

## 現代の物質観その 4

### Modern view on the constituents of matter IV.

Fujiwara Yoshikazu

2020 年 3 月 14 日

#### 1 古代ギリシアの物質観

世界は何でできているかと言う根源的問いかけに対して、紀元前 600 年頃の哲学者ターレスは万物の根源は水であると答えた。現在我々の持っている地球 46 億年の歴史の中で、最初の 1 - 2 億年にはすでに水があったと考えられている事からすると、この答えはあながち間違いではない。また、水が存在する事は生命発生の基本的要件であることを考えると、このことは誠に的を得ている。古代ギリシャで発生した四元素説は、この世界の物質は、火・水・土・空気 (もしくは風) の 4 つの元素から構成されるとする概念である。(図 1 参照) アリストテレスはこの四つの間に「熱・冷・湿・乾」の 4 つの性質において、それらの間の相互関係や相互転換を論じた。このアリストテレスの説は、キリスト教会の支持を受けて 19 世紀に近代科学の発展により物質の構成要素が議論され始める時まで続いた。また中国でも五行説として上の空気の代わりに木と金を加えたものが発展した。(図 2 参照) この五つは、当時知られていた五つの惑星、水星、金星、火星、木星、土星とは直接関係ないかもしれないが、古代においてそれらがお互いに影響し合っていたことは容易に推測できる。

古代ギリシャ社会においては、諸学問の間の境界は明確ではなく、哲学者は数学者であると同時に物理学者でもあった。例えば、ピタゴラスは、ピタゴラスの定理によってあまりにも有名であるが、その証明に必要な三角形の合同、相似、並びに比の概念は古代バビロニア時代や古代エジプトにおいてもよく知られていたようである。ピタゴラスは、あちこちを旅して、エジプトでは太陽の作る自らの影を観測してピラミッドの高さを求めたということである。彼はまた球の体積が球を正確に含む円柱の体積の 3 分の 2 であることを

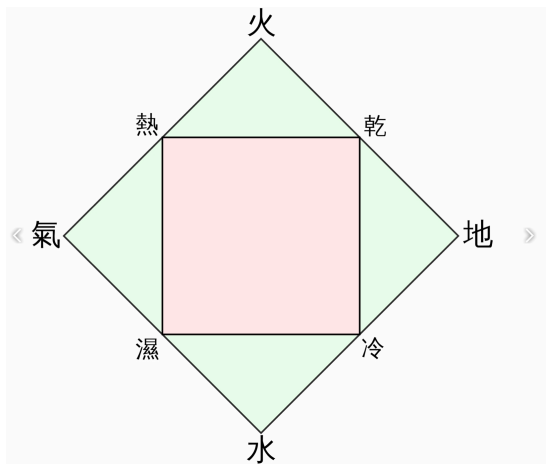


図1 四元素説における元素の関係図(中国語版)。「氣」は「空気」を意味する。Wikipedia より

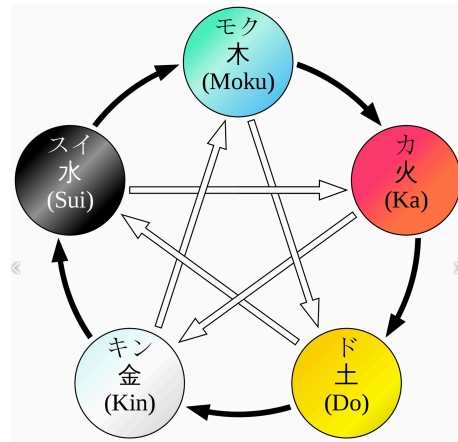


図2 中国の五行説。→ は相生(そうせい・そうしょう): 順送りに相手を生み出して行く、陽の関係。⇨ は相剋(そうこく): 相手を打ち滅ぼして行く、陰の関係。Wikipedia より

知っていて、それを自分の墓の石碑に記したそうである。彼にとっては、円は美しく完全なものであって、天体の運動は円軌道以外には考えられなかった。彼は音楽についても詳しく研究し、既に音階の概念を得ていたという。人間の耳に快く聞こえる和音の概念は、近世の言葉では、波長が二倍、三倍となっていく倍音の概念であり、数学の言葉ではフーリエ級数で表わされるが、ピタゴラスは惑星の軌道に和音の考え方を適用し、天体は美しい音楽で満ちているという考えに取り憑かれた。このことは、近代の前期量子論においてニールス・ボーアが原子核を回る電子の軌道がある特定の波長のものしか許されないとしたことを彷彿とさせる。

