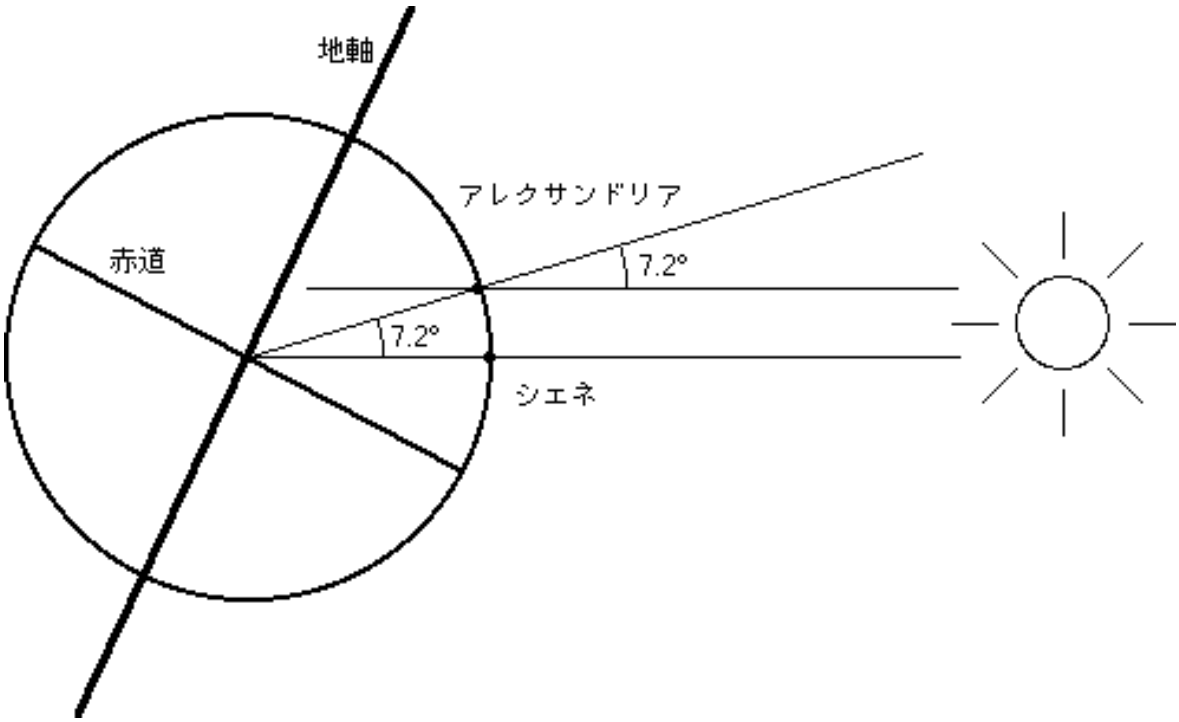
地球を測る

渋谷　秀敏

地球は丸い。地球が球形であると認識されたのはルネサンス＝大航海時代だと考える人も多いであろう。確かに一般的に広まったのはその時期である。しかし、球形であるとの認識を持った人がいたという意味ではギリシャのピタゴラス学派（紀元前６世紀）まで遡ることができる。豊富な文献が得られるのは西洋ではギリシャ時代からであることを考えれば、文献でさかのぼれる限りの古さを持っていると言える。彼等は港に近づく船が、凪の日で波がなくてもマストの先から見えはじめることや、北極星が南へ行くほど低くなることなどから地球が球形であることを理解した。アリストテレス（紀元前３８４～３２２年）は月食が地球の影で起きることを看破し、地球が球形である証拠と考えた。地球の大きさもそれから程なく見積もられている。ヘレニズム文化の中心地アレクサンドリアに居たエラトステネス（紀元前２７６～１９５年）は夏至の日の太陽高度を用いて測定をしている。彼はナイル川沿いに５０００スタジア遡ったところにあるシェネ（現在のアスワン）では夏至の日に太陽が真上を通り、正午には深い井戸の底まで日が差すことを知った。現在の言葉に直せばシェネは北回帰線上にあったのである。そこで、彼はアレクサン

