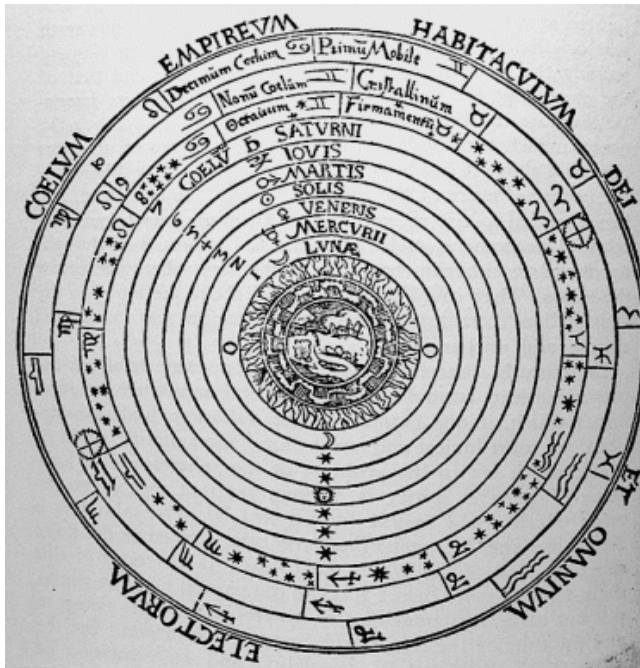
万学の祖である彼は、宇宙論まで唱えたが、それまで聞いた宇宙の話をまとめて整理した人である。つまり、哲学の世界でこそ巨人として有名であるが、宇宙について彼は編集者と呼ばれるべき人でもある。アリストテレスは次のように述べた

『宇宙は有限であるから、その形は球であり中心がある。その中心は地球でなければならない。一方において地球をみれば不動であり、またわれわれの知っている諸元素のうちで最も重くしたがって宇宙の中心を占めるものは土である。』

[参考:「コペルニクス著:天体の回転について」矢島裕利訳 岩波文庫]

諸元素とは、「土、水、気(空気)、火」を指し、重いものから軽いものという順序まで言及している。さらに、「エーテル」を定義して軽重に関係ない天上界をうめる物体であり、同心天球の有限宇宙を構成する。具体的には、月までの天球内は、土水気火の元素で構成され、その月の天球の外にエーテルという第五元素と四元素(土水気火)からなる不生不滅の天上界がある。すなわち、月が境界となっている。円は完全であり、中心に落ち込んだり遠く離れたりしない。天球をまわる天体は円運動している、と言い切っていた。

なお、19世紀に“エーテル”は宇宙空間を満たして光を媒介する概念として物理学界に再び現れたが、マイケルソンとモーリーの光速実験を経てアインシュタインの「時空」により否定された。



### アリストテレスの宇宙観

中心の地球から

- 月天球(LVNR):Moon/Lune(仏)
- 水星天球(MERCVRII):Mercury
- 金星天球(VENERIS):Venus
- 太陽天球(SOLIS):Solar
- 火星天球(MARTIS):Mars
- 木星天球(LOVIS):Jupiter
- 土星天球(SATURNI):Saturn
- 恒星天球

という天動説の外観。

彼の宇宙観は、著書「自然学」と「天界論」に載っているとのことである。

[高橋憲一訳・著「コペルニクス・天球回転論」より]

<http://metamorphoseislands.blog13.fc2.com/?mode=m&no=75>

とにかく、当時はギリシャ一や世界の学者であったから、その権威たるや突出しており、彼の言論に対しては、観念的とはいえ、誰も疑いを挟むことなど考えすらありえなかった。

そんな中でもピタゴラス学派のフィロラオス(440BC頃)とかアリストアルコスは、太陽中心の地動説を研究していたようでもあるが、なにしろ巨大な権威をまとう哲人の理論には消されていかなかった。

## 古代ギリシャ人の観念

天は回転しているという見方は、星空を数時間も観測している日常に由来するのではないのだろうか。あわせて太陽も月も同じように東から西へ天空を回っている。惑星だけはさまようように西から東へゆっくりと周る。星空を定点撮影した写真はいくつもあるが、一例として次にかかげるものをみれば、星々が回っている、と古代ギリシャ人が思い込むのはしかたない。



<http://free-images.gatag.net/tag/sky/page/8>

だから、視差が無いというか、当時の技術では距離が測定できないほど遠い恒星はその天球に貼りついて見かけ上、北極星を中心に日周していると観念し、天動説を産んだのではないか。アリストテレスほどの天才でも観念的に判断してしまった。人間主観というか、地球中心というか、いまの私たちは呆れてしまう。せつかく、アリストタルコスなどが地動説を説いていたのに、すべて無にされたのである。

古代ギリシャの衰退に応じるように地中海に登場したのが古代ローマ帝国であるが、彼らは軍事と土木・建築には度を過ぎて熱心だったが、天文学では、ユリウス・カエサル（ジュリアス・シーザ）が編纂して「ユリウス暦」という太陽暦を定めたことぐらいである。

アリストテレスの天動説を基にして、天体の運動、特に惑星の周転の理屈をまとめあげたのが、アレキサンドリアで活躍した紀元後のプトレマイオスであり、1200年以上も途絶えずに教本とされてきた。やっとこれに戦いを挑んだ人が15～16世紀のコペルニクスである。この闇の長さには驚嘆以上に愕然とする。

## プトレマイオス (90AD-168AD)

クラウディオス・プトレマイオスは、アレキサンドリアにて数学、天文学、占星学、音楽学、光学、地理学、地図製作学など幅広い分野にわたる業績を残した古代ローマの学者。かのエジプトのプトレマイオス王朝とは全く関係ない。

彼の業績の随一は、天体の回転を論じた『アルマゲスト』である。ちなみにこの名は、アラビア語であり、アレキサンドリア大図書館の焚書を逃れたものの一つであり、それを実行したアラビアのカリフ帝国がその分厚い書物に瞠目して、自分たちの学問書として確保した。すべてをアラビア語に翻訳し長年にわたり愛用したものである。これが12世紀ごろになってヨーロッパに伝わり、皮肉にも『アルマゲスト』として定着し、コペルニクスの生涯ターゲットになったのである。ただし、原書のギリシャ数字の1～12までは、

$$\alpha' \beta' \gamma' \delta' \epsilon' \zeta' \eta' \theta' \iota' \kappa' \lambda'$$

となっていたようである。

また、ローマ数字は“Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ, Ⅶ, Ⅷ, Ⅸ, Ⅹ”であるから、アラビア数字“0 1 2 3 4 5 6 7 8 9”に置き換わったことは、著しい革新であったにちがいない。ギリシャにはなかった「アルジブラ：代数」もアラビアで起きて発展を遂げた。“アル”が接頭辞でつく用語は、アルコールやアルカリなどほとんどが、特に化学用語はアラビア出身である。ギリシャ数字やローマ数字で連立方程式を書いたらどうなるか、たぶん私たちは身の毛もよだつはずである。

参考のために、全ての連立方程式にて使われる行列（マトリックス）表現を次に掲げる。

例:三元連立方程式	行列×解ベクトル	解ベクトル=逆行列 $M^{-1}$ ×定ベクトル
$\begin{aligned} 2x+3y+4z &= a \\ 5x+6y+7z &= b \\ 8x+9y+2z &= c \end{aligned}$	$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$	$M \times X = A \Rightarrow X = M^{-1} \times A$ <p style="text-align: right;">逆行列の計算は行列式による。</p>

どうしてギリシャで代数学が生起しなかったのか疑問が解けそうであると言うべきか。やがて、代数学は量子力学や一般相対論の中でマトリックス演算にまで浸透し、ある分野ではほとんど幾何学を追い越してしまったことを敢えて掲げておきたい。日本語の“数学”という言葉自体も代数学から発しているのであろう。文明の発展に簡潔で美しい文字は不可欠ということである。

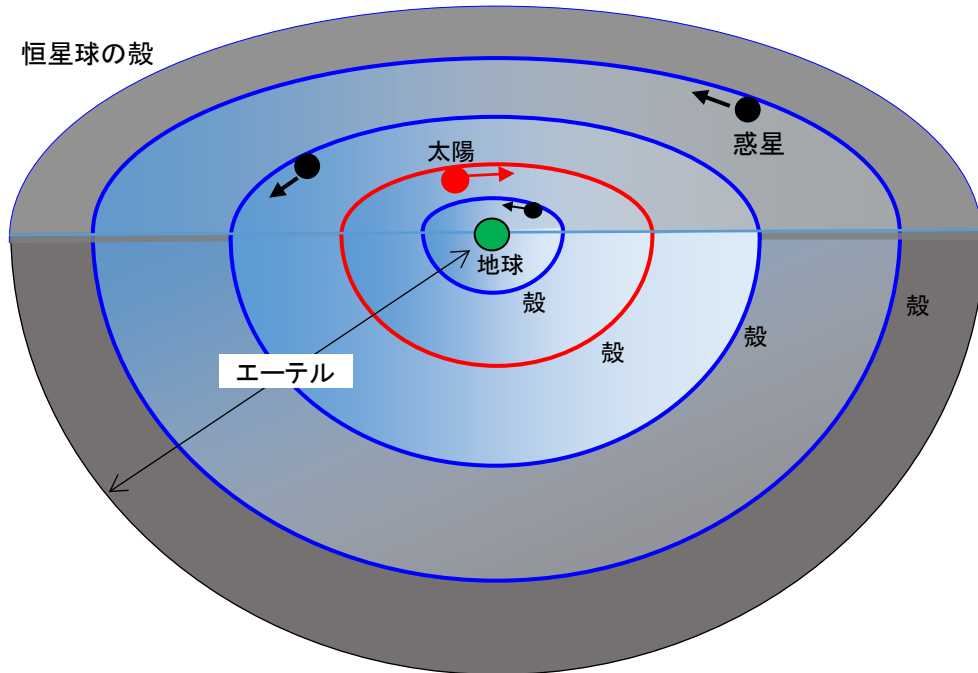
アルマゲストの中身は、ほとんどがギリシャの秀才たちの天文学、数学、占星術などの蓄積を彼が収集してまとめあげた集大成というべきものであり、独創的なものは多くないといわれている。原題はラテン語で“メガレ・シンタクシス（集大成）”であるが、アラビアでは同義語の“アルマゲスト”になった。この方が音感がいい。

プトレマイオスの惑星運動に関する理屈の主なものとり上げる。

### (1) アリストテレス以来の天球概念

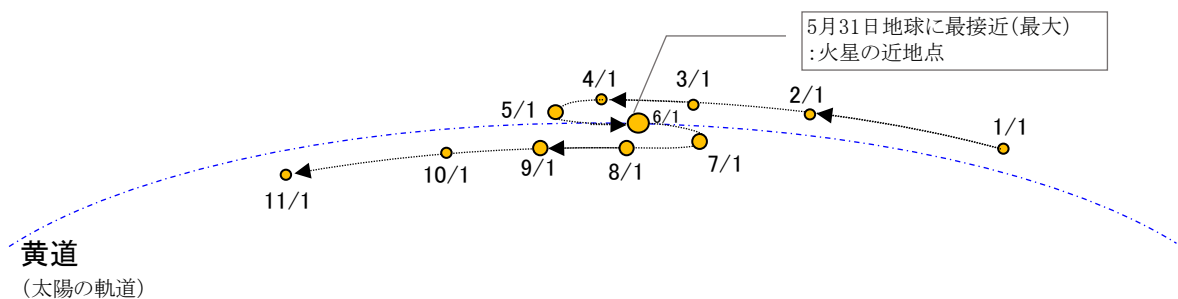
月も含めた太陽、惑星、恒星については、それぞれ地球を中心とする「殻」の内側を回転するという概念で、宇宙を記述した。殻は重さもなく透明なものであり、惑星等の回転の様子は下に掲げるようなものである。星々は恒星球の内側に貼りついているとした。

まさに、これがアリストテレス以来の天動説の俯瞰図である。



### (2) 火星の見かけの逆行：2016年の例

惑星は惑う星だからそのように呼ばれてきた。その第1が「見かけの逆行」現象である。



参考：天文年鑑2016(誠文堂新光社)

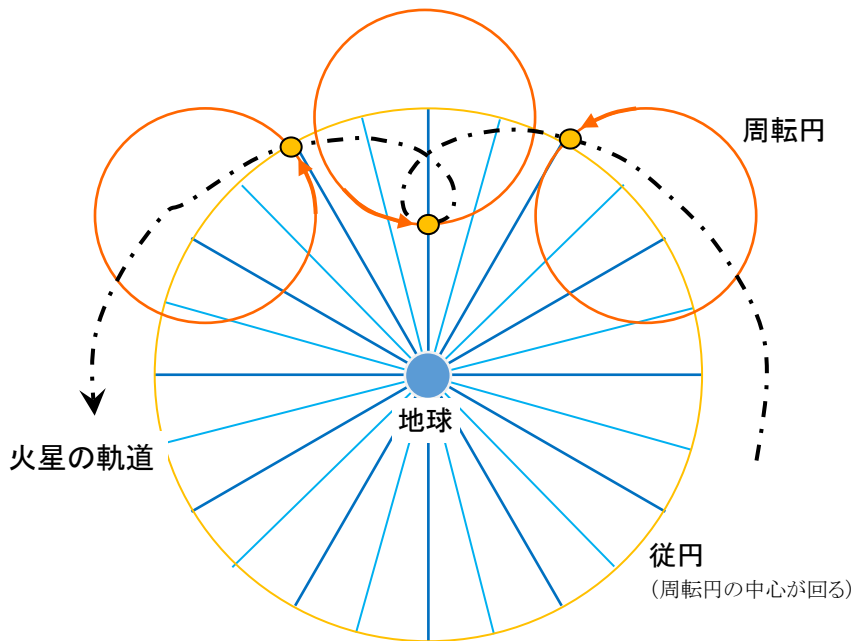
火星、木星、土星という外惑星は、逆行運動するという。いまでは、天文の専門家以外はあまり知らないが、昔の人々、特に、ランドマークが無い砂漠の旅人や、大海の航海者は方向判断の



ためによく星空を見ていたから、だいたい2年に1回という頻度であられる逆行を知っていた。アリストテレス以来、一様円運動する惑星ではありえないはずである。

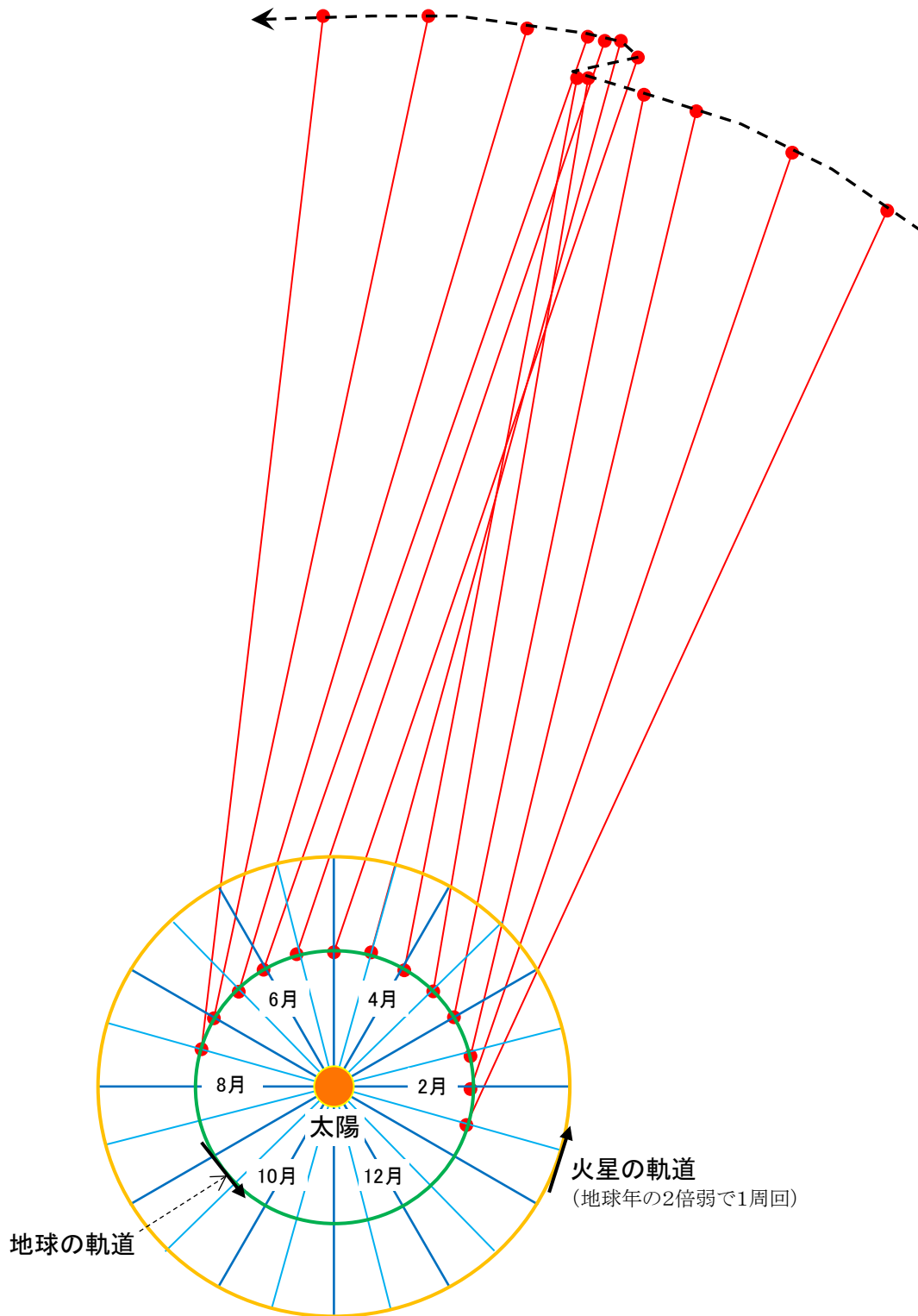
これを説明できなければならないから、彼は次図のように「周転円（エピサイクル）」を導入してその仕組みを説いた。しかしながら、これはギリシャ時代のヘラクレイデス(325BC)、ヒッパルコスやアポロニオス(230BC頃)などにより研究されていた。プトレマイオスは、アポロニオスの成果を引用したようであるが、いずれにしても大きな勘違いという前提に加えて、こじつけたような印象は、いまの私たちにはぬぐえない。