紀元前 300 年頃、エジプトのアレクサンドリアで活躍したユークリッド(正しくはエウクレイデス)は、ユークリッド原本の著者として有名である。彼は平面幾何学の原理を詳しく追求し、彼の名を冠するユークリッド幾何学は 19 世紀にヒルベルトによって平行線公理を仮定しない非ユークリッド幾何学が可能であることが明らかになるまで絶対的な権威を持ち続けた。しかしながら、ユークリッド原本は、まずアレクサンドリアからバグダッドのアラブ世界に伝えられ、それがヨーロッパに逆輸入されてラテン語に翻訳されるという道筋を辿って中世社会に伝えられた。ユークリッド以外にも、数学者アポロニウスは円錐曲線論を著して、今でいう二次曲線の一般論を展開したが、それが近世におけるニュートン力学と結びついて、 $1/r^2$  の法則に従う万有引力の結果であることには辿りつかなかった。

その後現れたシラクサのアルキメデスは、物理学者や数学者であると同時に技術者であり発明家であった。アルキメデスの原理については、次の節で詳細するが、彼は力の釣り合いやテコの原理についても熟知していた。「我に支点を与えよ。さらば、地球をも動かしてみせよう。」と傲言した話は有名である。力の釣り合い等の時間に依存しない力学を静力学という。アルキメデスはまた、円の面積を多角形で近似して $\pi$ の値を非常に正確に求めたことでも有名である。

ここでは詳しく述べないが、プラトンやソクラテスがその後のヨーロッパ社会で果たした思想的役割には計り知れないものがある。

## 2 アルキメデスの原理

ある時シラクサの王は、金工職人に金の冠を作らせたが、出来上がってきたものを見て、職人が与えられた金に銀を混ぜて不正を働いたのではないかという疑いを持つに至った。そこで王はアルキメデスを呼んで、その王冠がすべて金で出来ているかどうかを判定せよとの命令を下した。アルキメデスは、王冠を溶かすことなくこの問いに答えるべく頭を悩ませたが、ある日、公共浴場で体を湯船につけると湯が溢れ出し、その分自分の体重が軽く感じられた。この時突然閃いたアルキメデスは湯船から飛び出し、エウレカ、エウレカ（わかったぞ、わかったぞ。）と叫びながら、裸で街の中を通り抜けて家に帰って行ったということである。この話には、自分の体の体積を水の分量で測ることが出来るということと自分の体が押しのけた湯の質量だけ浮力を感じるという2つのことが混在している。以前にも話したように、質量とは何かという問題は難しいが、ここではニュートンに従って、その物体に固有の量、すなわち地球のどこに持って行っても、また月に持って行ったとしても、不変の量であると定義しておこう。密度を、

$$\text{密度} = \text{質量} / \text{体積}$$

で定義すると、これは物質ごとに決まった量であって、金と銀では違う大きさを持っている。(金は  $19.3 \text{ g/cm}^3$ 、銀は  $10.5 \text{ g/cm}^3$  である) 従って、王冠の密度が正確に測定出来れば、王様の要求に答えられるはずである。

実際には、アルキメデスは王冠と同じ体積の金塊を天秤でつるし、それを左右につけて釣り合うかどうかを確かめて、王の質問に答えたと考えられる。それには、浮力と重力の釣り合いの話をしなければならない。アルキメデスの原理とは、ある流体の中に物体を浸した時に、それが取り除く流体の重力と同じ力だけ上方向の力を受けるという原理である。この上方向の力を浮力という。2つの力が釣り合っている時、はじめ静止していた物体はそのまま静止を続ける。これは、力の釣り合いの原理であって、次の講義で述べるガ