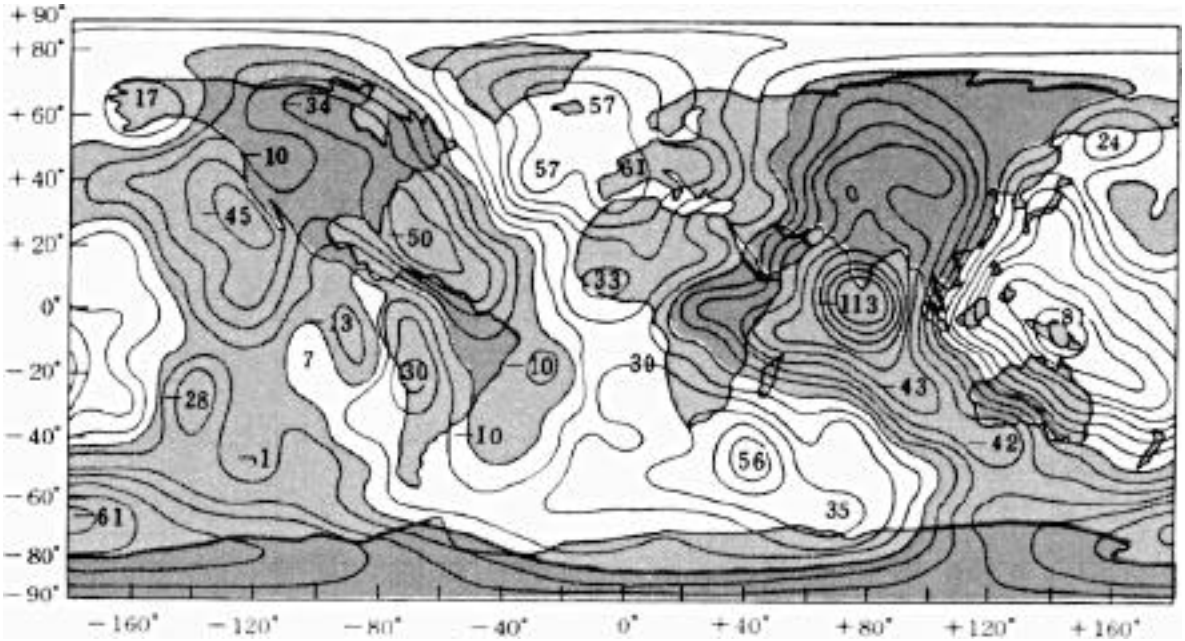


第１図　エラトステネスによる地球の大きさの測定法。

ドリアでの夏至の日の太陽の南中高度を測定し、天頂から１周の 1/50 の角度（7.2 度）だけ離れたところを太陽が通ることを見い出した。これから地球一周の長さが 5,000スタジア×50＝250,000スタジアであると計算した。この結果は、現代の単位系に直すと4,600Kmで正しい値4,008Kmより15%ほど大きいだけであるばかりでなく、異なる緯度の２点間の距離を測り、その間の角距離を天体観測で求める方法は、人工衛星による方法が出現するまで続いた方法であった。

この後地球の形に対する理解が大きく深まったのは、ルネッサンス＝大航海時代を過ぎてニュートンにまで下ることとなる。ニュートンは地球の自転に彼の力学を応用して地球は極半径よりも赤道半径のほうが 1/230 長いはずだと述べた。この値自身は地球の内部の密度分布の仮定が変化すれば多少は変動し、実際の値は 1/298.257であるが、赤道半径の方が長いという結論は現在の我々から見れば、動かし難く思える。しかし、当時はニュートン力学も誕生したばかりでその適用範囲をどのように考えれば良いか評価が確定していたとは言えない。フランスの大科学者であったカッシーニはフランス国内の測量結果から地球の形はラグビーボール型で極半径の方が長いとの主張をして対立していた。カッシーニの主張の最大の難点は測量がフランス国内であったので緯度による経線の長さの違いを議論するには緯度の差が小さすぎたことであった。そこで、フランスアカデミーとルイ１５世は極に近いラップランド（ヨーロッパ北方）と赤道上の南米スペイン領ペルー（現在のエクアドル）に経線の緯度差１度分の長さを測るための測量隊を派遣した。実はこれにはフランスの南米への領土的野心が絡んでいたので南米隊のほうは政治に翻弄されたり、困難な気候や風土に阻まれたり、恋や決闘が起こるなど、波乱万丈でそれだけでも非常に面白い物語となっているが、それは『地球を測った男たち』（フランス・トリストラム著）を読んでいただくとして、その結果極半径の方が赤道半径よりおよそ20Km短いという現在の測定と非常に近い測定結果が得られた。この測定結果は後のフランス革命の際に新しく制定されて現在も使われているメートルという長さの単位の起源となっている。すなわち、地球の極から赤道までの長さ（子午線象限と言う）の一千万分の一を１メートルと定めたときに使われた子午線象限が彼等の測定結果から計算されたものである。この後メートルの定義はメートル原器の長さになったり、特定の原子が出す光の波長に基づいたり（詳しくは理科年表の物理部を参照）して、実際の子午線象限は10,001.970Kmと測られているが、普通の感覚では地球一周４万キロメートルと思って差し支えない。