なお、この見かけの逆行では、真ん中で火星が一番大きく見えるのであるが、これがプトレマイオスに更なる格闘を与えた。それが離心円の導入である。



では、現代の地動説で幾何学的にみたら、見かけの「逆行」は本当に生じるのだろうか。参考図書を基に作図してみると次図のように稚拙ながらも再現できた。

### 火星の見かけの逆行: 作図例



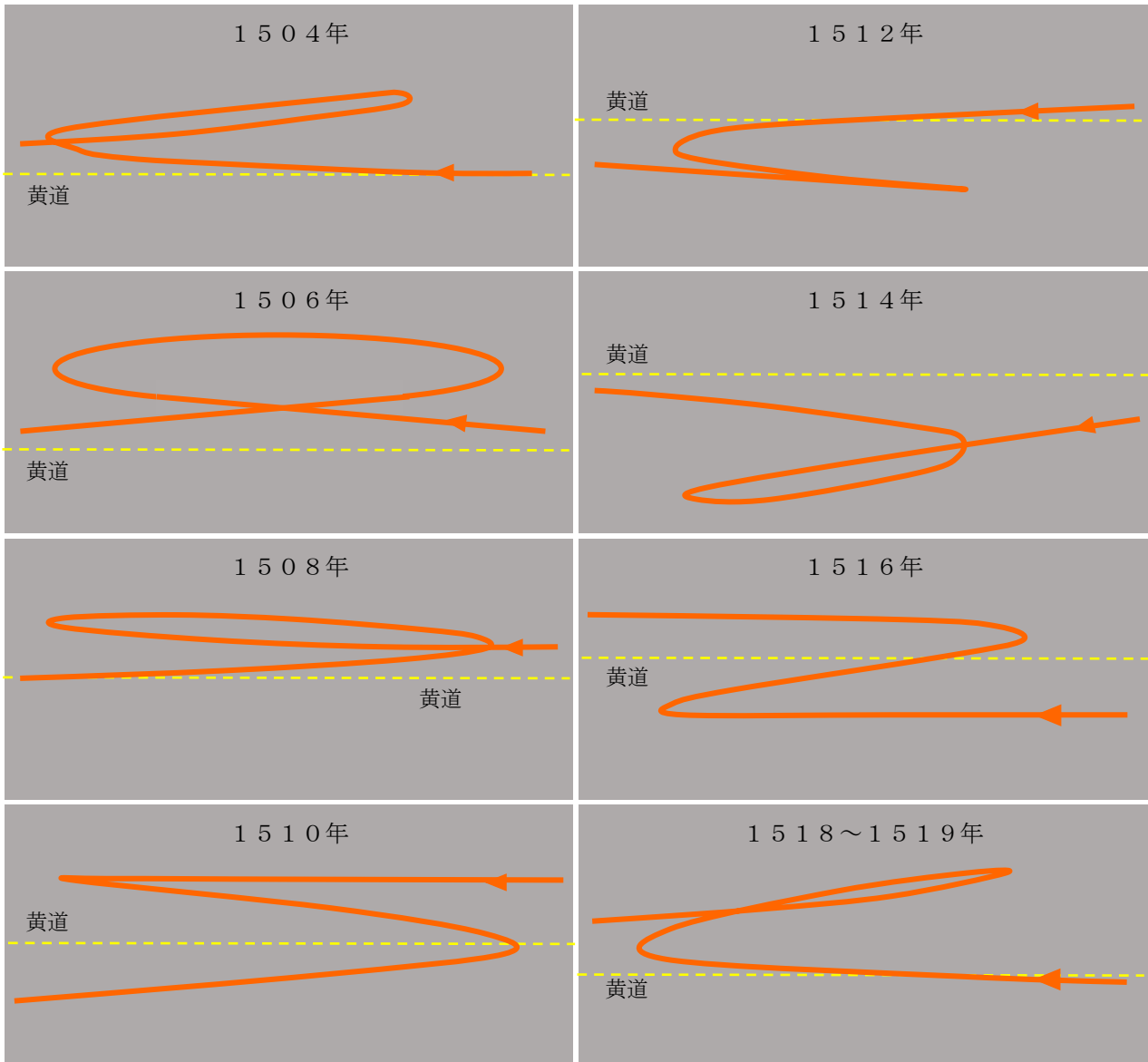
やはり、一様円運動とした現代の地動説でも見かけの逆行は説明できるのである。木星や土星

でも見かけの逆行は現れるが、火星よりも遠いことからスケールは小さい。とにかく外惑星で出る現象で、内惑星の金星や水星は夜空の中天に軌道が見えないので火星のようではない。

### (3) およそ2年に1度のさまよう惑星：「火星」

実は、火星の運動は「逆行」にしても一様でなくさまざまな見かけの曲線を描くことが、ギリシャ時代も分かっていた。つまり周転円だけでは説明しきれないのである。

ちなみに、コペルニクスが活躍していた1504年から1519年にかけて観測されたグニャグニャ軌道は、以下のように多様である。



参考：「コペルニクス」(大月書店)

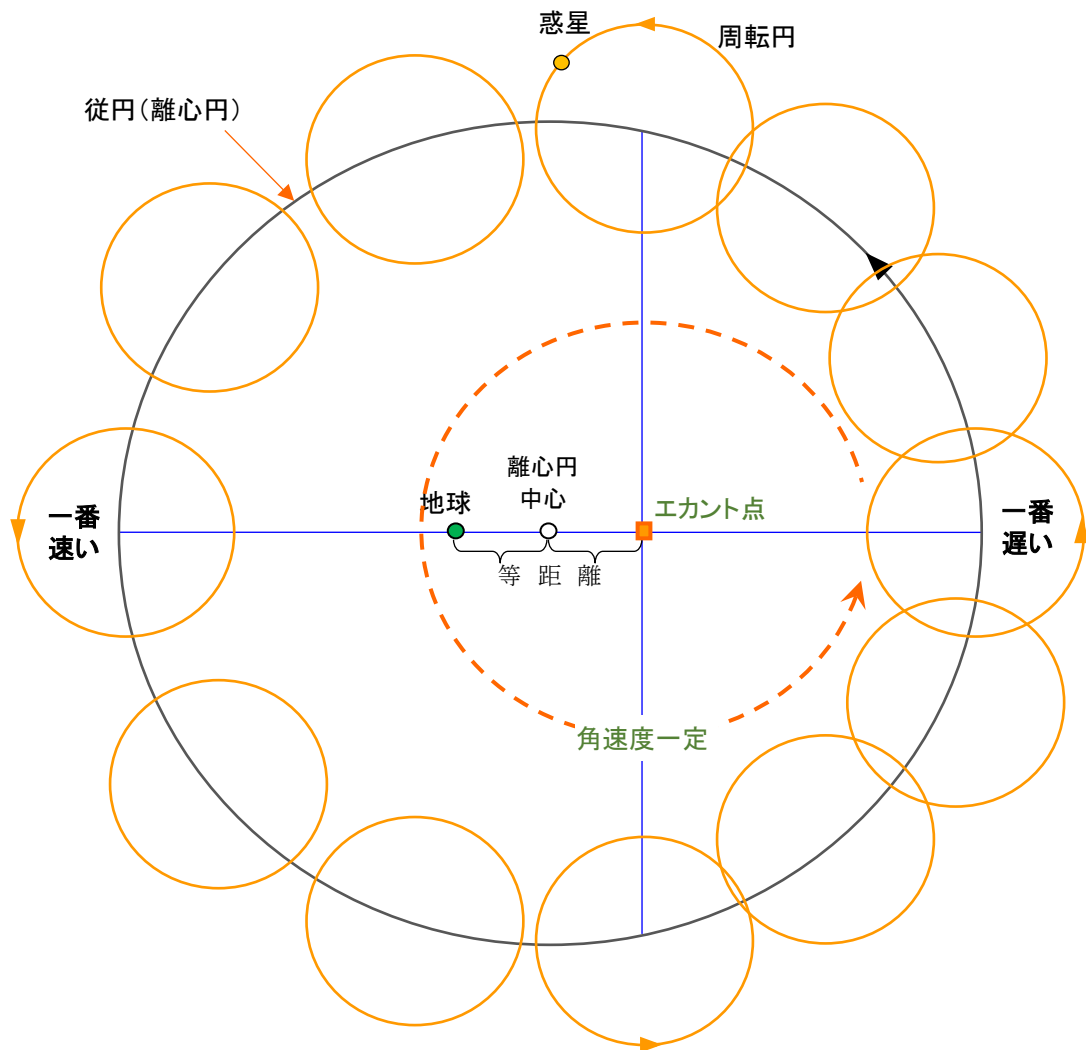
[注] 'planet'とは語源がギリシャ語で「さまようもの」という意味。

これに対する説明は、周転円説では離心円のほか、周転円が従円（または導円）の面からある角度で傾斜しているとした。いまでは、黄道面＝地球の公転軌道面に対するわずかな傾斜が惑星ごとにあるから、といえる。



さらに、火星の動きに速くなるときと遅くなるときがある。これについてもエカント点を定義してつじつまを合わせた。次のようにエカントを中心として等角速度円運動を描いてみると、見事に惑星の軌道と速度変化を説明できたのである。しかしながら、プトレマイオスはここでアリステレスの鉄則「一様な円運動」から逸脱してしまった。

‘アルマゲスト’におけるエカントの導入



これらの後付け複合理論には、彼の綿密な観測データに合うべきだとの徹底方針があった。それで、NHKのコスミック・フロント・ネクスト「コペルニクス」(2016.3.3)にて、複雑怪奇に見えるプトレマイオスの複合理論によるデータが検証された。協力者は国立天文台の天文学者である。舞台は、日本トップクラスの精度を誇る西東京のプラネタリウムであり、現代の惑星軌道論によるデータと比較したところほぼ一致した。

比較対象：147AD～148ADの火星の逆行現象

対比データ：アルマゲスト論から割り出した火星の赤経と赤緯データ

現代天文学で算出した火星の赤経と赤緯データ

[注] 赤経・赤緯とは、地球赤道を延長して定められた天の赤道を基準にした経度・緯度座標。

こじつけだらけとは言え、驚きである。1200年以上も重宝がられてきたことがすなおに肯ける。

双子の無人探査宇宙船ボイジャーが見せてくれた太陽系の外惑星、ローバーが降り立って見せてくれた火星の大地をテレビで寝そべって見ている現代の私たち。ケプラーの3法則で済むのに、と、短絡的な想いだけになってしまっている。回りくどい理屈をいっぱい使った、しかしながら、これほど精密なデータを提供してくれる『アルマゲスト』に脱帽するべきではないか。1200年もの文明の暗黒時代といわれたときを、翻弄されながらも黙々と支えてきた教本である。

歴史はコペルニクスのような勇者を待つしかなかった。

## コペルニクス (1473-1543)

彼はポーランド北部のトルンという町で生まれた。ときは、イタリアのメディチ家を中心に芸術・学問が盛んになっていたルネサンスの揺籃期にあった。地元の大学を出た後、イタリアに遊学したいと望み、それがかなえられた。ボローニア大学でギリシャ天文学と数学を学び、同時にプトレマイオスの『アルマゲスト』を知り、かつ天体観測も習った。ポーランドのヴァルミラ地方に戻ってからは叔父のあとを継いで聖職に就いたが、ときどき天文観測も行っていたようである。

そして30歳ごろから、アルマゲスト要約を精読して、数々の微妙な問題の研究に没頭した。その結果、その成果をまとめ『天体の回転について』という大作を書き上げて、地動説をとらえた。キリスト教の教えに真っ向から対立したのであるが。特にドイツのルターの宗教改革運動は、聖書原理主義を掲げカトリックに対置する“プロテスタント”派を号して活況を呈していたから、ルターの神経までも逆撫でしたであろうことは疑いない。

コペルニクス『天体の回転について』の外観を眺めてみよう。

(⇒は筆者コメント)

### 1. 宇宙は球形である

- ・理由はこの形が最も完全であること。水滴や万物はこの形をとる性質がある。  
⇒ この数学的意味は、寸法が同じあらゆる多面体の中で球形が表面積最小となること、である。

### 2. 大地もまた球形である

- ・どこでも中心に支えられている。
- ・星空の日周運動の極が、北へ行けば行くほど高くなる。
- ・エジプトで見られるカノープスがイタリアでは見えない。
- ・東方の人は夕方の日食や月食が見えない。西方では明け方に起きるそれらが見えない。
- ・船が陸から遠ざかっていくと、次第に陸地から見えなくなる。

### 3. 大地は水とともにいかにして球形をなすか

- ・土と水は一緒にただ一つの重心の方へ引き付けられている。
- ・アメリカはインドのガンジスと球の直径上で正反対に位置する。  
⇒ 「コロンブスのアメリカ大陸発見」は1492年の出来事である。
- ・地球はそれを取りまく水とともに丸い。月食の時月面に完全な円の周を映すように。
- ・地球は、エムペドクレスとアナクシメが考えたような平面ではなく、  
レウキッポスが考えたような太鼓の形ではなく、  
ヘラクレイトスが信じた舟の形でもなく、  
アナクシマン드로スが考えた円柱でもない。  
地球は完全な球形である。

#### 4. 天体の運動は一様で円いこと、あるいは円運動の合成なること

- 球のなしやすい運動は回転である。
- 最も顕著な運動は、日々の、地球を除いて全宇宙が東から西へ動いていくが。
- 異なった運動をする、西から東へ向かう五つの惑星がある。  
それらは、黄道（太陽の見かけの軌道）の上を動き、ときどき方向を変えてさまよう。  
また、ある時は地球に近づき（近地点）、あるときは遠のく（遠地点）。
- しかも、それらは不等な運動で、本来なら一様な運動をしなければならない。
- **それらのあるべき等しい運動が不等に見えるのは、諸々の軌道円の極がいろいろあるか、または地球が諸円の中心にないからとしなければならない。**
- だから、諸星の運動は近いとき（近地点）大きく見えることになる。  
⇒ アルマゲストでは離心円の設定。ケプラーの楕円軌道への発想。
- しかも、一定の時間に異なった距離を動くようにみえる。  
⇒ アルマゲストではエカント設定でしのご。これらがケプラーに楕円軌道の面積速度一定を思い浮かばせたのかもしれない。

#### 5. 円運動（公転）は地球にも当てはまるか

- 地球は円運動しているのか、また、その場所は宇宙のどこにあるか。
- 多くの書物では、地球は宇宙の中心にあるというから、その反対を考えることは笑われるだけである。
- 場所の見かけの変化は、物体（天体）の運動からか、それとも観測者（地球）の運動からか。地球が西から東へ回っていることを認めるならば、諸星の動きを注意深くしらべるならば、同じことを見出す。
- ピタゴラス派のヘラクレイドスらは、地球を宇宙の中心に回らせたのである。
- **例えば、惑星が近づいたり遠ざかったりすることから、地球がそれらの円の中心ではないことが必然的に導かれる。**  
⇒ アルマゲストにおける周転円や離心円コンセプト導入に対する。
- 地球に、日周運動のほかにもう一つ運動を加えることもありえる。すなわち、円運動（公転）である  
⇒ 三つ目の運動、自転軸が約26,000年かけて回る「歳差」運動であり、ギリシャ時代から知られていた。

#### 6. 地球の大きさに比べて天の無限なること

- 天は地球と比較して広大であること。
- そして無限の大きさという類のごとき観を呈するが、感覚上、天に比べて地球は、ある立体に対する点のようである。
- 地球という宇宙の極めて小さなものより、あれほど巨大なものが24時間で回転（天の日周運動）するとしたら我々は驚かざるをえないだろう。

- ・なぜなら、「中心は不動であり、中心に近いものはほとんど動かない」と言っていることは、「地球が宇宙の真中で静止している」ことを立証しないからである。

⇒ アリストテレス以来の地球不動説への疑問。

- ・「天が回転し、両極（天の北極・南極）は静止し、両極に近いものはほとんど動かない」と言っているのと同じである。確かに、シリウスよりもこぐま座のほうがゆっくりと動く。すなわち天球の中心に近いものはわずかながら動く。
- ・地球が天球の中心にあるというが、わずかに動くとしても、ある場所では常に昼で、他の場所は常に夜となるから、これがいかに誤りであるかは明らかである。結果、日ごとの日没は起こりえなくなる。太陽は違うといっても、全体と部分の運動は一つであり分離できないはずである。
- ・短い周囲に囲まれるものは、大きな円を囲むものより、速く回転する。「惑星のうちで最も遠い土星は30年で1回転し、地球に最も近い月は1月で1回転し、最後に地球は一昼夜で回転する」と考えられる。

#### 7. なぜ古代人は地球が不動で宇宙の中心であると考えたか

- ・重いものはすべて地球へ向かって動き、その内部へ沈んで溜まろうとする。
- ・そこで地球は中心に静止している。
- ・アリストテレスは、単純な物体の運動は二つあり、円と直線である、直線は上に向くか下に向く、と言った。
- ・下に向くのは重い水と土で、上に向くのは空気と火である。
- ・天体には中心の周りを回る運動が与えられことは適切のようにみえる。
- ・24時間の日周運動で地球が回るとすると、強い力で結びつけられてないなら、地球はちりぢりになってしまう。

⇒ 現在の数値で計算すると、地球表面では、自転速度が確かに秒速463mであるから、想像できる話ではあるが。ジェット旅客機は、秒速300mぐらいで飛んでいるけれども、宇宙に放り出されていない。ニュートンの計算によれば、宇宙への脱出速度は秒速11km以上となる。しかし、そんな恐れをいだくなら、どうして回っているとした太陽や恒星球に考えが及ばないのか、主観という独善ほど怖いものはない。