リレオ・ガリレイの慣性の法則の特別の場合である。例えば、水の密度は約 4℃ の時最大であって、1 cc (1 cm<sup>3</sup>) はほぼ 1 g である。氷の密度は 1 g/cc より小さいので、コップの水に入れた氷は浮くことになる。これは氷の重力が氷の押しのけた水から受ける浮力と釣り合っているためである。また別の例は、大きな鉄鋼で出来た船が海面に浮かぶのは、船の重力と船が押しのけた海水が船に及ぼす浮力と釣り合っているためである。上のアルキメデスの天秤の例では、王冠と金塊の体積が同じであるにもかかわらず、王冠の比重が金塊の比重より小さいために、王冠の側が釣り合わないで上にあがることによって、王冠には不純物の銀が混ざっているということが分かる。後日談として、これによりこの金工職人は、不正を働いた角で処刑されたということである。

### 3 それ以後の科学技術の発展

紀元前 300 年頃、アレクサンダー大王 (アレクサンダー三世) によって作られたエジプトのアレクサンドリアは、ヘレニズム文化の中心地であった。アレクサンダー大王の父は、アテナイからアリストテレスを招き、彼の家庭教師とした。アレクサンドリアで天動説を唱えたプトレマイオスや生物、科学、医学等殆ど全ての分野で卓越した学識を持っていたアリストテレスの学問が、それ以後のキリスト教支配の権威の下に正しいものとされ、そうした物質観が 15 世紀に起きたルネッサンスの時代まで続いた。例えば、アリストテレスの運動の法則は極めて直観的なもので、物体が落下するのは、それが下の方に位置するのを好むからであり、気体が上昇するのは、その本来の場所が上空にあるからだと言われた。また物体の運動はその後ろにある空気が力を及ぼすからであって、その力がなくなれば物体は静止すると考えられた。実際、現実には空気の抵抗があるために物体は静止するのであるが、その空気の抵抗が殆ど無視出来るような状況を極限として考える発想はなかった。物体に力が働かなければ、最初静止していた物体はそのまま静止し続け、一定の速度で飛んでいるものは、そのままの速度で運動し続けるという、いわゆる慣性の法則は 1400 年代にガリレオ・ガリレイがその著書「天文学対話」と「新科学対話」の中で詳しく明らかにするまで待たなければならなかった。また、天体の運動については、アリストタルコスの主張した太陽中心説は退けられ、ピタゴラスの神秘主義に基づいた円運動が完全なものであるとの信仰から、プトレマイオスは地球を中心として円軌道を複雑に組み合わせた惑星の運動の理論を完成し、それが長い間信じられた。しかし、実験精度が増すにつれ観測とのズレが目立ちはじめた。1,600 年代初めにポーランドのクラコウで活躍したコペルニクスは「天球の回転について」という著作をあらわして、太陽を中心とする地動説を唱えたが、そのあとすぐ死去したためにローマ教会の反発を招くことはなかった。彼の

著作は、1,400 年代中頃マインツでヨハネス・グーテンベルクが開発した活版印刷の技術によってヨーロッパ全土に広まった。ほぼ同じ頃、ティコ・ブラーエの豊富な観測データとそれを詳細に分析した後継者のケプラーの研究によって理論と実験との違いが益々明らかになり、ケプラーは、天体の運動について、ケプラーの 3 法則と呼ばれる法則を発見した。これは後日ニュートンの力学の法則と万有引力の法則によって完全に証明された。ケプラーがガリレオ・ガリレイに宛てた手紙が存在しているそうである。ガリレオ・ガリレイは種々の研究を通じて天動説に代わって地動説が正しいことを確信するに至ったが、キリスト教会の弾圧を受けて宗教裁判にかけられ、自らの説を放棄するように強要された。法廷から出たとき「それでも地球は動く」と呟いたと言われる。

ここで、当時の時代背景について振り返ってみるのもあながち無駄ではあるまい。300 年代初め、ローマ皇帝コンスタンチヌスがキリスト教を容認して以来、政治的指導者の間にもキリスト教を信棒する者が広まり、300 年代末にはついにキリスト教はローマ帝国の国教となって大きな政治的基盤を得るに至った。コンスタンチヌス帝はニカイア宗教会議を開くなどしてキリスト教の一本化に努めた。その後、アウグスティヌスや数多くの聖人たちが現れて、ローマ帝国内でのキリスト教社会が成立したが、それは多分に古代バビロニア、エジプト、ギリシャ文明の発展の歴史をキリスト教内に織り込んだものであった。