次に地球の形に対する理解が大きく進んだのは人工衛星の実現にともなってである。人工衛星は事実上地球の重力の影響を受けて地球の周りを回転する。従って、人工衛星の軌道を注意深く観察すれば地球による重力場を知ることができる。そこから、重力の等ポテンシャル面を決定できる。ところで、海面は潮汐、海流、気圧などの影響が小さいと考えると、等重力ポテンシャル面であるはずである。そのポテンシャル面を陸上に延長したものを考えて、ジオイドと呼ぶ。そこで、地球の形



第２図　ジオイドの形状（『新しい地球像』による）。本文中の楕円体からのジオイドの高さの変位の等高線を示している。単位はｍで等高線の間隔は10m。プラスは出っ張りマイナスはへこみである。

をジオイドの形とそこからのずれ即ち陸の海抜に分けて考える。人工衛星で知ることのできるのは重力場の形であるから決定できるのはジオイドの形である。ある地点の海抜は地表の測量で知ることができるから、地球の形を正確に決定できるという寸法である。もっとも地球科学において地球の形といえばジオイドの形を意味する場合も多く、その場合は人工衛星の軌道を注意深く観測するだけで得ることができる。

現在の最も進んだ方法で決定されているジオイドの形は、赤道半径が6,378.140Km、極半径が6,356.755Kmの上下にほんのわずかひしゃげた回転楕円体で代表される。それからのずれは±100m程度で非常に小さい（第２図）。また、その分布にはあまり規則性はない。諸君は地球が西洋梨型であると習ったかもしれないが、それは人工衛星の軌道の解析の初期の段階でジオイドの凸凹を緯度方向に平均した値しか得られなかったときに言われたことで、実際には緯度方向のジオイドの凸凹と経度方向のジオイドの凸凹は同程度で西洋梨型というよりはじゃがいもとでも言ったように規則性なくでこぼことしている。

以上のように地球の形の認識は丸い地球からひしゃげた地球、凸凹した地球へと進んできた。しかし、これらの丸くない地球は丸い地球のほんのわずかのずれを問題にして測地学（地球の形や重力場を測る学問）が発展してきた歴史である。ここで、実際の地球の形がどのようなものであるか実感としてもう一度捕え直して見たい。半径6,400Kmでは実感が湧かないであろうから半径64cmの地球儀を考える。直

径1.3mのかなり大きな地球儀である。そのときに、極半径と赤道半径はどの程度違えたら良いのであろうか。地球の場合は約21Kmの違いであるからこの地球儀では2mmの違いとなる。これは、目で見ても絶対にわからないし、作るときにも普通に作ったら制作の誤差のほうが大きくなるような値である。早い話が丸い地球儀を作ればよいのである。山の高さはどれくらいになるのであろうか世界で一番高いエベレスト山の高さが8,848m。これは地球儀上では0.9mmに相当する。海の深さももっとも深いところでも10,000m程度であるから1mm程度になる。地球儀を作ってこの程度のでこぼこを作らないようにするのは大変である。これが、ジオイドのでこぼことなると100m程度であるから0.01mm程度にしかならない。地球は本当に丸いのである。