#### 8. 前章の理由の不十分なること、および反論（★で示す。）

- ・プトレマイオスは、人工的でなく自然に働く回転によるなら地球は散り散りに破壊されないという。

★しかし、天よりも運動が速く、地球よりはるかに大きい宇宙に関して、なぜ彼は同じことを心配しないのだろうか。

★回転運動の力によれば、宇宙はますます高くなり、回転円周もますます大きくなる。逆に大きくなればますます速さが増す。

⇒ 現在では、それを「遠心力」と言うようになった。

★すると、「無限であるものは通り抜けることもできず、動かされることもできない。」という（アリストテレスの）物理学の公理によって、天は静止しなければならない。

- ★そこで、我々は限界が知れない宇宙全体を動かすよりも、地球に対してその円運動を与えることを躊躇できようか。
- ★航海者は外の海やすべてが動いて見えても、船内の人や一緒にあるものは止まって見える。同様に、地球の運動においても地球にあるものすべては、地球と一緒に動いていても、空気さえも地球では止まって見える。
- ★アリストテレスが単純な運動を「中心から・中心へ・中心の周りの」という3種類に分けたことは、我々が直線・点・面と区別するのと同じ知性の働きに過ぎない。
- ★不動という状態は、変化・不定の状態よりも一層高貴で神聖と考えられるが、後者は宇宙よりも地球にふさわしい。
- ★以上の考察によって、地球が動くという方が地球は不動というよりも、一層確からしいことが分かる。

#### 9. 地球にいろいろの運動を与え得るか、また宇宙の中心について

- ・地球が天のすべての回転の中心でないことは、惑星の見かけの不等の運動、および地球からの距離の変化によって説明されるが、これらのことは地球の同心球では説明されないのである。
- ・宇宙の中心に関して、それは地球の重力の中心であるか、あるいは他のものであるか。
- ・少なくとも、重力は自然の欲求にほかならぬと思う。
- ・その部分が球の形に結合して一にして全体であるように与えられたものである。
- ・もし地球がその中心の周り以外の運動をするならば、それは多くの現象にあらわれなければならない。それは年周運動である。
- ・**太陽を不動としてその運動を太陽から地球に移しても恒星の出没は同じようになる。**
- ・**惑星の留・逆行・順行はそれらの運動によるものではなく、地球の運動によるものであり、見かけの現象はこのために起こることが分かる。**
- ・結局、太陽は宇宙の中心を占めていることが承認されよう。

#### 10. 天体の軌道の順序

- ・恒星の天は、最も高いことに異論はないだろう。
- ・等しい速さをもつものは、遠いものは遅く近いものは速い、とエウクレイデス（ユークリッド）により証明されている。
- ・古代の学者たちは、月は地球に最も近く最も短い時間で一周し、最も小さい円を描く。土星は最も高いから、最も長い時間で一周。その下に木星、火星がある。水星と金星は意見が様々であった。
- ・彼らは、地球から月までの距離は64と1/6（地球半径：1）であって、太陽までの距離：1160（地球半径：1）のなかでおよそ18個分に相当する。こんなに広い場所が空虚であるはずはない、という。
- ・そうして、月の最大距離の次に水星の最小距離がきて、水星の最大距離の次に金星がくるとした。金星の最大距離はほとんど太陽の最小距離に達するというのである。

- ・惑星は、自身の光か太陽の光が全体にしみこんで輝くとした。
- ・とにかく彼らは水星・金星が太陽の円の下を動いていると判断した。
- ・ラテン人（ローマ時代）が、金星と水星は地球の周りを動くのではなく、太陽を中心としてそれらの軌道を動くという見解をとっていた。
- ・この太陽中心へ土星・木星・火星をもって行くとしても、それらの軌道の大きさは地球を含むものとすれば、ほとんど誤りではないだろう。
- ・惑星は夕方の方のぼってくる時、すなわち惑星—地球—太陽の配置にあるとき、いつも地球に最も近いことは確かである。反対に、惑星が太陽の近くにあるとき、地球—太陽—惑星の関係にあるとき、地球から最も遠い。これらのことは、それら（惑星）の中心がむしろ太陽に関係していることを十分に証明している。
- ・金星と火星の軌道の隙間は二つの球と同心の球をなしており、月を伴った地球をこの隙間に受け入れることが必要である。月は疑いもなく地球に最も近いから、月は地球から離すことはできない。
- ・ゆえに、我々は地球と月を含む全体が他の惑星の間を、太陽の周りに1年で1回転すると認めるのである。
- ・太陽は宇宙の中心で不動であり、太陽の運動と見えるものはすべて実は地球の運動である。
- ・太陽～地球の距離は、他の惑星の軌道に比べると認め得る程度の比であるが、恒星球に比べるとゼロである。
- ・これは、地球を中心に考える人々があまりに多くの球によって理論を混乱させるよりも、はるかに容認し易いことと思う。
- ・我々は、少なくとも数学を軽んじない人々に対して以下に明らかにしよう。  
すなわち、「円軌道の大きさは時間の大きさで測られる」という第一の法則を認めるならば、これより適切なものは提案し得ないだろう。



<http://www.geocities.jp/rekikyo02/pdf/111119a.pdf>

- I. 恒星の球。これは自分自身を含めてすべてを包む。また、不動である。
  - II. 土星 30年で1回転
  - III. 木星 12年で1回転
  - IV. 火星 2年で1回転
  - V. 地球 第四の場所、1年で回転。月の軌道を一緒にもっている。
  - VI. 金星 9ヶ月で1回転
  - VII. 水星 80日で1回転
- 真中に太陽が静止している。

また、太陽～地球間を25単位にすると、  
 火星=38単位 (1.52倍)  
 木星=130単位 (5.2倍)  
 土星=231単位 (9.24倍)  
 となり、現在の値に比べてそんな色ない。

- ・この美しい殿堂のなかで光り輝く太陽を、四方を照らせる場所以外のどこに置くことができようか。



## 1.1. 地球の三様の運動についての論証

- ・第一は、昼と夜の固有回転である。地軸の周りに西から東へ向かい、それに応じて宇宙は逆方向に運ばれるように思われる。
- ・第二は、地球の年周運動である。西から東へ太陽の周りに黄道円を描いている。
- ・赤道と地軸は変化する傾き（地軸の傾斜）がもっと理解されなければ、昼夜の長さの不等性は現れない。
  - ⇒ 当時は、まだ、太陽が不動の地球赤道面から傾いている黄道面を動いているからと解されていた。
- ・第三は、傾斜の運動がなければならない。それは同じく1年で回転するが、逆の方向、つまり地球の中心の運動とは反対の方向に向かっている。
  - ⇒ その傾斜を地軸の傾きが黄道面の傾きと同じである。実際は黄道面が基準であり、地球の赤道面が傾いているすなわち地軸が $23.5^\circ$  傾斜しているのであるとして、同じく昼夜の長短があらわれることを説明。
- ・ところが、中心の年周回転と傾斜の年周回転はほぼ等しい。“ほぼ”というのは、わずかなズレがあるからである。プトレマイオスから我々の時代に至るまでそのズレは21度にも及んでいる。
  - ⇒ 今や、地軸の「歳差」運動として認識されている。コマが高速回転しながらも軸をゆっくりと回すのと同じ現象である。1年間に約50秒角ほど動き、一周するのに25,920年かかる。だから、エジプト時代の北極星はいまのものとは違って、りゅう座の $\alpha$ 星であったという。

[参考：「コペルニクス著：天体の回転について」矢島裕利著 岩波文庫]

以上が、コペルニクス『天体の回転について』の第1巻総括の概略である。全体は6巻からなる膨大なものであり、数学的記述を交えて緻密さを極めていているという。この出版については、教会へ気を使って晩年まで躊躇したが、友人たちの薦めもあって思い切ったそうだ。そのため、友人オジアンダーは前書きのなかに無断で「仮説」という言葉を入れてしまったから、カトリックやプロテスタント協会を余り刺激しなかった。刷り上がったのは、コペルニクスの死の前日だったので彼はそれを認識せずに他界した。

結局、コペルニクスが明らかにしたアルマゲスト・コンセプトの問題は次の三つである。

### 周転円、離心円、エカント

数十年後、この大作に影響された傑人が二人出た。ガリレオとケプラーである。

### 《発想転換のポイント》

コペルニクスは、聖職者ということから占星術に長けないといけない。アラビアではランドマークが皆無の砂漠を旅しなければならない。このため重宝がられた。彼は当初の目的でアルマゲストを精読していくうち、習った天文学と数学を使いながら「検証」という姿勢に変わったのではないか。

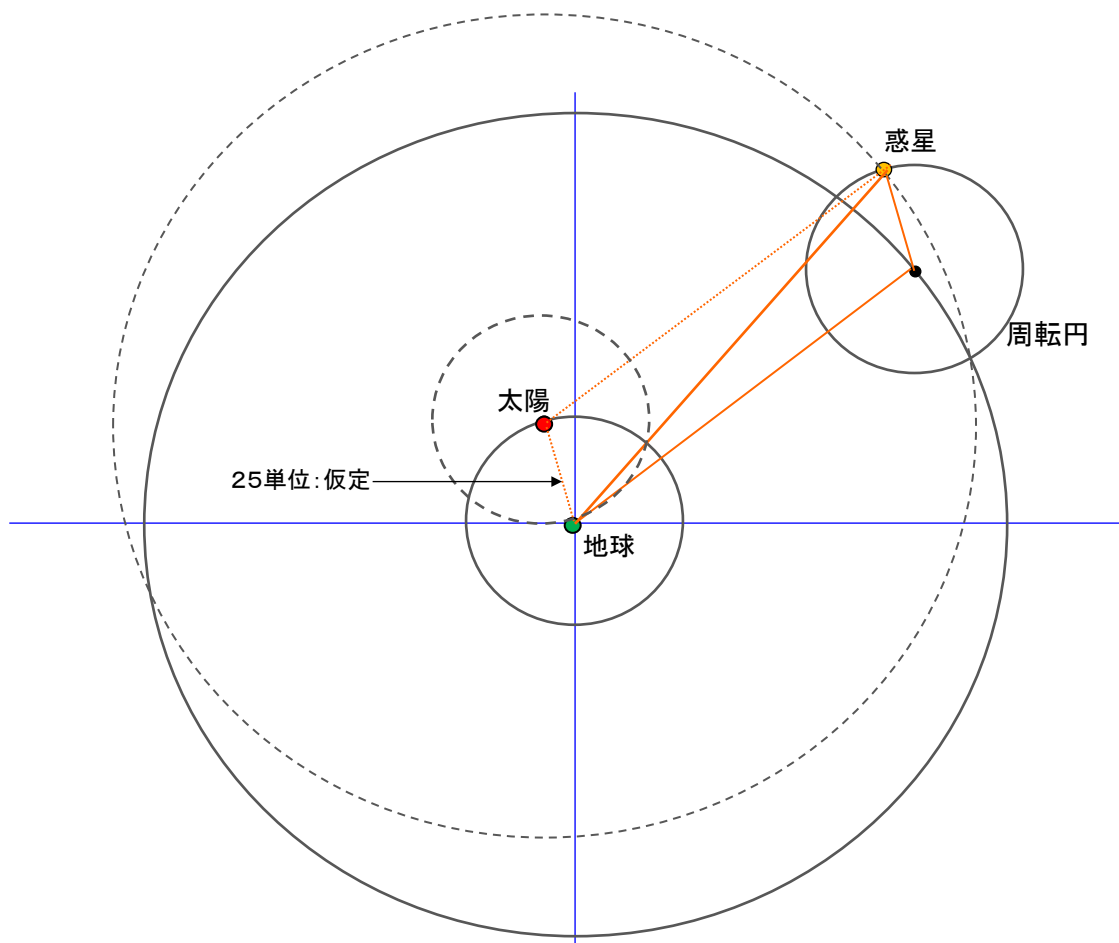
そして、いくつかの不可解なアルマゲストの問題に当たったといわれる。

#### (1) 春分・夏至・秋分・冬至のズレ

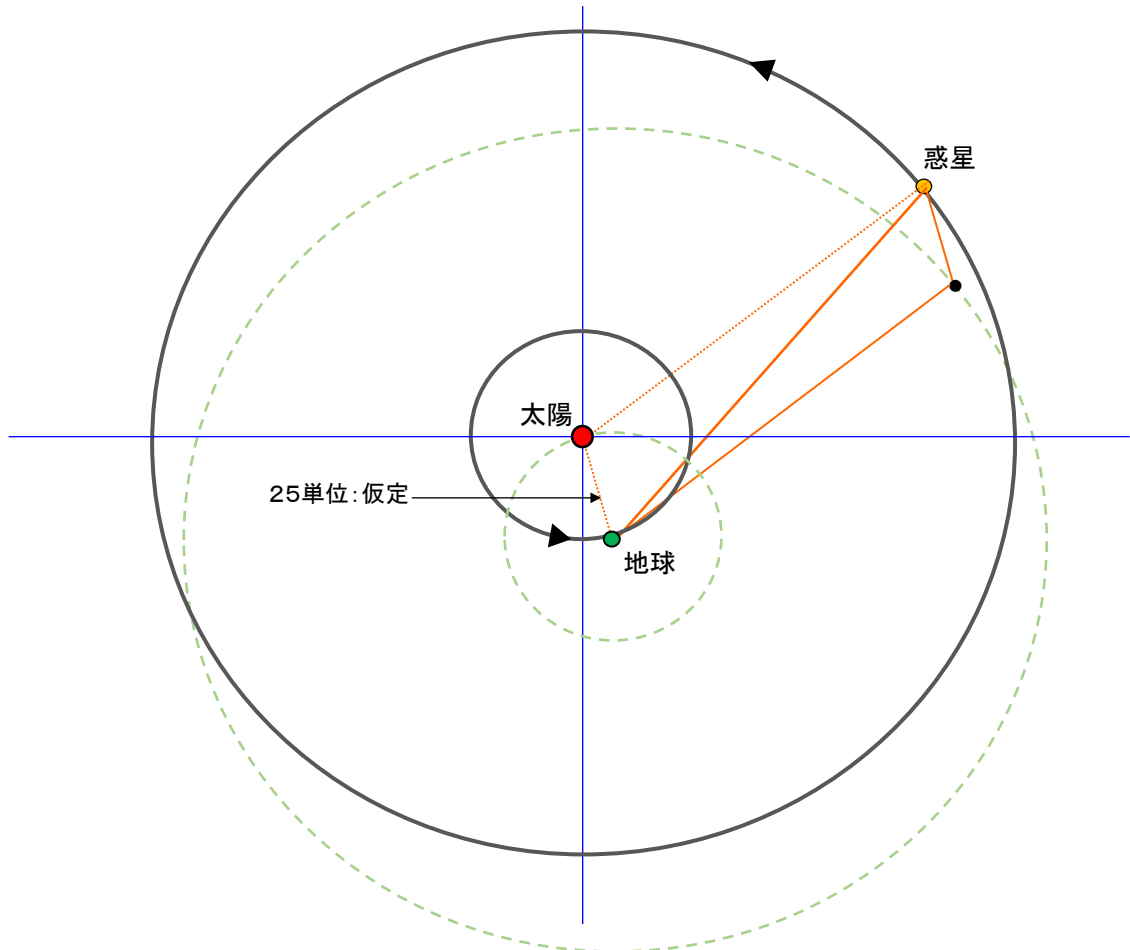
現実の一例を挙げると、春分から夏至までが92.75日、夏至から秋分までが93.75日、秋分

から冬至までが89.75日、冬至から春分までが89日であり、1年365日の $1/4=91.25$ 日とはなっていない。これがギリシャの学者やプトレマイオスを離心円のアイディアに導いたという。しかも、惑星の軌道円にも延長して既に述べたとおり「見かけの逆行」を見事に説明した。ただし、太陽には適用されていない。ところが、「逆行」は太陽中心の地動説でも説明できるのは、やはり意味がないのではないか。

- (2) 一等星アルデバランが月の星食による隠れる時間：1497年3月  
アルマゲストの予測値よりかなり短いことが観測された。このことは、月の大きさの変化について、アルマゲスト論から導かれる大きさより現実はいくらか小さいことを意味し、疑問が生じた。
- (3) 1504年7月に起きた水金火木土の五つの惑星の大集「合」現象  
「合」とは、二つ以上の惑星が同じ方向に縦に並ぶことであり、惑星軌道面＝黄道面では一列になることである。この大集「合」をコペルニクスが精密に観測した結果、アルマゲストの値より火星は $2^\circ$ 、土星は $1.5^\circ$ ちがった。これがコペルニクスにさらなる疑いを抱かせた。
- (4) 周転円の対称性あるいは転換性  
コペルニクスは、周転円による惑星の軌道を試行錯誤しながら検討していたとき、周転円自体が地球にも適用される図に思いついた。周転円は、実は対称性あるいは転換性をもつのではないだろうか？ アルマゲスト論は次図のごとく説明した。



そして発想転換すると次の図のようになる。なんと、太陽が中心になることもあり得るではないか。地球が回転するのだ。人工的にプトレマイオスらが導入した周転円が消えてしまう、いや不要となる。



これによりコペルニクスの発想の大転換が行われたといわれている。ただし、地球軌道円の25単位の所以は、「天体の回転について」の第2巻以降を読まないとは判明しないのではないかと考えられる。コペルニクスは結論目標を得て、帰納的に論証するポリシーを立てたのである。すなわち微分アプローチである。

今の私たちには、周転円自体はその中心に強い重力を持つ何かがあって初めて成り立つゆえにあり得ないと、即座に判断できるが、この時代まではケプラーとニュートンがいなかった。

ようやく、太陽中心の地動説が産まれた経緯が判明した。しかしながら、コペルニクスは離心円やエカントの問題は指摘しても、棚上げせざるを得なかったようであり、それゆえにケプラーの登場を歴史は待ち望んだと言っても過言ではないだろう。

大作「天体の回転について」は、物理実験の鬼ともいべきガリレオ (1564-1642) を感銘させ、地動説こそ本物であるという信念を植え付けた。発明されたばかりの天体望遠鏡を手に入れて細

密な観測の結果、木星の衛星をみつけそれが回転していることを掴んで、太陽の周りを回る地球はもっともなことであると唱えた。それから、金星の満ち欠けを発見して、月が地球を回るように金星は太陽を回っているのだと主張した。宗教裁判までは至らなかったがカトリック総本山：バチカンの命令で幽閉されてしまった。しばらくして解放されたという。

彼の功績は、発見した木星の四つの衛星の名付け親として残っている。それは、ガリレオ衛星として木星に近い順からイオ、エウロパ、ガニメデ、カリストという命名である。これらの衛星名は木星(ジュピターまたはゼウス)の愛人の名前から取ったものと伝えられている。