ローマ帝国の西側領域では、ゲルマン・ケルト人の諸部族からなる西ゴート帝国やフランク帝国が次々に興って領内を分割統治したが、いずれもキリスト教文化を継承した。こうしたキリスト教の絶対的支配は 1453 年に東ローマ帝国 (ビザンティン帝国) がオスマントルコによって滅ぼされるまで続いた。この間、7 世紀初めにはメッカから出たマホメッド (ムハマド) がイスラム教を興し、瞬く間に中央アジア、西アジア、シリア・パレスチナ、エジプト、北アフリカ、イベリア半島を統一した巨大なイスラム教帝国を作り上げた。その勢力が最大となったアッバース朝サラセン帝国は、その首都をバグダッドに置いて、東西文化と交易の中心地となった。当時、バグダッドと唐の都長安 (今の西安) は、人口 100 万を超えるメガポリスであった。バグダッドにはアレクサンドリアにあったムセイオン (研究所) や大図書館に匹敵する「知恵の館」という施設があり、莫大な量の文献がアラビア語に訳され、当時流通し始めた紙を使って大量の書物が作られた。ローマ帝国は東西に分かれて、かろうじて東ローマ帝国が生き延びていたが、絶えずセルジュークトルコなどのアラブ勢力に脅かされていた。ヨーロッパとアジアの間の交易は、ローマ初期からタクマラカン砂漠を経由するシルクロード (絹の道) を通じて行われていたが、イスラム勢力の脅威によって海の貿易路を整備する必要に迫られ、海洋技術の発展に伴い地中海を経た貿易路が盛んに使われるようになった。

イスラム勢力はエルサレムを戦いとしてイスラム教の聖地とした。11 世紀 - 13 世紀に

は、キリスト教の聖地エルサレムを奪還するために、十字軍が組織され、ローマ皇帝と東ローマ皇帝、イスラムの三勢力の生臭い戦いが繰り広げられた。この時代は中世の暗黒時代といわれることも多いが、それは文芸や学問を担うべきはずのキリスト教の修道院が大きく腐敗していった時期でもある。ローマ教皇によって任命された聖職者たちは、教会法(カノン法)の維持に窮々とするばかりでアリストテレスの自然科学や思想、哲学の論理を発展させることには全く興味がなかった。そればかりか聖書は修道院の奥深い所に鎖で繋がれて置いてあって、僧院は一般民衆にそれを閲覧させてお金をとる始末であった。ただ一つその時代の知識の発展に寄与したのは、先程の「知恵の館」などの支配者によって創設された施設や、この頃出来始めた中世の大学である。11世紀には、イタリアのサレルノで最古の大学といわれるサレルノ大学が創設され、ヒッポクラテスに始まる医学が教えられた。12世紀には、ボローニャ大学が創られ、ローマ法等の法律が教えられた。神学をはじめとする多くの科目が教えられ始めたのは、パリ大学が最初である。それ以後、イギリスのオックスフォード大学やその他の大学が、ヨーロッパで次々と創設され続けた。スペインで最古の大学、サラマンカ大学は1200年代の創立であり、「知識を得ようとする者はサラマンカに行け」と言われたそうである。かの有名なコロンブスも、航海の為に経費援助をスペイン国王(カルロス1世)に申し出る為にサラマンカ大学に入学したということである。

1453年コンスタンチノーブルが陥落すると、東洋貿易の為にまた別の経路を認める必要が起り、地球が丸いと考えていた人達は、大西洋を西へ西へと航海するとアジアに到達するのではないかと考えるようになっていた。とりわけマルコポーロの著した「東方見聞録」は、1400年代半ばに開発された印刷技術の発展によりヨーロッパ内で広く読まれることとなり、中国、日本等、東アジアへの憧れを益々増大させた。コロンブスは東方見聞録を繰り返し読んで細かい書き込みをしていたそうである。1492年、彼はついにインドに到達したと思い込んで、東インド諸島を発見し、新大陸の発見につながった。いわゆる大航海時代の始まりである。その後、バスコダ・ガマは、南アフリカの喜望峰を経たインド航路を発見し、マゼランは世界一周の旅を果たし、南米のパタゴニアや南アメリカ南端のマゼラン海峡、更にフィリピンをはじめ太平洋の多くの島々を発見した。