では、なぜ丸いのであろうか。もし、地球が丸くなかったとすればどうなるか考えて見よう。飛び出したところは現在の山よりよほど高い山となる。現在でも山は次第に削られて低い土地を埋めている。山が高くなればその作用はより強くなるはずである。その結果ジオイドに近い形に次第に近づいていく。ジオイドの形は重力場の形で、重力は方向を差別しない。つまり、地球が丸いのは重力場に方向性がないからである。わずかに自転による方向性があって、それが球形からの最大のずれとなっている。

ところで、先ほどの地球の模型は地球の環境を理解する上でも非常に有用である。大気の層の厚さは数10Kmである。これは、先ほどの地球儀で言えば数mmにしかすぎない。スペースシャトルも地球を飛び出してと言われるが、高さはせいぜい100Km程度で我々の地球儀に直せば1cmのところを飛んでいる。と言うより這っていると表現したほうが適切かもしれない。大気の層のこの薄さを考えれば大気汚染がそう簡単に拡散せずに非常にせまい領域にとどまるのも不思議ではない。台風も

			太陽＝十円玉	
	半径 (km)	軌道半径 (E6km)	半径 (mm)	軌道半径 (m)
太陽	6.96E+05		7	
水星	2439	57.91	0.025	0.6
金星	6070	108.21	0.061	1.1
地球	6378	149.6	0.064	1.5
火星	3395	227.94	0.034	2.3
木星	71300	778.3	0.717	7.8
土星	60100	1427	0.604	14.4
天王星	24500	2869	0.246	28.9
海王星	25100	4498	0.252	45.2
冥王星	3200	5900	0.032	59.3

第１表　太陽系の主要なメンバーの半径と軌道半径及びそれらを太陽が7mmまで縮小したときの値

高さが10Km程度で直径が数百Kmの非常に平たい渦巻きである。水平に10Km進むのは何でもないが垂直に進む10Kmは大変な困難がともなうので、我々に認識は往々にして垂直方向に非常に拡大されたものとなっているが、１対１の図を考えることを心がけて見れば非常に異なった世界が見えてくる。特に、地球、宇宙と言った普段と非常に異なるスケールのものを考える際には重要である。

もう一つこのような例を上げると、太陽と惑星の関係がある。科学の普及書を見れば太陽の周りに惑星が書いてある図がよく見られる。しかし、実際の太陽系では惑星は非常に小さく、惑星の軌道を正しく書けば、木星ですら小さすぎて書くことができない。これも、同様に模型で眺めて見よう。第１表は太陽系の主要なメンバーの半径と軌道半径である。また、右には太陽を半径7mm、10円玉程度にしたときの半径と軌道半径を記してある。こうすると太陽系は陸上競技のトラック程度の大きさとなる。太陽はその中心に置いた10円玉。地球はその中心から1.5m離れたところにある。直径0.1mm程度のけし粒にもならない小さなもの。木星ですら直径1.4mmにしかならなくて、中心から7.8mのところを回っている。そのようにまばらな太陽系が浮かび上がってくる。太陽系はほとんどがなにもない空間なのである。また、このスケールで一番近い恒星は400Km離れていることになっる。太陽系が長居競技場にある10円玉とすれば、隣の星は静岡の草薙球技場にある10円玉といったところであろうか。太陽系を一歩出ればもっとまばらでなにもない空間が広がっているのである。

地球を測る話は数字の話であった。しかし、このように測った結果が我々の普段扱っている数字と大きくかけ離れているときはそのままでは理解したこととならない。直観的にわかる長さに縮小して（逆に小さなものを対象とするときには拡大して）比率はいかほどか見れば理解が進むことが多い。これは、長さの問題だけでなく、時間でも同様であろう。たとえば人類の地球に対する影響を考慮するときには人類が生まれてから現在までの時間の地球全体の歴史に占める大きさを理解しておく必要があるであろう。

参考文献

新しい地球像（三訂版）、Derek York 著、日本地学教育学会訳編、秀潤社 1990 年
地球を測る、大塚道男著、朝日選書 155、朝日新聞社 1980 年
地球を測った男たち、フロランス・トリストラム著、喜多迅鷹・デルマス柚紀子訳、リブロポート 1983 年