## ケプラー (1571-1630)

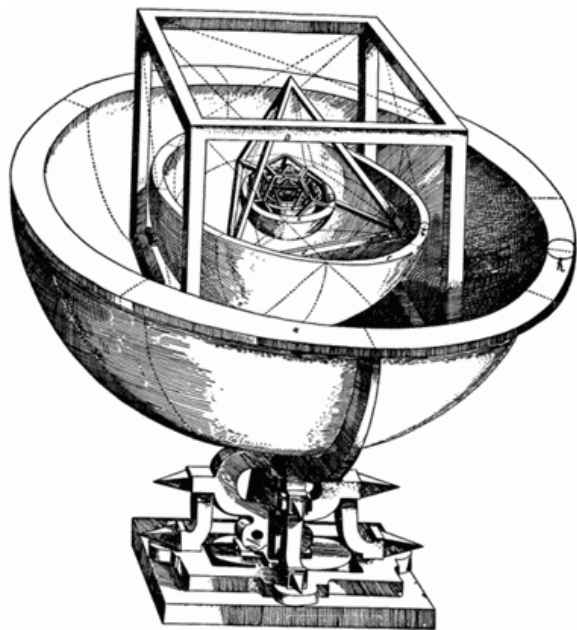
ヨハネス・ケプラーはドイツ人である。ドイツ南西部のワイルという町にて未熟児で生まれ、育った。家も貧しかったが、才能はそれを突き抜けていたから、給費生として学校に通うことができ、チュービンゲン大学に入学できた。この大学でコペルニクスの太陽中心の地動説に傾倒し、天文学の研究に没頭した。1595年、グラーツのギムナジウムで数学教師をしていた時には、すでに、新たな発見を確信したという。まもなく「宇宙の神秘」を出版した。その中で掲げられている新発見は、正多面体：正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体による宇宙の構造である。

その形は、右の図のとおりであるが、これはコペルニクスも温存した天球殻の概念にメスをいれたものである。水金地火木土という惑星間の五個の間隔に五種類の正多面体を当てはめた。内側から、正八面体、正二十面体、正十二面体、正四面体、正六面体を挿入すると、それらはすぐ外側の球殻に内接し、かつ、内側の球殻の外側にも内接することを見つけたのである。しかし、なぜ惑星が6個しかない理由も解明されたと考えてしまったのか。ずっと後に、天王星、海王星が発見されることは知る由もない。

なお、正多面体は五種類しかないことは、エウクレイデス（ユークリッド）『原論』にて証明されていると聞く。あたかも、川中の公園にかかった複数の橋（ケーニヒスベルクの7つの橋）を一筆書きで渡れないことを、オイラーが証明したことと同様であろう。すなわち、否定の証明である。

そして、グラーツにいる間に、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエ（1546-1601）から招請を受け、彼の助手に就いた。ブラーエは、その当時はチェコのプラハで王室お抱えの天文学者として活躍していた。それ以前は、デンマークのフヴェーン島で天文台を保有し、優れた観測機器を使い、膨大な星々の精密データを何十年も記録し溜めていた。彼は、月の“ティコ・クレーター”や超新星：SN 1572の観測でも有名である。

ブラーエは、不運にもケプラーという頭脳を抱えた1年後に病気で逝去してしまった。ケプラーはブラーエが残した貴重な大量データを基に、地球に最も近く、謎を秘めた運動をする火星軌道の研究に取り組んだ。

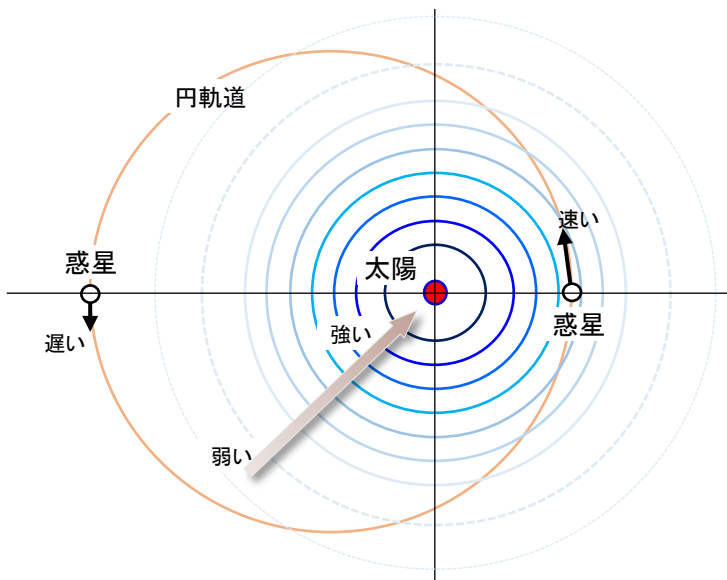


<http://fumio.music.coocan.jp/tuki52.htm>

このピラミッドみたいなデータ・バンクと、まともにケプラーは格闘した。8年ほどかけてようやく第一法則と第二法則にたどり着き、驚異的な600頁を超える精密極まりない「新天文学」を著わした。

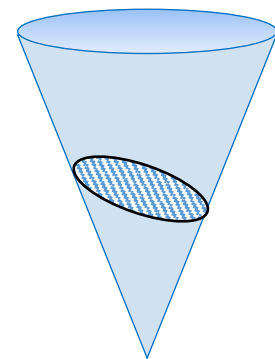
研究ポイントは、「惑星の運動速度の不整すなわち速くなったり遅くなったりすること」である。もともとアルマゲストではエカントが設けられたが、これを説明するためのケプラーのアイディアは、なんと太陽に磁気力のような**引力**があるのではないかという仮説である。ニュートン(1642-1726)のお株を奪う発想ともみえるが、時は万有引力が定義・証明される50年ほど前である。むしろニュートンが美味しく飽食したのである。

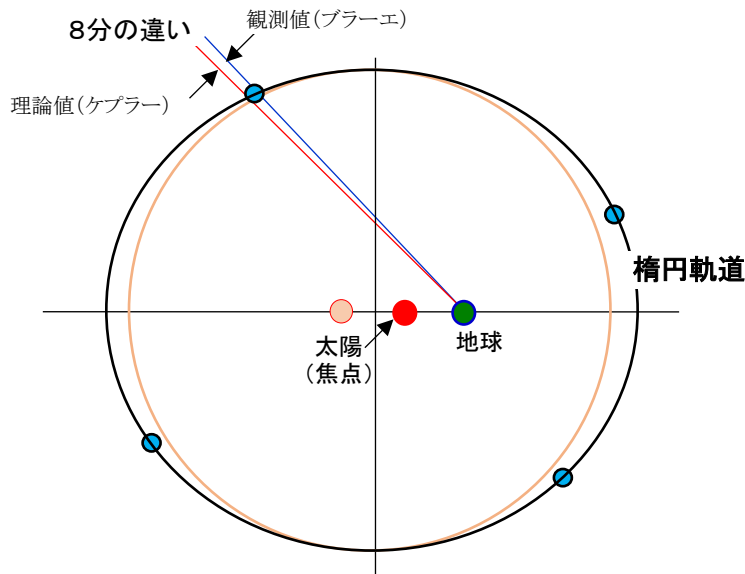
そして離心円の中心に太陽を置くとその**引力**の作用が近日点で強いため速く、遠日点で弱いため遅くなると説明できた。(下図)



次の問題は惑星の軌道円であり、この中心がどこにあるのか、になった。ブラーエが残したピラミッド・データから火星の軌道4点を選び中心を求めた。70回ほどの計算の結果、なんとか円が当てはまったが、惑星のある位置が計算とブラーエのデータと8分違った。これに悩んだ末に他の点もわずかにずれていることから、楕円の適用を思いついた。楕円軌道の計算にブラーエのデータはことごとく的中した。しかして、ケプラーはあらためて緻密なブラーエのデータに、事実データの価値に脱帽したということである。

楕円は、アポロニウス(BC262頃-BC190頃)による円錐曲線の一つであり遠くギリシャ時代から研究されてきたものである。円錐を斜めにカットすると楕円になる。垂直に切れば双曲線、円錐の側面の傾きに沿って切れば放物線になる。すべて二次方程式で表されるから中学の数学ではまとめて二次曲線という。





[NHKコスミック・フロントNEXT「ケプラーの真実」2016.8.11より]

すなわち、第一法則が確定したのである。

### 「惑星の軌道は太陽を焦点とした楕円である。」

これにより、ダニのような離心円概念を払拭できたのである。

そして、第二法則まで明らかになった。

### 「惑星の回転運動においては面積速度一定」

エカントというプトレマイオスの苦肉の策まで抹消できた。つまり、楕円軌道をまわる惑星は、近日点で速くなり、遠日点に向かうと遅くなる現象である。火星は明らかに明るく大きくなる近日点で動きは速くなる。アリストテレス以来の「一様な円運動」を見事に覆したのだから、当時の科学者・天文学者に限らず私たちのような天文マニアも含めて溜飲を下げたにちがいない。まさに、がんじがらめの呪縛が解けたのだ。

さらに、天然痘流行で妻と子を失いながらも、さらに10年かけて、第三法則、

### 「惑星の軌道運動周期：Pの2乗は太陽からの平均距離：Rの3乗に比例する」

$$(\text{惑星Aの} R^3/P^2 = \text{惑星Bの} R^3/P^2 \text{ ともあらわされる})$$

を築いた。たぶん、ブラーエが残した膨大な観測データから数万回以上の試算を経て得たものと考えられる。

これにより、地球のRとPが判って他の惑星の周期P'が判れば、その惑星から太陽までの距離R'が計算できる。遠く離れた友人ガリレオが発見したばかりの木星の四つの衛星においても、木星を焦点にした楕円軌道で同じ法則があてはまった。いかほど天文学者を楽にさせたか、推して知るべし。これこそ、ケプラーの真の独創でニュートンに証明苦という宿題を残した。



たとえば、地球と火星で試算すると次のようになり、ほぼ一致する。

$$\text{地球の [軌道半径}^3] \text{ / [軌道周期}^2] = (1.5\text{億km})^3 / (365\text{日})^2$$

$$\text{火星の [軌道半径}^3] \text{ / [軌道周期}^2] = (1.52\text{倍} \times 1.5\text{億km})^3 / (1.88\text{倍} \times 365\text{日})^2$$

$$= \{(1.52\text{倍})^3 / (1.88\text{倍})^2\} \times \{(1.5\text{億km})^3 / (365\text{日})^2\}$$

$$= 0.99 \times \{\text{地球の比率}\}$$

火星の長半径を使ったが、平均軌道半径にすればさらに1に近づくにちがいない。

エドモンド・ハレー（1656-1742）が1682年に現われた彗星（今はハレー彗星と呼ばれている）を観測して、その長楕円軌道の周期が約76年と計算できたことにも少なからず貢献できたはずである。それ以前、1531年、1607年と過去2回も確認されてきた彗星が同じものということも決定できた。彼はニュートン力学のおかげだと言ったらしいが、ケプラーの三法則が基になっていることは誰も否定できない。

ただ、ティコ・ブラーエの精密なピラミッド・データがあったからで、これを私たちも忘れることはできない。

ケプラーは、コペルニクスとは反対に「積分」方式で結論を得た。つまりデータの分析から始めてその組合せを積み上げて何十回も検証するという奮闘を経て『楕円』という答えにたどり着いたのだ。最初から、楕円という発想目標はなかったのである。

#### <楕円について>

楕円の定義は、  $p + q = 2a$ （一定）

楕円の方程式は、

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

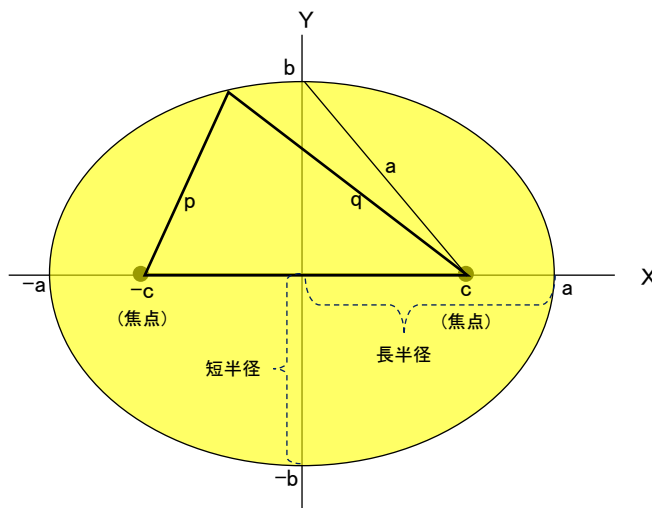
焦点は、  $c^2 = a^2 - b^2$

離心率は、  $e = \{\sqrt{a^2 - b^2}\} / a = c/a$

これら二つの焦点は長半径  $a$  を半径として短半径  $b$  あるいは  $-b$  を中心で円を描けば求められる。

太陽をいずれかの焦点に置くと、惑星は楕円上を動くことになる。そして、一番近い所が近日点、一番遠い所が遠日点という。

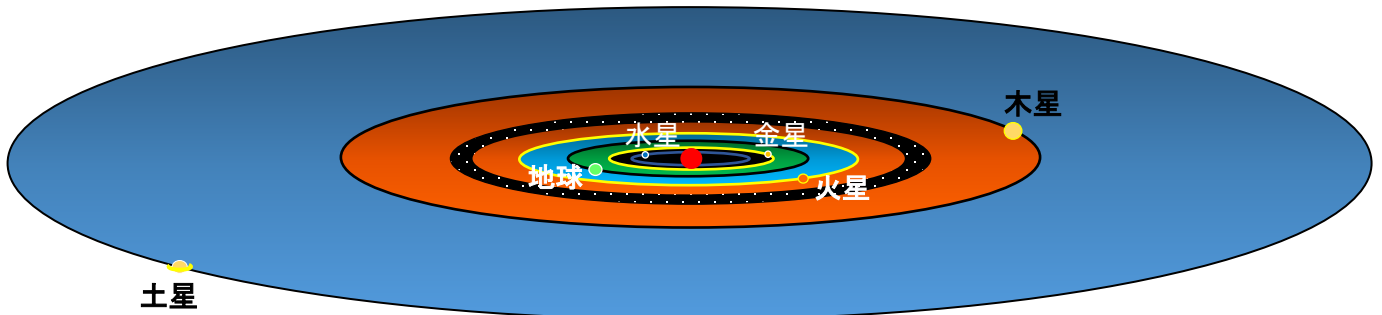
➡ 楕円の作図は、焦点となる2点に画紙で1本のゆるめの糸を止めて、鉛筆の芯でゆるんだ糸をピンと引きながら、なぞれば出来上がる。



ついに決着をつけた惑星運動、ケプラーは神聖ローマ帝国のルドルフ2世の勅命により、1627年に天文表を作成した。それが『ルドルフ表』である。数年後までの黄道12宮（星座）に沿った諸惑星の位置情報が計算されて載っている。当時の占星術には欠かせないものであった。

そして、私たちの常識になっている次のような太陽系が現われた。

惑星の回転円盤は、地球公転面すなわち太陽黄道面が基準になっており、ほとんどの惑星軌道の傾斜角は $3^{\circ}$ 以内、金星が $3.4^{\circ}$ 、水星は $7^{\circ}$ と一番ぶれている。



太陽～地球間：2.5 単位

火星 = 3.8 単位 (1.52倍)

木星 = 13.0 単位 (5.2倍)

土星 = 23.1 単位 (9.24倍)

(コペルニクスの使用した値)

## 太陽系の拡がり

コペルニクス、ケプラーからニュートンにより太陽系の惑星達は、運動方程式という架空の知能形態にも載せられたのである。ニュートンは、ケプラー没後50年ほど経って、1686年に偉大な名著

### 『プリンキピア (Principia) 』

を著わした。ついにケプラー三法則は、数学（幾何）を駆使して解読され、運動方程式で記述されることとなった。さらに、軌道を惑星が動く速さが軌道位置にしたがい絶えず異なるということについて、数学的表現においては革新的な「微分・積分」手法を導入し、それまで拘らざるを得なかった「一様な円運動」という古来の概念を鮮やかにくつがえしたのだ。すなわち、いつも変化している惑星の速度を微分すると加速度になり、 $F = m a$  という力の基に寄与し、動いた距離は速度を積分することにより求められるということである。運動方程式では、惑星の楕円軌道が釣合いという原理、すなわち、

- ・ 中心太陽の引力（重力）
- ・ 楕円をまわることによる遠心力（慣性力）

という二つの力が釣り合うことで成り立つことが解き明かされた。しかも、ほぼ永遠に安定して回る究極の物理ともいえる。実は、反対に太陽も小さな惑星からの重力を受けて同様に無視できるほどわずかに回っている。地球も月の重力を受けて僅かに回転しているから、干潮・満潮が起きている。

そして、今や誰でも数学を修めれば惑星の軌道を計算して予測できるようになったのである。いってみれば、冬の夜長に学生たちが炬燵にあたりながら物理問題を解くように、世界中の科学者達を楽にさせた。このことは、理論物理学者を育てる、知という豊穡の実りを育てる苗床にもなったと言っても過言ではない。

その後、イギリスの天文学者ウィリアム・ハーシェルにより1781年、7番目の惑星である**天王星：Uranus**が発見された。このUranus：ウラナスは、ギリシャ神話における天の神ウーラノスのラテン語形である。