14世紀から16世紀にかけて、ヨーロッパではルネサンス(文芸復興)と言われる大きな流れが起きた。これはギリシア・ローマ時代の文芸、美術、彫刻、芸術、思想、哲学、自然科学、技術等々に復帰して、停滞した中世社会の雰囲気を一掃する一大変化であった。1453年に首都コンスタンチノーブル(現在のイスタンブール)が新しく興ったオスマントルコによって滅ぼされた時には、コンスタンティノーブルを中継地として地中海貿易で栄えたイタリアの諸都市(ジェノバ、ベネチア、ピサ、...)は大きな経済力を蓄えてい

た。中でも、銀行業で財を成したフィレンツェのメディチ家はローマ教会に大きな影響を及ぼすと同時に、多数の優れた人材を招き入れ、パトロンとして彼らを養った。例えば、壁画「最後の晚餐」を描いたレオナルド・ダ・ビンチは画家であると同時に優れた技術家、発明家であった。彼の描いた「モナリザ」は、ルーブル博物館に展示されている。優れた彫刻家であるミケランジェロのダビデ像は、今でもフィレンツェに行けば見ることができる。イタリアで興ったルネサンスは順次ヨーロッパを北上し、イギリスでは劇作家シェークスピアや「ユートピア」を著した人文学者トマス・モアが現れた。オランダでは人文学者エラスムスが「痴愚神礼讃」を著してローマ教会の腐敗を厳しく諷刺した。彼はまたラテン語・ギリシア語対訳の新約聖書を出版したことも有名である。1,500年代に入ると、ドイツにマルチン・ルターが現れて、ローマ教会の発行した免罪符に対して異議を申し立てた。当時の神聖ローマ帝国皇帝はカール5世(スペイン国王、カルロス1世と同一人物)であったが、その地域を支配していたザクセン選帝侯、賢公フリードリヒ3世の庇護を受けてローマ教会からの異端宣告をかわし、その後の宗教改革の発端を築いた。この新しいキリスト教の宗派は一般にプロテスタントと呼ばれるようになり、ドイツや北欧に幅広い信者を得た。ローマ皇帝カール5世の追撃を避けた彼はフリードリヒ3世の下に逃げ込みヴァルトブルク城にかくまわれた。彼はそこで数年の間、聖書のドイツ語翻訳に専念した。彼の訳したドイツ語がその後のドイツ語の統一に大きな役割を果たしたと言われている。実際には同様な宗教改革の兆しはそれ以前にもヨーロッパの各地にあった(アルプスのピレモンテ渓谷に住むワルデンセスの人々、フランスのリヨンに起こったワルドー派、イギリスのウィクリフ、ボヘミアのフス、等)が、マルチン・ルターとその後ジュネーブで活躍したフランスのカルヴィンやスイス人のツヴィングリ、オランダのユグノー派の人々、イギリスの清教徒(ピューリタン)と呼ばれるプロテスタントの諸派の人々が世界史に及ぼした影響は計り知れない。一方ローマカトリック教会でも反省を促す運動がイグナティウス・ロヨラの率いるイエズス会を中心として興り、多くの宣教師たちがアジアに向けて旅立った。1,500年代の終わり頃にはフランシスコ・ザビエルがキリスト教を日本に伝えた。また、フランスでは1,600年代のはじめ頃「哲学の父」と呼ばれるデカルトが現れ、近代科学の基本的的方法論である演繹と帰納の考え方を確立した。彼の「我思う、故に我有り」(ラテン語でコギト・エルゴ・スム)という言葉は有名である。彼は数学の面でも卓越した業績をあげ、解析学の創始者と言われる。未知数を  $x, y, z, \dots$  とアルファベットの後ろの方で表す習慣は彼に始まるとされている。さらに3次元ユークリッド空間(3次元直交空間)はデカルト座標(Cartesian coordinate system)と彼の名前を冠して呼ばれている。しかし、太陽系を渦巻き状とする等、現代から見れば間違いも多く、彼の著作である「世界論」では、地動説を唱えながら、ガリレオ・ガリレイの異端

宣告を聞いて、その出版を見合わせたということである。彼は「慣性の法則」についても気がついていた。

次回と次々回ではガリレオ・ガリレイに始まってニュートンで完成を見た力学の法則とその後のファラデーによる電磁気学の発展について学ぶ。