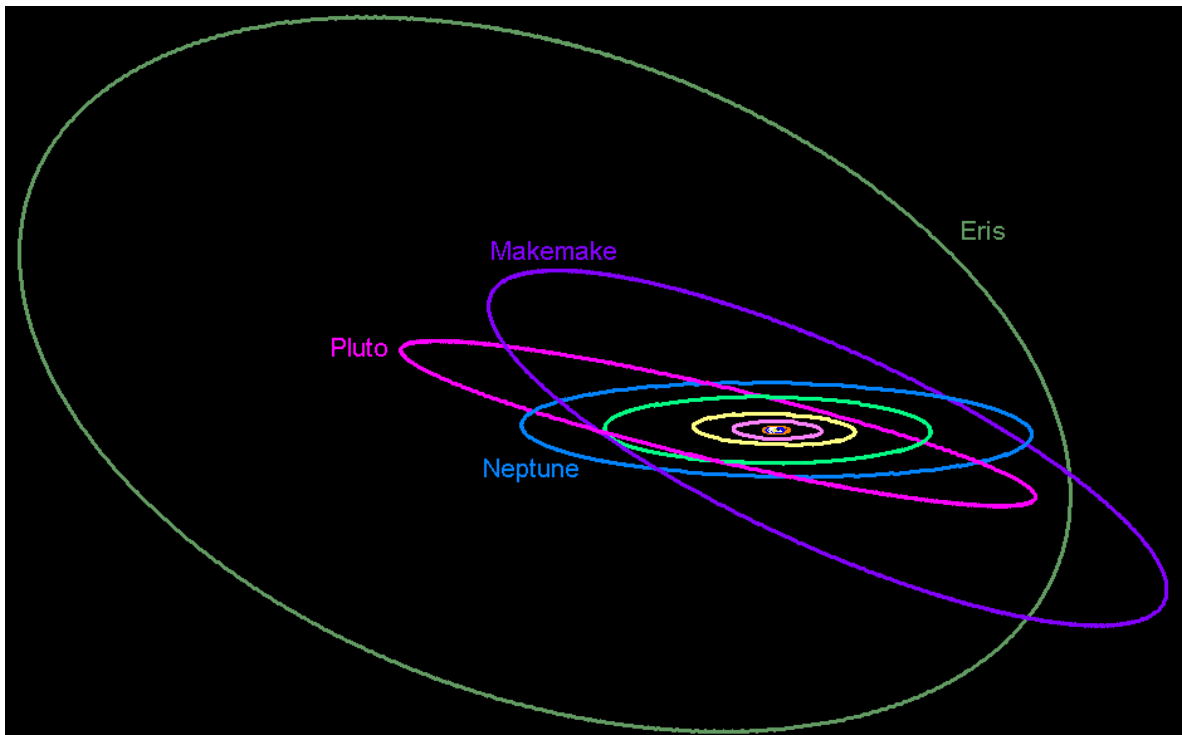
次に、海王星は、天王星の軌道が天文力学の計算に合わないのは、その外側にさらに惑星があるという疑問が湧き立った。イギリスでは天文学者ジョン・クーチ・アダムスが、フランスでは天文学者ユルバン・ルベリエが計算をし、ルベリエの依頼を受けたドイツの天文学者ヨハン・ガレが1846年、ベルリン天文台での観測で**海王星：Neptune**を発見した。Neptune：ネプチューンとは、ローマ神話における海神ネプトゥーンにちなむ。

もうこれで全ての惑星が見つかった、と世界中の天文学者が思い込んでいたが、米国のローウェル天文台のクライド・トンボーにより**冥王星：Pluto**が1930年に発見され、2006年までは太陽系第9惑星とされてきた。このPlutoという名称の由来はローマ神話に登場する冥府の王である。ディズニー・アニメに出てくるプルートという間抜けでお人よしのバカ犬と通じるように、太陽黄道面になく傾斜角： $17^\circ$ で長楕円軌道を持った「迷える惑星」でもある。ところが2005年に同類の**エリス**が発見されるに及んで、幾つもの冥王星もどきが次々に見つかった。なお、エリス：Eris

とはギリシャ神話の不和と争いの女神である。エリスはその名のとおり世界天文学会をもめにもめさせて、ついに冥王星は惑星定義から外され、準惑星 (Dwarf Planet) 群に追いやられた。つい、最近の出来事である。

なお、核分裂で有名な元素ウラン、ネプツニウム、プルトニウムは、これらの命名をなぞっている。原子の周期律表の最後部分に登録されることになったからであろう。

### プルート、エリスの軌道



<https://jp.pinterest.com/pin/370913719290199449/>

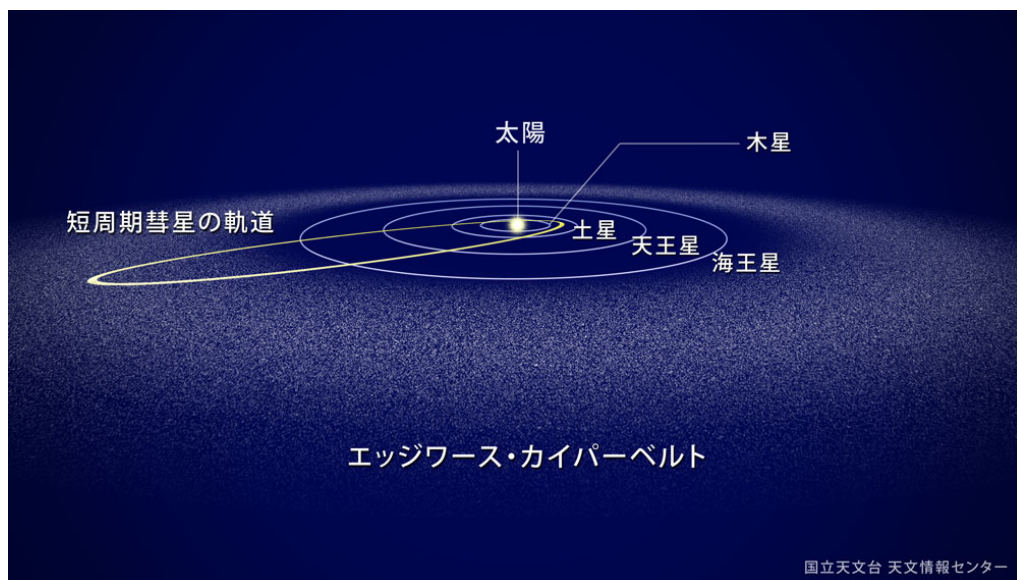
### [エッジワース・カイパーベルト]

1992年、うお座の中で1つの小惑星が発見された。ふつうの小惑星とは大きく軌道が異なっていた。ほとんどの小惑星は火星と木星のあいだをまわっているのに対し、この星はなんと海王星の外側をまわっていた。このような星はその後続々と見つかり、現在では1000個以上もの数になっている。このような天体が太陽系外縁天体とよばれる天体で、現在では冥王星もその1つと考えられている。

これらの発見に先立つこと半世紀、アイルランドの天文学者エッジワースとアメリカの天文学者カイパーが予言していた。太陽系の外側には惑星になりきれなかった天体が残され、その一部が彗星のもとになっていると考えた。そのような天体が分布する、海王星の軌道の外側に円盤状に広がる領域をエッジワース・カイパーベルトと呼ばれるようになった。

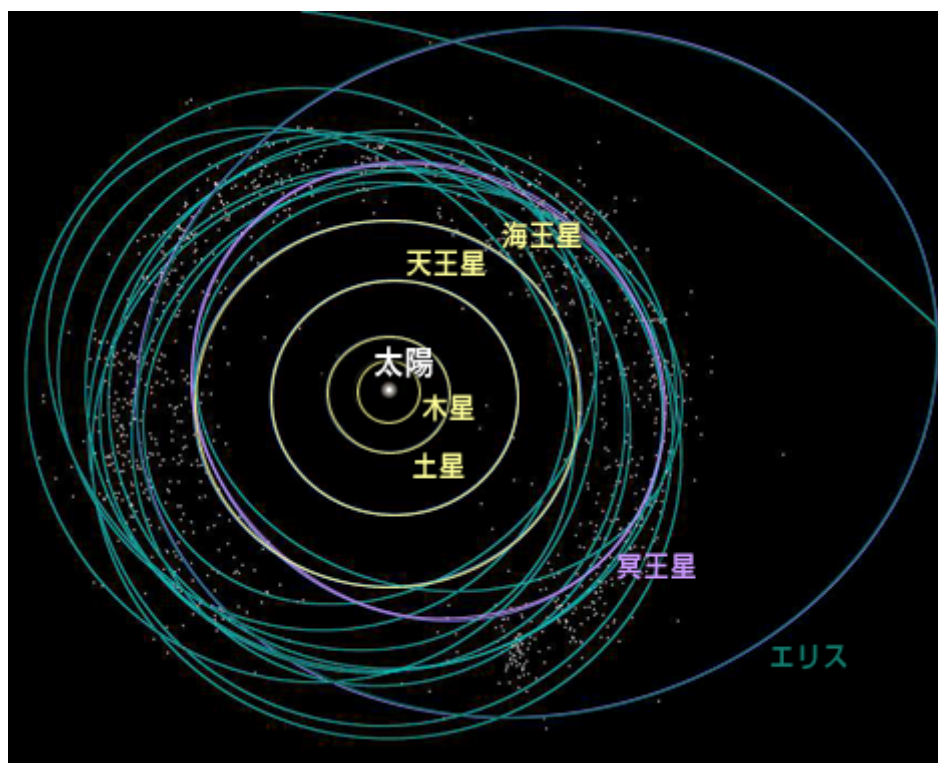
< <https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/pluto/pluto04.html> >

最新の太陽系の全体ビューは、次図のような円盤状となる。全体の大きさは、100AUである。  
天文単位：1AU（Astronomical Unit）とは、太陽から地球間距離：約1.5億kmである。



<http://www.nao.ac.jp/astro/comet/>

これまで見慣れた真上からみると、各惑星・準惑星は次のように回っている。



<http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/pluto/pluto04.html>

コペルニクスやケプラーがこれらの画像をみたら“やはり”と頷くにちがいない。プトレマイオスは地団駄踏んでいる。

### [オールトの雲]

とどめはオールトの雲になる。太陽系を球殻状に取り巻いていると考えられる仮想的な天体群をいう。オランダの天文学者ヤン・オールトが長周期彗星や非周期彗星の起源として1950年に提唱した。太陽からの距離は1光年（約10兆km）であり、天文単位では10万AUとなる。これが太陽系にまつわる最果ての天体群である。これ以上はない。現在の予測では小さなものが数百万個あるという。

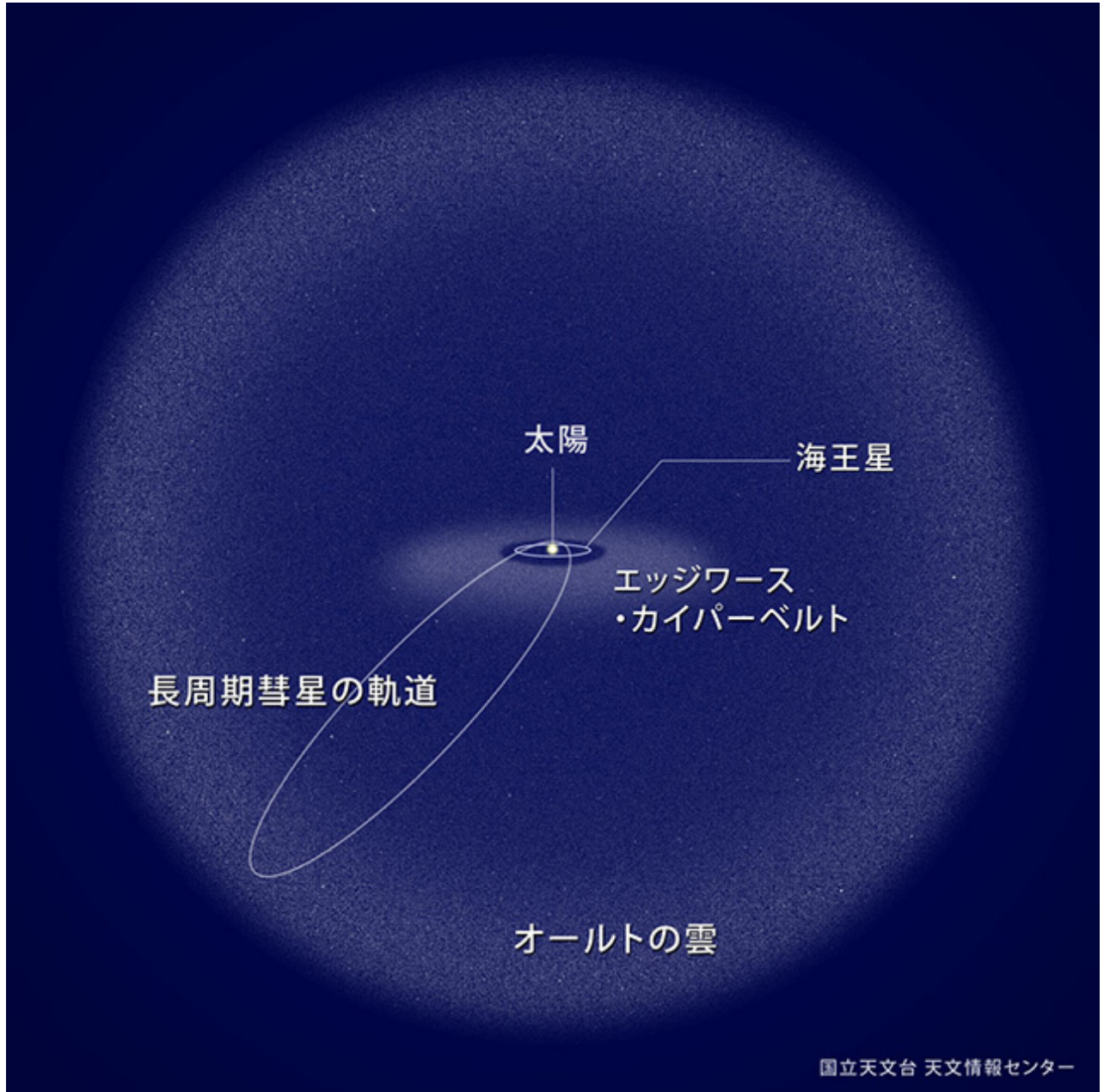
いま、ミッションを達成したボイジャー兄弟が秒速30kmぐらいで近づいている。搭載している原子力電池\*のおかげで、オールトの雲の中の一つに遭遇したら画像をとって地球に向けて送信できるのだが。遭遇する確率はゼロに近い。百万個以上の彗星があっても、周囲60兆kmほども広がっている。仮に球面上でなく円周上として単純化すれば、 $60 \times 10^{12} / 10^6 = 60 \times 10^6$  kmとなるので、彗星間の平均離隔距離が少なくとも6千万kmにもなる。高々3m四方のボイジャー達にとっては隙間があまりにもありすぎる。私たちは、宇宙のスケールに触れた気分になることは否定できない。

\* 原子力電池とは、放射性同位体熱電気転換器(Radioisotope thermoelectric generator; RTG)のことで、半減期の長い放射性同位体が出す放射線エネルギーを電気エネルギーに変える仕組みの電池である。原子力電池の放射線源として用いられるプルトニウム238はアルファ崩壊の崩壊モー



ドを持つ放射性同位体であり、半減期が87.7年の長寿命である。1kgあたりの熱出力は約540ワットもある。〈 [spacenuclear.jp/nuclear/rtg0.html](http://spacenuclear.jp/nuclear/rtg0.html) 〉

オールトの雲までの太陽系全体図



<http://www.nao.ac.jp/astro/comet/>



## 太陽系の形成

これまでの太陽系俯瞰から、それが黄道面を芯とする円盤状であることが判った。

京都大学名誉教授 林 忠四郎（1920-2010）は、日本を代表するの宇宙物理学者、天文学者であるが、彼が1980年代に太陽系形成のシナリオを提唱した。それが、「京都モデル」と呼ばれている。

<<http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/hayashi/lectures/kokubo.pdf>>

京都モデルの基本概念

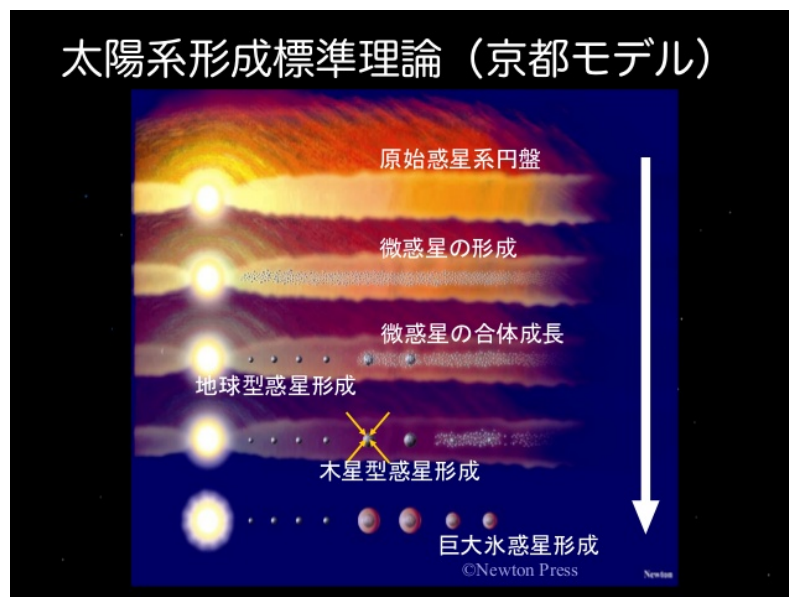
円盤仮説：

- ・惑星系は恒星周りの小質量の円盤(原始惑星系円盤)から形成される。
- ・円盤はガスとダストから構成される。

微惑星仮説：

- ・ダストの集積によって微惑星が形成される。
- ・微惑星の集積によって固体惑星が形成される。
- ・固体惑星(核)にガスが降り積もることによってガス惑星が形成される(核集積モデル)。

<<http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/hayashi/lectures/kokubo.pdf>>



<http://www.slideshare.net/noinoi79528/lecture141014>

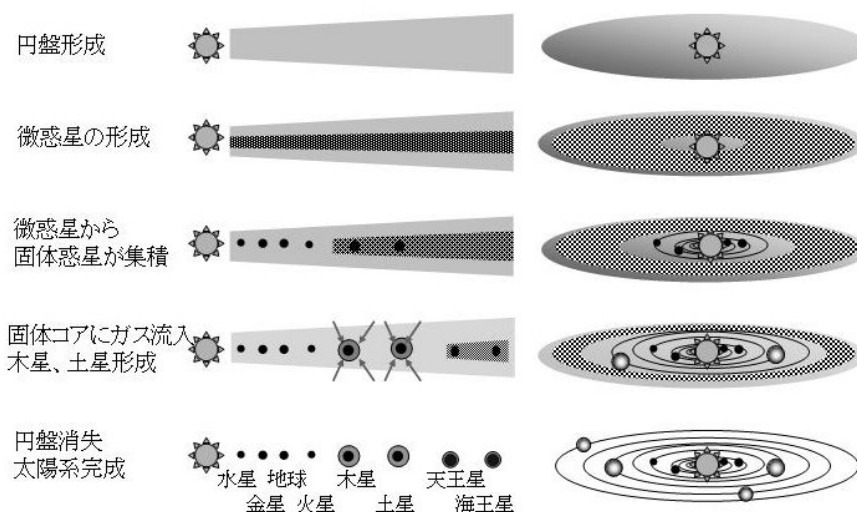
太陽系は、およそ46億年前に、暗黒星雲と呼ばれる宇宙空間にただよう分子や粒子が集まった場所で、それらが固まりはじめ、次第に集積してできたとされている。その芯が数百万年ほどかけて段々と巨大になり、原子太陽が生まれた。これが周囲のガスや塵埃および岩石礫を集め太りだすと、重力がその中心に圧力をかけ、なんと1千万度を超える熱さになる。そのとき、水素の核融合が始まり膨大な光と熱エネルギーを周囲に放つ。全宇宙における原子数の存在比は、水素だけで92%もあるとのことだから、この原始太陽の中でも水素の構成割合が一番大きいので、

この核融合は永遠に続く。一説によれば、100億年も核融合は止まらない。

しかも、当初からガスとチリの塊はスピニングしているから、周囲をふりまわして渦をつくる。これが円盤状になるが、いまは「降着円盤」と呼ばれる。その渦の中でも、チリが固まって石ころになり、やがて岩石ほどにもなる。最初から岩石破片や隕石も混じっている。しばらくすると、それらが集まり、次第に今の微惑星や小惑星ほどになって、衝突・合体を繰り返し、やがては弱肉強食で勝ち残った原始地球みたいなものが、太陽を回りながら周りを呑み込んでいく。といっても、実際は隕石落下みたいな天体衝突だらけなので、ものすごい熱が生じる。しかも、毎日数百の隕石と小惑星が落ちるから、休む暇もない期間が数百万年も続き次第におさまったが。原始地球の表面はマンツルのマグマがむき出しの溶鉱炉状態だったという。しかし、1億年もたつと表面が冷えて地殻ができ、うごめくマグマをその下に閉じ込めた。これが今のプレート・テクトニクスという地殻変動現象である。火山噴火や地震を起こして人類を脅かしているが、反面、生命の進化と穏やかな地球環境の保全に著しく貢献してきたらしい。

同様にして、他の惑星たちも育ったが、木星と土星は核が岩石としても外側は軽いガスを集めて「ガス惑星」と呼ばれている。つまり、原始太陽が光りはじめると、吹き飛ばされた近辺のガスが円盤の外側に漂ったからである。一番大きくなった木星は旺盛な食欲で岩石礫を食べ過ぎたので、火星との間に呑み込まれなかった岩石群が取り残され、それがいわゆる未熟児惑星でいっばいの「小惑星帯」としてひねたように集まっている。この小惑星には、実は太陽系形成期の情報がいっぱい詰まっているという。人類にとっては貴重な探査対象天体でもある。木星の外側は冷えて水以外にもメタン、一酸化炭素などの氷が多く、それで覆われた天王星と海王星は「氷惑星」となった。この間、何千万年もかかっている。

残った岩石や氷やチリが集まっても、数億年経つともはや弱肉強食の戦国時代が終わってしまい、彷徨する冥王星や小惑星、彗星らがそのままあちこちに途方もなくさまよっているのが現在である。



[http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/STUDIES/basic\\_process.html](http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/STUDIES/basic_process.html)

そして、つい最近の2014年に太陽系形成にかかる誕生シーンと同じような最新の画像が撮られた。それが南米チリの高山にあるアルマ（Alma）望遠鏡によるものである。

七色の可視光の波長域は380nm～780nm（ナノメートル： $10^{-9}$ m）である。光より波長がはるかに長い電波（ミリ波）による観測は、解像度がかなり落ちるとい物理常識がある。しかしながら、電波は宇宙空間の分子や塵埃に吸収されるという可視光の弱点はないが、解像度が落ちるとい大問題がある。ところが、パラボラ・アンテナの口径を1000m以上も広げれば、解像度はあがると言われていた。昔から、アンテナの大規模化は構造技術的に厳しくなり、建設コストもうなぎのぼりとなることが判っていた。他のアイデアとして、スペース・ダイバーシティという空間分散によるアンテナ設置案があり、つまり、これは距離を置いて中型アンテナを幾つも立て、見かけ上、一つの大口徑アンテナとする方法である。

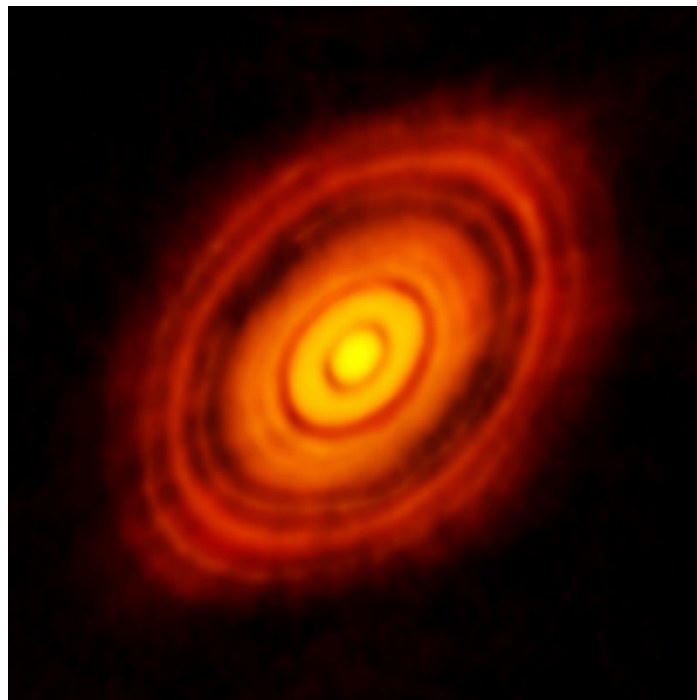
これが、アルマで誕生した「電波干渉計」というアンテナである。

複数のパラボラ・アンテナを結合させて一つの望遠鏡とする「電波干渉計」では、アンテナの間隔を離せば離すほど解像度（視力）が向上する。アンテナ展開範囲は15kmである。アルマでは66台のアンテナが設置されている。ただし、画像の同期という難しく微妙な問題がある。これも昨今の（特に日本の）エレクトロニクス技術の発達により、比較的容易になった。

観測対象となったのは、おうし座の方向約450光年彼方にある若い星、おうし座HL星だ。この時の解像度は、史上最高の0.035秒角で、ハッブル宇宙望遠鏡が達成できる典型的な解像度を上回る。

この史上最高の解像度で撮影されたおうし座HL星の画像には、星のまわりに同心円状の塵の円盤が幾重にも並んでいるようすがくっきりと写し出されていた。

アルマ望遠鏡でとらえた、おうし座HL星の原始惑星系円盤



<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html>

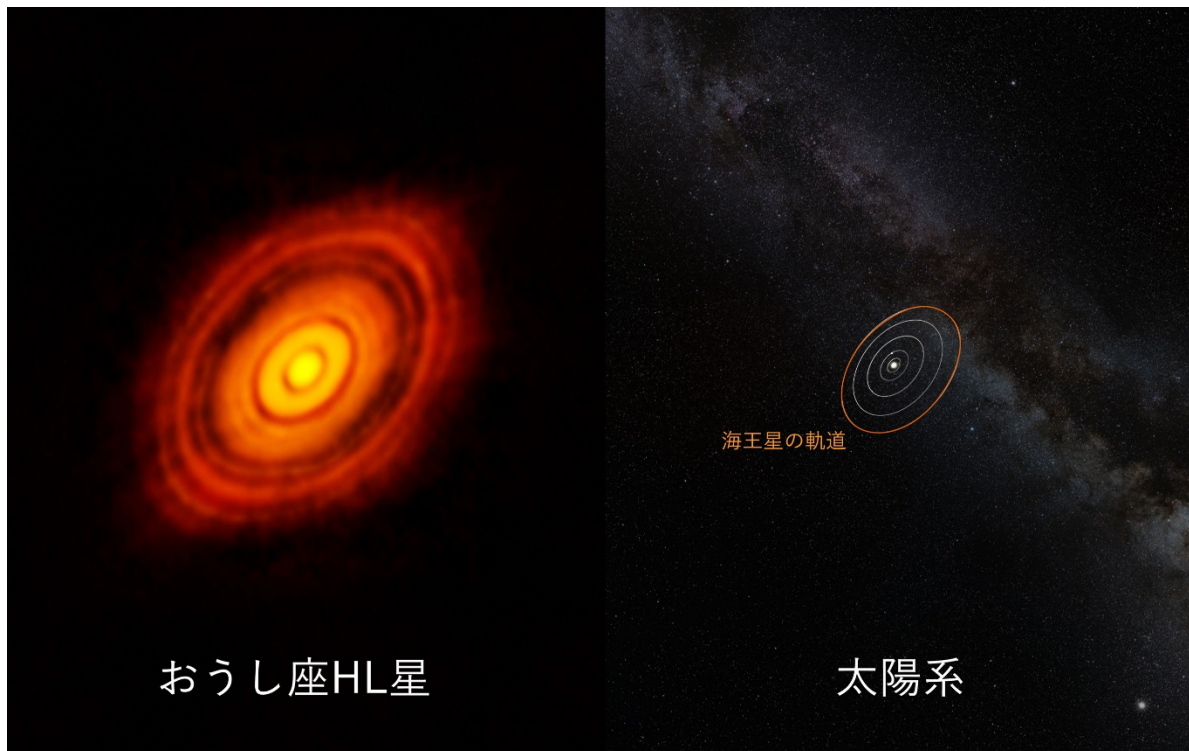
これは驚きである。天文学の専門家になればなるほど驚嘆の度合いが深くなる画像であろうか。まさか、『京都モデル』がこれほど鮮やかに現実に起きている現場をみると、さすがに私たちも虚像から実像に推移するというような感覚遷移を消しようがない。惑星を誕生させるいくつかの筋が明確に見えるではないか。

写真でみたグランド・キャニオンを現実にみたときの感動に似ている。仮説や予測というのは、だいたい、専門家も含めて「さもありなん」というレベルの印象感覚で棚にあげてしまう。事実となったからには、もう彼らは我慢できず、画像データを入手して己の研究課題の解決にいそしむこととなろう。その汗だくの模様が、ケプラーが挑んだティコのピラミッド・データとの格闘のように臉に浮かぶ。

アルマ望遠鏡計画とは、東アジア（日本が主導）・北米・ヨーロッパ・チリの諸国が協力して進めている国際プロジェクト。直径12mの高精度アンテナ50台と「ACAシステム」と呼ばれる高精度アンテナ16台を、チリ・アンデス山中の標高5000mの高原に設置し、ひとつの超高性能な電波望遠鏡として運用する画期的な計画である。

<<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/aboutalma/>>

\*\*\*\*\* <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html> \*\*\*\*\*



アルマ望遠鏡が観測したおうし座HL星の周囲の塵の円盤(左)と、太陽系の大きさ(右)を比較した図。右の図では、太陽系の最も外側を回る惑星・海王星の軌道が一番外側に描かれています。おうし座HL星のまわりの円盤は、太陽系の3倍程度の大きさがあることがわかります。

最初にこの画像を目にしたときには、私たちはそのあまりの高精細さに言葉を失うほど驚きました。おうし座HL星は100万歳に満たない若い星ですが、この画像を見るとこの星のまわりでは明らかに惑星ができていのように見えます。このたった1枚の画像が、

惑星形成の研究に革命をもたらすでしょう。

星は、宇宙に漂うガスや塵の雲の中で誕生します。生まれたばかりの星の周りにはガスや塵でできた円盤があり、1千万年以上の時間をかけて円盤内の物質が衝突合体を繰り返して惑星が作られると考えられています。こうした場所は密度の高いガスや塵に覆われているので、可視光や赤外線ではその中を見通すことができません。しかしアルマ望遠鏡が観測するミリ波・サブミリ波はこうした物質に吸収されないため、星や惑星が誕生するまさにその現場を観測することができるのです。

今回の画像を見ると、おうし座HL星を取り囲む円盤の中には少なくとも3本のはっきりした間隙があることがわかります。こうした間隙は、円盤の物質を掃き集めながら大きな惑星が成長しつつある証拠だと考えられています。100万歳に満たないほど若い星の周りで既に大きな惑星が形成されつつあるというのは、これまでのどんな理論でも想定されていませんでした。アルマ望遠鏡によって初めて「まさに惑星が作られている現場」の画像を取得できるようになり、惑星形成の研究の流れに大きな変革が起きることでしょう。

\*\*\*\*\*<http://alma.mtk.nao.ac.jp/news/pressrelease/201411067466.html>\*\*\*\*\*



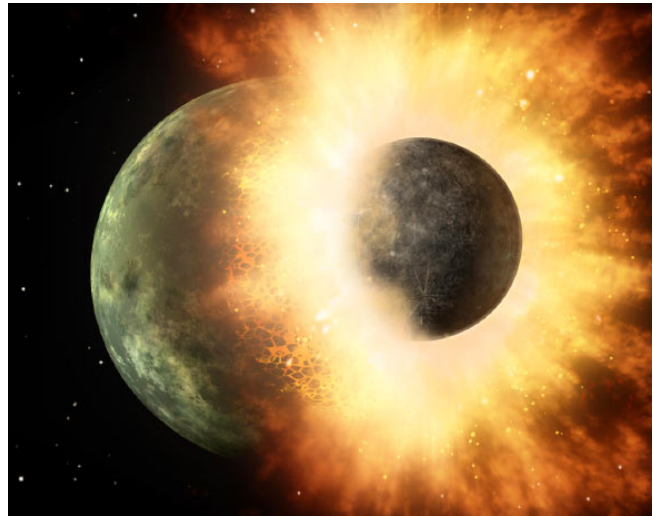
## ジャイアント・インパクト

1970年代のアポロ計画である。ミッション・クルーはリトロ・リフレクターというレーザー光線の反射鏡を置いてきた。これにより、地球～月間の距離が精密に測定できるようになった。つまり約38万kmという値がmm単位で求められている。しかも1年間に3.78cmずつ遠ざかっているということまで判明した。ということは、やがて数万年も経てば、皆既日食はなくなり絶えず金環食しか見られなくなるのだ。同じく、干満による干潟も減少する。

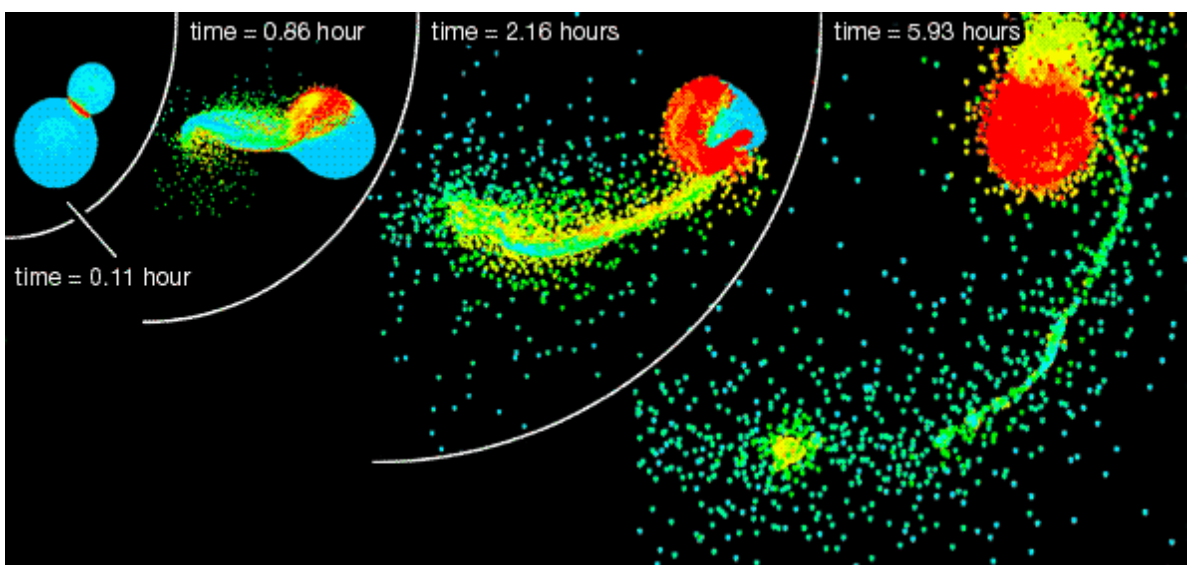
逆に、単純に計算して過去にたどってみると、40億年前は13万kmぐらいしか月と地球の距離はなかったということになる。これに、惑星天文学者がにわかに惹きつけられた。昔は、原始の月は原始地球の重力圏に捉えられて周りだしたという幼稚な考えまであったが、ニュートンの運動方程式を適用すると、あり得ないことまで判った。つまり、スイング・バイして通り過ぎるか、それとも衝突してしまうか、の二つの可能性しかないという。

いまや、多くの科学者たちの中で後者の衝突説に疑いをはさむ人を聞いてはいない。

そのシナリオは、先ず、太陽系生成時期には、地球や火星規模のような岩石マグマ惑星が幾つも誕生していたということから始まる。45億年前、その一つが火星サイズの直径6千kmほどの原子惑星：**テイヤ**と呼ばれる奴が、地球に近づいてきて斜めにオフセットでぶつかってきた。



<http://www.sci-news.com/space/science-protoplanet-theia-moon-rocks-01972.html>



<http://intrepidpostcards.blogspot.jp/2014/06/journey-from-centre-of-earth.html>



<http://www.geocities.jp/msakurakoji/900Note/103.htm>

メガトン級の水爆：数万発もの大爆発が起きて、地球はマントルも半分ほど吹き飛ばされ、その細かな破片が散らばったが。それらは、残った地球の重力圏にとらわれて回り始めた。半分ぐらいの破片は地球にふたたび吸収され、残りは塊になって勝手に破片を集めて原始の月になったという。それに数百万年はかかったものと考えられる。科学者たちのシミュレーションによれば、産まれたての月は地球から2万kmしか離れてなかったらしい。当時に地球からみるとものすごい迫力の光景である。静止衛星よりも近くを巨大な赤いマグマの月が

回っているのだから。

そのうち、何千万年も経つと、地球から蒸発した水、主に彗星がもたらした水であるが、これが冷えて豪雨に包まれて海ができた。それが月の潮汐力で、陸地は海面が数十mも盛りあがる満潮を迎える。この極端な満潮・干潮により干潟が広がり、生命の誕生へと結びついたという。いまの干満差は±50cm程度だから、想像してもゾッとする。

ちなみに、当時の1日は数時間という速さだった。これが次第に伸びて40億年後には24時間という適当な日周時間になったのである。30億年ほど前のサンゴの化石を切断すると年輪に加えて月輪まで判別できたことから推測された。

地軸の傾斜23.5度も、ジャイアント・インパクトによりできたのではないかとされている。しかもその軸の周りを月がまわって地球の自転を何十億年間も安定させていることは事実である。春夏秋冬という季節の巡りが必ずやってきて動植物の生態にこの上ない恩恵を届けてくれる。この傾きがなければ北極と南極は永遠に薄暗くて氷に閉ざされた世界になる。

月は、しかしながら潮汐ロックという天体現象にはまり、永遠に自転できずに、月にしてみればもう地球なんて見たくないと思っても表の顔をそむけられずに回っている。地球からは、おかげでウサギの餅つきは、満月の時に必ず見られる。最近、日本の月探査宇宙船「かぐや」が月面を調べたところ地球に向いた表は重い岩石できていて、裏は比較的軽い岩石の月殻になっていることが判った。すなわち、月の重心はその中心になく地球に近い方にずれているという。

まだまだ多くの功罪はありそうだが、結論は、あれほど衝撃的なジャイアント・インパクトで二人とも生まれたにもかかわらず、月は生物の進化に貢献し、最近の百万年間は人類：ホモサピエンスの進化に欠けがいのない存在となっていることだ。進化の根本は種の保存・発達であり、その生殖サイクルは正に月の回転に依っている。



## 恐竜絶滅

およそ6500百万年前に、この地球から恐竜がいなくなった。私たちが見ている恐竜の骨組みは掘り出された化石から作られたものである。映画「ジュラシック・パーク」で見ているものはすべてコンピュータ・グラフィックス：CGで再現されたもので、その映画名のジュラシックとはジュラ紀（約1億9960万年前～約1億4550万年前）という地球の地層名称に発している。その遠い時代に、様々な恐竜が生息していた。

参考： 主な地層時代

カンブリア紀	5億4200万年前～約4億8830万年前
三疊紀	2億5100万年前～2億2870万年前
ジュラ紀	1億9960万年前～1億6120万年前
白亜紀	1億4550万年前～6600万年前
<hr/> <b>K/T境界</b>	
旧成紀（古第三紀）	2300万年前～5600万年前

カンブリア紀には、海中で多様な生物の大量発生があった。これはカンブリア大爆発とも呼ばれている。地球は、30億年もの長い年月を単細胞生物、ラン藻やカイメンの祖先などが住む静かな星であったのが、突然6億年ほど前になって高等生物が登場したという。カンブリア・モンスターとして有名な最大の肉食甲殻類アノマロカリス（体長1 m弱）が登場し、人類の祖先になる原子脊椎動物も誕生した。

三疊紀の海には新しいタイプのプランクトンやアンモナイトなど、さまざまな生物が繁栄した。陸上ではシダ植物や裸子植物の森林ができた。三疊紀末期には、ようやく、ネズミに似た最初の哺乳類が進化して、数々の種が出現することとなった。

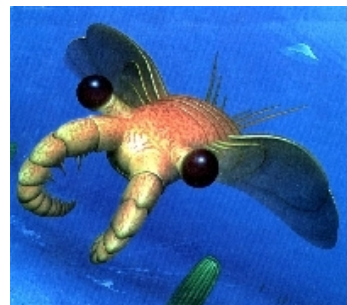
ジュラ紀には大型の恐竜が登場し、脊椎動物の間では、魚類の多様化や鳥類の出現といった革新が起きた。鳥類が飛行能力を獲得できたのは、当時の大気の高い酸素濃度と関連していたようだ。白亜紀に翼竜が巨大化したのも同様の理由であろう。

<http://park.looktour.net/national-park-info/>

白亜紀(Kreide)と第三紀(Tertiary)との境界は、頭文字をとって「**K/T境界**」とよばれる。ところがこのK/T境界を境にして、それ以降現在まで恐竜の化石が全く見つからない。地層学者や動物学者に大きな疑問が生じたのである。その原因は何か？ である。



[https://enterprise-load.blogspot.jp/2011/12/blog-post\\_08.html](https://enterprise-load.blogspot.jp/2011/12/blog-post_08.html)

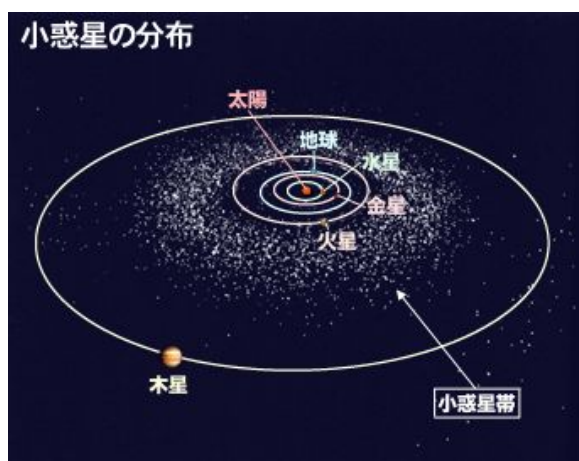


<http://aromari.blog.so-net.ne.jp/2015-07-15>

1970年代、偶然にイタリアでこのK/T境界に気付いたウォルター・アルバレスという若い地質学者がいた。彼はイタリアの山脈創生の調査をしていたのであるが、なぜか1cmしかないK/T境界に惹きつけられた。地質を調べたが何もない。悩んだ挙句、ノーベル物理学賞をとった父親のルイス・アルバレスに相談した結果、そのサンプルの原子組成が調べられたのである。なんと、他の地層の30倍ほどの“イリジウム”という原子が抽出されたのだ。イリジウムとは原子番号77“Ir”のことである。隕石には比較的多く含まれている。非常に重いので、地球創成期に降り注いだおびただしい小惑星や隕石内のイリジウムはマントルを突き抜けてコアにまで沈んでしまったらしい。

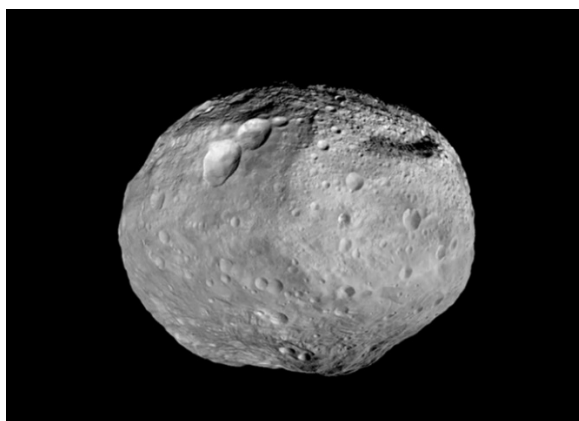
そこで、イリジウムが世界中のK/T境界の地層で発見され始めたことに加えて、宇宙に漂うチリや岩石にしかないイリジウムが積もった理由を想定した結果、太陽系の近くで超新星爆発が起こったからであろうか。天文データをさぐった結果、K/T境界ができた6500年前に起きた痕跡がなかった。次に、ひょっとして小惑星が落ちてきたのではないか、という推理に至った。

小惑星：アステロイドは、主に火星と木星の間に帯状の溜まり場に数百万個ほどいるという。ところが、それ以外にも地球周辺にたむろしている奴もいるようだ。その光景は次のNASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory) の調査による分布図をみると、さすがに驚愕する。



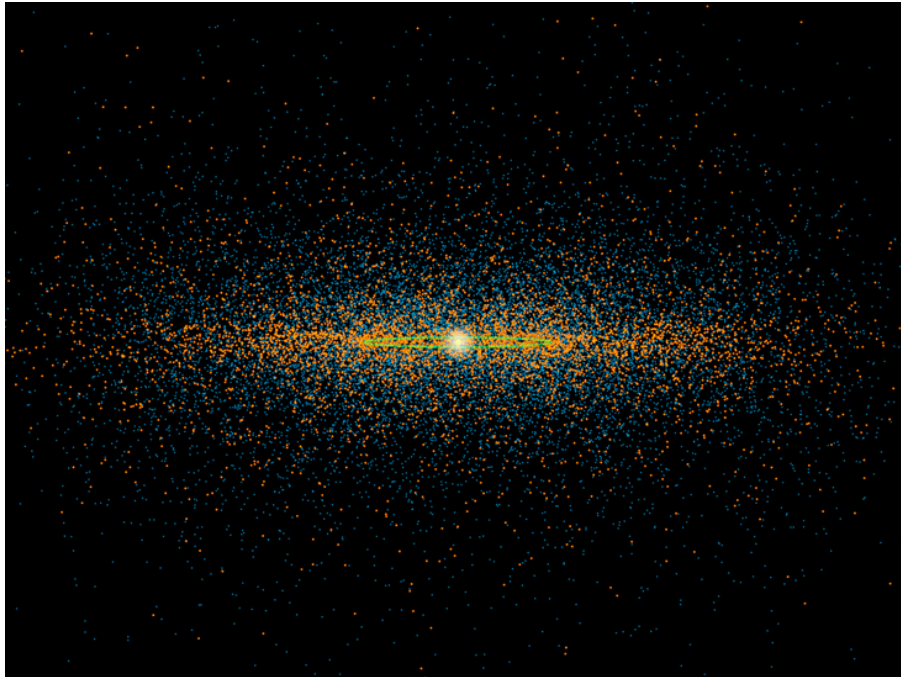
[http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/asteroid\\_belt.html](http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/asteroid_belt.html)

小惑星帯の最大級ベスタ: 直径500km



<http://solarsystem.nasa.gov/galleries/full-view-of-vesta>

## Edge-on View of Near-Earth Asteroids(地球近傍小惑星分布の光景)



<http://solarsystem.nasa.gov/galleries/edge-on-view-of-near-earth-asteroids>

### [NEA/PHA]

これらのうち、PHA (potentially hazardous asteroids) といわれる危険なアステロイドは、5千個ほどあるというNASAの報告がある。あのはやぶさが到達した“イトカワ”(大きさ600m)という小惑星も含まれているにちがいない。私たちはその光景を歓喜で見守ったが、とんでもない。怖ろしい悪魔の一つなのだ。その軌道は地球軌道から随分と離れており、地球衝突はありえないから私たちは安心している。

NASA/JPLが注意報に入れているものはPHAであり、NEA (Near-Earth Asteroids)の中から、ぶつかりやすい地球軌道面で800万km以内に近づくものである。それが5千個もあるのだから、全世界の天文台に監視を呼び掛けている。日本でも、小惑星向けの監視天文台が設置され(日本の岡山県美星町の“美星スペースガードセンター”)、24時間体制で、PHA登録されているアステロイドや、新たなアステロイドなどウォッチしている。映画「ディープ・インパクト」では、小学生が星の観測授業で見つけた彗星だったが、「アルマゲドン」では小惑星が世界の終わりを告げるデモンのバケモノ小惑星であった。いずれも事前のウォッチにかかったから、地球破滅には至らなくて、私たちはほっとした覚えがある。

それでも、数m級の小さいものは見つからずに、2013年にロシアに落ちてきたチェリャビンスク隕石(元は直径17メートル、重さ約1万トン)のように地球に衝突してくる。大気圏突入時の衝撃と発熱でバラけたから、被害は少なかった。

PHA監視体制がなかった1908年には、シベリアのツングースカ地方で謎の大爆発が起きた。爆発は約6kmの上空で起きたが、爆心地から半径20km以内は高熱で焼かれ、約2,000km<sup>2</sup>もの地域の針葉樹林が放射状になぎ倒されたと言われている。この正体は直径100mほ

どの小天体だった。クレーターが残らなかったので小天体は大気中でばらばらになり、燃え尽きたと考えられている。

まだまだ油断はできない。

なお、「隕石」とは、宇宙の微惑星や岩石片が地球に落ちてきたものを言い、宇宙に浮遊するものはそう呼ばないらしい。したがって、比較的大きな数十m級の小惑星は、落ちてくると巨大隕石と呼ばれる。

### [落下隕石の数]

2013年までの100年間に落下隕石数は地球陸地全体で605回確認されたそうである。

実際に地球に落下する隕石の総数を推計すると、陸地と海洋の面積比は3対7なので、地球全体では100年間に2000回落下していることになり、1年間では20回ほど起きている。10m前後の大きな隕石落下は、9回起きている。

(「隕石落下のリスク評価」日本スペースガード協会より)

月のクレーター調査からわかったらしいが、45億年前の地球創世記には、現在の10万倍ほどの小惑星や微惑星(隕石)が地球に降ってきたようである。したがって、単純計算では毎日5000個ほど落ちてきたものと想定される。このために、地球表面のマグマの海は益々盛んであったことが肯ける。

### [アルバレス仮説]

1970年代とはいえ、アポロ計画での月探査によりかなりの小惑星衝突へのリスク意識が芽生えていたようである。父のアルバレスは、物理学者であったので当然ながらアステロイド・インパクトしかありえないのではないかとほぼ確信したが、物証がない。あれほどのK/T境界が世界中の陸地に出来たことは、10km規模のアステロイドが落ちてきたのではないかという「アルバレス仮説」を立てて、親子で著わした。これは一般向けで

『絶滅のクレーター : T・レックス最後の日』

という題名の本という。T・レックスとは、あの肉食恐竜の恐るべきティラノサウルス・レックスのことであり、“レックス”は大王の称号である。典型的な米語表現らしい。

天文の専門家筋では棚上げされたようであるが、出版により、この仮説現象が地質学者、動物学者、プレート・テクトニクス学者など数分野の専門家にも読まれたから、一般向けにしたことは、結果としても功を奏した。

反面、火山の大爆発説まで持ち上がった。



## 【クレーター】

そして数々の学者たちの巨大隕石衝突クレーター探索が始まった。

隕石衝突の現場は、誰も見たことがない。NASAの受託研究機関のJPL（ジェット推進研究所）の実験や調査による想像図は右のとおり。

なお、隕石の平均突入速度は、秒速10 kmぐらいとのことである。地球重力からの脱出速度が秒速11 kmだから肯ける。



<https://www.bing.com/images/search?q=impact+jpl&view=>

次に、衝突直後にNASAが火星の周回衛星のハイライズ・カメラがとらえた火星の出来立てのクレーター写真は、まさに衝撃的である。2013年の9月に発生した。クレーター直径は30 mでも、周囲15 kmほどに爆風と粉塵が広がったスペクタクルが見て取れる。

クレーター直径から落ちた隕石の大きさが推測できる。NASA/JPLの実験によれば、クレーター直径の約20分の1であるから、この火星の衝突では隕石直径はおおむね1.5 m程度となる。隕石が鉄隕石であれば倍率はふくれる。また、火星の場合は大気が地球の1/150と薄いので、突入時にバラけて燃え尽きることはない。

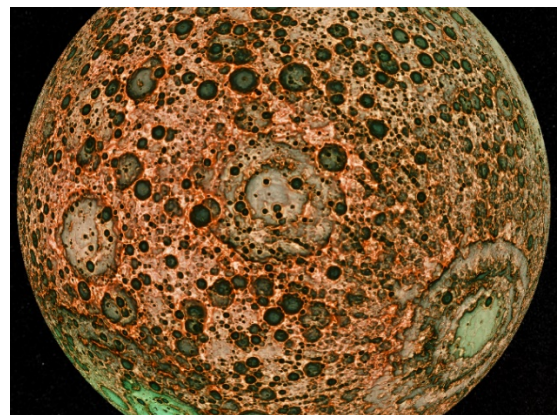
### A Spectacular New Martian Impact Crater



<http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA17932>

### ・月のクレーター

特に月の裏側は、国土地理院によるカラー処理した立体画像（右図）のとおりクレーターだらけの月面である。このために、地球への小惑星や隕石の衝突に対して、少なからず盾になったものと言われている。また、クレーター年代学のため、数十万個以上のクレーターについて個々の大きさと位置を克明に一つずつ調べ上げてPCにデータ入力していた研究員の姿をテレビで見たときには、隠れたる学門の奮闘に感激した。



<http://gisstar.gsi.go.jp/selene/index-J.html>

### ・米アリゾナのバリンガー・クレーター

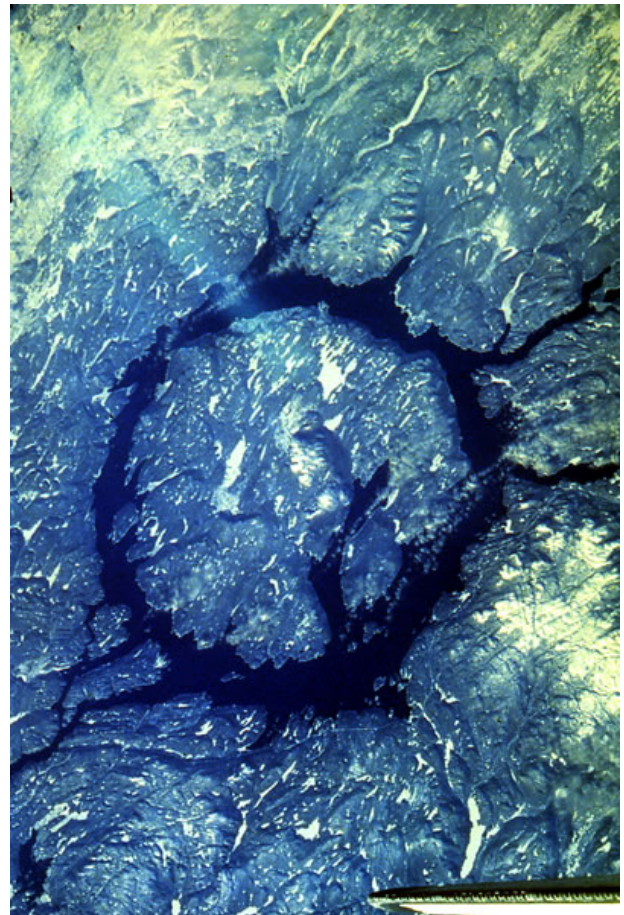
バリンガー・クレーターは観光スポットになるほど有名である。直径は約1.5 kmであり、およそ5万年前に落下した隕石は45 mぐらいといわれている。このクレーター一帯はバリンガー氏の所有になっており、彼はなにがしかの宝石類の発掘に期待して20世紀初めに買い求めたと伝えられている。今は観光収入で潤っているから、子孫たちに宝石以上の事業を遺したともいえる。



<http://spaceinfo.jaxa.jp/files/15722.jpg>

### ・Manicouagan Impact Crater, Canada

カナダ・ケベック州のマニクアガン・クレーターは、直径約100 kmもある。2億年前のアステロイド落下によるものである。地上で見られる最大規模となる。



[http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/geology/sgeo/slide\\_18.html](http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/geology/sgeo/slide_18.html)



• Wolf Creek Crater Western Australia

オーストラリアの西部にあるウルフ・クリーク・クレーターで、直径800mで1～2万年前の隕石衝突によるものである。



[http://www.outback-australia-travel-secrets.com/wolfe\\_creek.html](http://www.outback-australia-travel-secrets.com/wolfe_creek.html)

• Gosses Bluff Crater

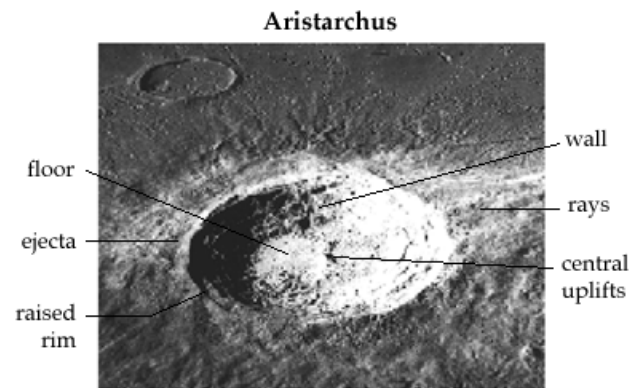
(ゴッシズ・ブラフ「ゴスの絶壁」の意)

このクレーター直径は24kmで、1.4億年前に起きたものである。落下隕石は2kmと推定されている。



<http://home.alphalink.com.au/~dannj/craters.htm>

一般的に、隕石クレーターの形状に関する名称は右図のとおりである。



[https://www.nasa.gov/pdf/180572main\\_ETM.Impact.Craters.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/180572main_ETM.Impact.Craters.pdf)

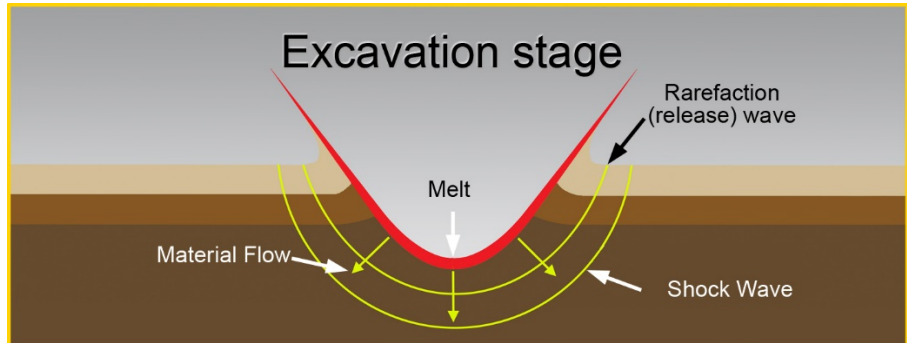
プレート・テクニクスの大規模移動によりほとんど地殻の下に沈んでしまったが、以上のように、残存する世界の主なクレーターを拾ってみた。10km規模の隕石が残すクレーター直径は200kmもあるから、いずれも該当しないし、衝突年代も異なる。さらなる調査が求められた。



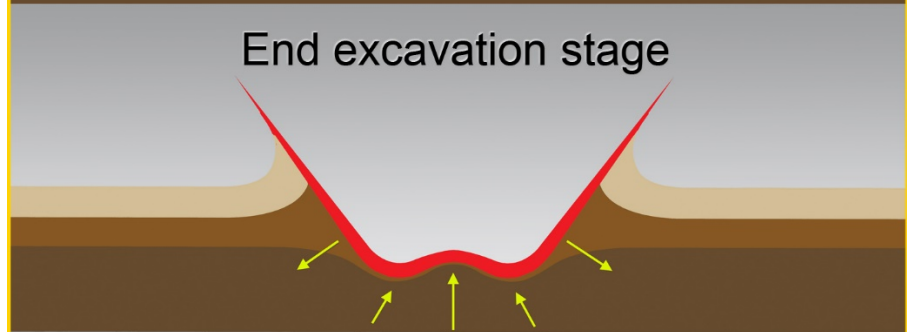
## [隕石クレーターの生成]

NASA/JPLの調査結果として、クレーターは衝突に際してどのようにできるのか、について次図のようなシナリオが公表されている。

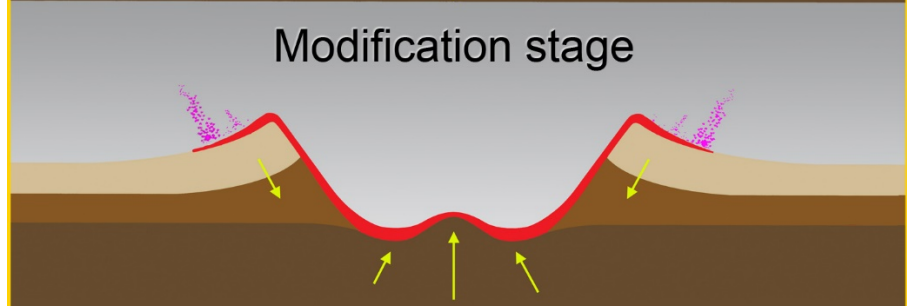
掘作段階（衝突直後）



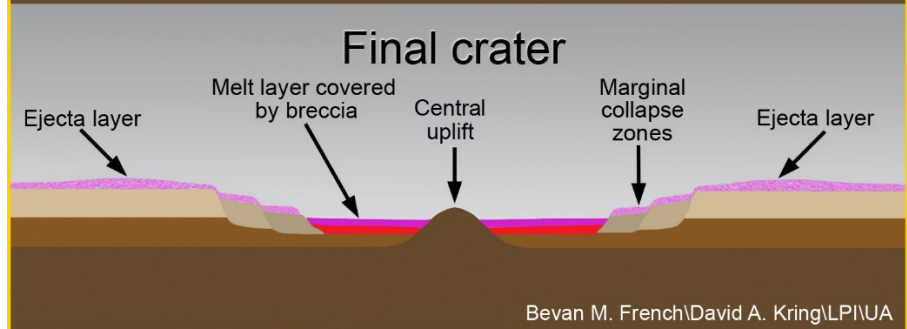
掘作段階（衝突終期）



変形段階



最終形状のクレーターの形成



Bevan M. French\David A. Kring\LPI\UA

<http://www.lpi.usra.edu/exploration/education/hsResearch/crateringLab/lab/part1/background/>

## [地質調査@メキシコ]

それは、メキシコでの地質調査から始まった。1970年代にメキシコ政府は石油発掘のために専門会社に地質調査を行わせていた。1980年代になると、テキサスのK/T境界の地質調査をした学者が、津波の堆積物を発見した。本来なら1cm程度なのが1mもあった。さらにハイチの島にもその痕跡があったから、その真中のメキシコ湾あたりにクレーターがあるはずとの説が飛び出した。

一方、資源探査の担当者は、ユカタン半島沖の海底油田調査で異常なデータを収集できた。それが、なんと直径180kmの半円になったのだ。昔の陸地のデータとつなげたところ完全な円形になったという。この専門家の連想は例の本を読んでいたらしく、“巨大衝突クレーター”に発展して、会社に報告してアルバレス博士にも電話したが軽くあしらわれてしまった。

1990年頃に、この二人、つまり石油探査専門家と地質学者は互いに連絡を取りあい、昔の掘削井戸の岩石をアメリカの大学に送り、調査依頼したところ“衝撃石英”が抽出されたのである。この後、詳細な調査が行われ、アルバレス仮説のとおり直径10kmの隕石衝突によるクレーターであることが判明した。

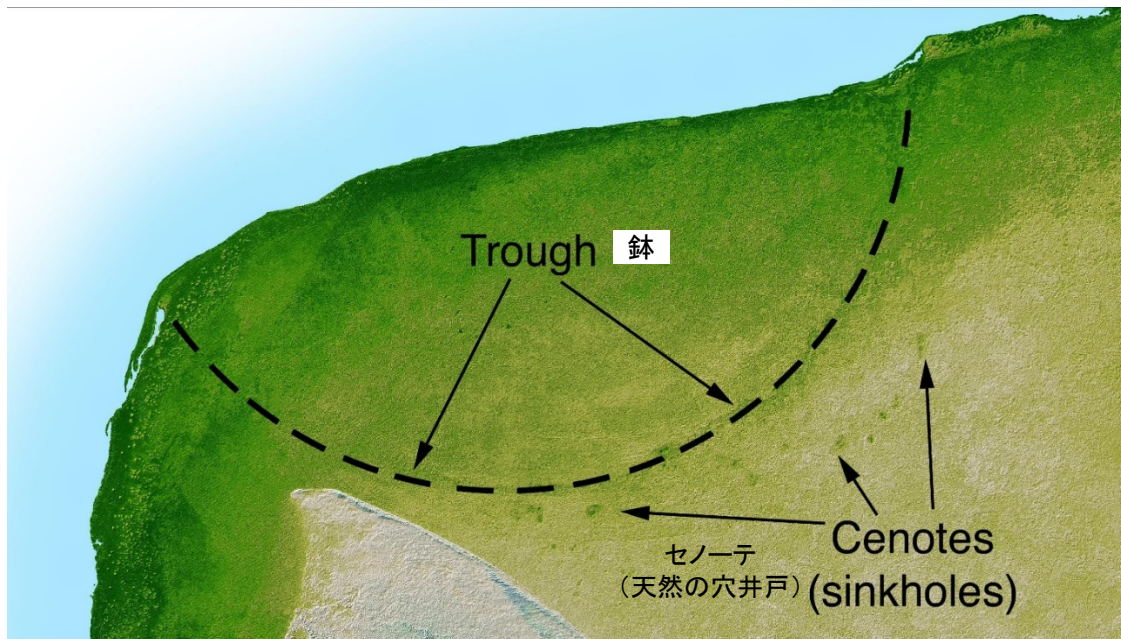
その場所は、地元村の名をとって

### 『チクシュループ・クレーター』

<直径:180km、落下隕石直径:10km、6500万年前>

と名付けられ、仮説が定説になったのである。

その地図上の位置は次図のとおり。



<https://www.bing.com/images/search?q=>

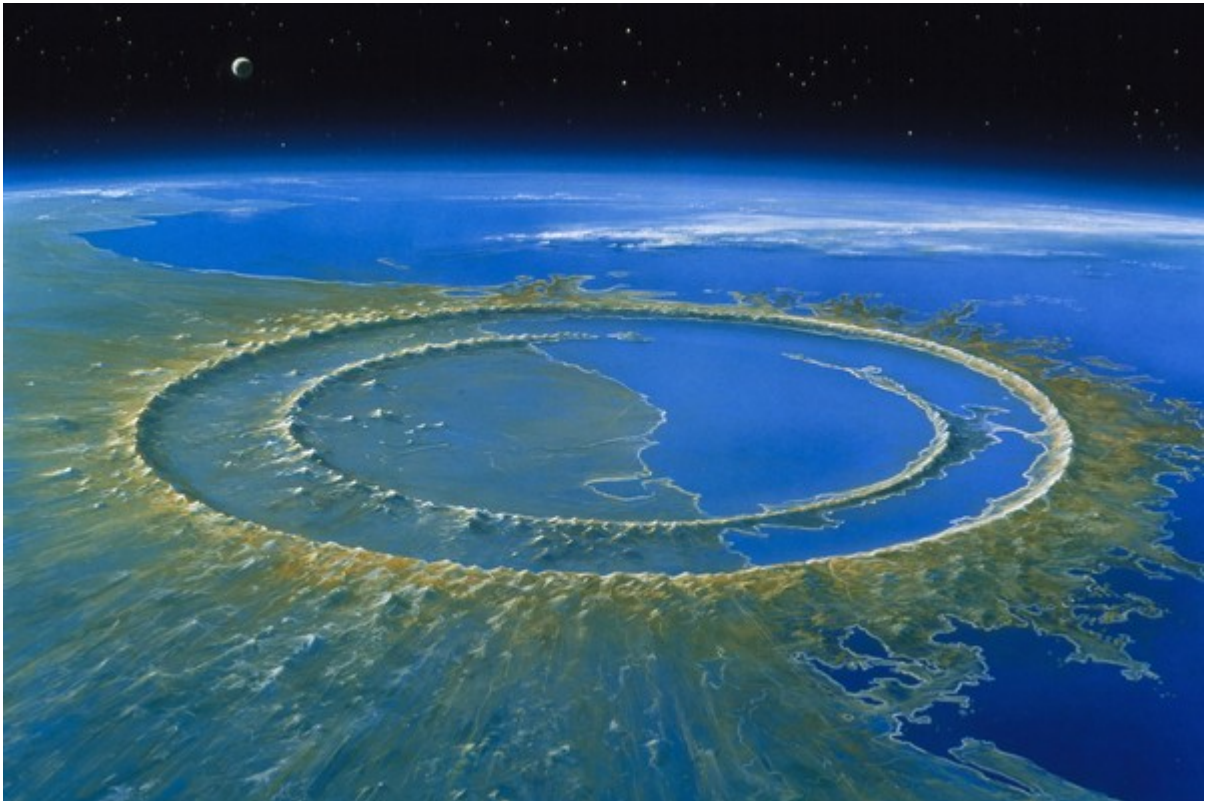
そのクレーターの地図上の位置は上図のとおり。

メキシコのユカタン半島先端にあるチクシュループ村が真ん中にある。

陸上では、セノーテという石灰岩が雨水で溶かされた穴井戸が円形に連なっている。

海底には、クレーターの鉢の縁の形状が僅かにうかがえるという。

### 『チクシュルーブ・クレーター』想像図



[http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/7557/?ST=m\\_news](http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/7557/?ST=m_news)

やはり、すさまじい爆発が起きたのだ。衝撃波は数時間で北米を吹き抜け、高さ100mほどの津波はヨーロッパ大陸やアフリカまで達したにちがいない。吹きとばされた粉塵と瓦礫は成層圏を抜けて全地球に拡散した。瓦礫はあちこちに小隕石のように物凄い勢いで落下して北米や南米の巨大恐竜たちを真っ先に死滅させたであろう。粉塵（イリジウムを含む）・ガスは全球を覆い、粉塵は霧雨のように降って、ガスは暗雲となって日光をさえぎり、寒い地球が到来したという。しかも、それが数百年も続いたのだから、全大陸の陸上動物はほとんどが絶滅したらしい。かろうじて、幸運にも生き残ったのは、穴倉生活でつつましく生きていた臆病なネズミやモグラの哺乳類であったという。

なお、このようなkm級の小惑星衝突は今ではめったに起きない。おそらく1億年に1回程度であろうか。

しかして、私たちの祖先はここで一新され、げっ歯類のネズミに代わってしまった。



## エピソード

思い返せば、1980年代のNHK特集「地球大紀行」にて、クレーター生成のNASAの実験を見て、その出来上がった美しい形状と、すさまじい逆円錐で拡散する粉塵の模様である。直径6mmぐらいのアルミの球を筒の長さ20mほどの大規模ガス銃で秒速5kmに加速し、実験キャビン内の砂の大きな鉢に射出する。真空と大気そのままと二つの場合に分けた実験であった。1気圧状態では、アルミ球の閃光がまぶしく、衝突の瞬間がよくみえない。一方、真空の場合はいきなりドスンときて、それはそれは美しい逆円錐形で砂を吹き上げ、きれいな見事な直径12cmほどのクレーターが出現する。しかもセンター・ヒルが突き出ている。月のクレーターそのものであった。ここから、私の宇宙への追及の旅路が始まったのである。

美は過ぎれば過ぎるほど、日本刀のように怖ろしい修羅の側面が見えてしまう。宇宙とは、そういうものかもしれない。

次は、いよいよ太陽系を出る。ご期待ください。

別当 勉

<betobetoven@mail2.accsnet.ne.jp>

### <参考図書等>

No.	題名	著者	発行元
1	測り方の科学史 I 「地球から宇宙へ」	西條 敏美	恒星社厚生閣
2	宇宙を測る	キティ・ファーガソン	講談社 ブルーバックス
3	新しい太陽系	渡部 潤一	新潮社 新潮新書
4	惑星科学入門	松井 孝典	講談社
5	惑星へ(上・下)	カール・セーガン	朝日新聞社
6	コペルニクス	林 大	大月書店
7	天体の回転について	コペルニクス(矢島祐利訳)	岩波書店 岩波文庫
8	コペルニクス・天球回転論	高橋 憲一 訳・解説	みすず書房
9	ケプラーの夢	ケプラー(渡辺正雄・榎本恵美子訳)	講談社
10	新天文学 ヨハネス・ケプラー	ケプラー(岸本良彦訳)	工作舎
11	ガリレオがひらいた宇宙のとびら	渡部 潤一	(株)旬報社
12	プリンキピアを読む	和田 純夫	講談社ブルーバックス
13	天文年鑑 2016年版	誠文堂新光社	誠文堂新光社

### <以下放送コンテンツ>

101	太陽系2「天体力学と惑星運動」	放送大学専門科目 2016.8.14	放送大学
102	数学の歴史3「エウクレイデス:原論」	放送大学専門科目 2016.8.22	放送大学
103	Cosmic Front NEXT コペルニクス	NHK BS Premium 2016.3.3	NHK
104	Cosmic Front NEXT ケプラーの真実	NHK BS Premium 2016.8.11	NHK
105	Cosmic Front 月の神秘	NHK BS Premium 2014.9.8	NHK
106	Cosmic Front NEXT 恐竜絶滅	NHK BS Premium 2016.7.14	NHK