

重力を検知できない加速度計



(仮想講演)

原 宣一

はじめに

本日は「重力を検知できない加速度計」と題してお話しいたします。この標題を見て「おや？」と思われた方も多くいらっしゃるでしょう。実は私も、ずっと四半世紀を超えて長い間、1年前まで、勘違いをしておりました。加速度計は重力を検知すると思っていたのです。

昔の同僚で飛行解析の担当だったTさんには「加速度計が重力を検知できないのは常識ですよ」と一言で諭されてしまったのですが、私にも勘違いしていた言い訳はあったのです。

最初に何故、私は加速度計が重力を検知できると考えていたのかを振り返ってみましょう。きっと、皆さんも昔の私と同じ理由で「加速度計は重力を検知する」と考えておられるのではないかと思うからです。

そしてこの理由が判るとニュートンの万有引力にも新たな展開が開けてきます。

1. 加速度計が「検知？」する重力

最初に思い出すのは私が宇宙開発事業団でロケット設計Gにいた頃です。私はNロケットの開発に携わっていました。

Nロケットには誘導機器の一つで加速度計を搭載しています。Nロケットは所定のスピードに達したらエンジンの燃焼停止をさせます。所定のスピードに達したことを知るために、加速度計の出力を時々刻々と積分しているのです。この積分値はベロシテイ・カットオフ・スイッチ(VCS)という機器に入力され、VCSからエンジンに停止信号が送られるようになっていました。

このロケットに使う加速度計の校正には、横に置いた加速度計の出力をゼロにセットし、垂直に立てたときの出力を1gの加速度値にするということでした。私は直接の担当ではありませんので、聞いた話です。精度はどうなのか、いろいろ聞いたことはあったのですが、忘れえました。少なくとも信号のプラス・マイナスの極性チェックで配線が逆になっていないかは、こんな簡単な試

験でも判るでしょう。つまり、加速度計は重力を検知していると無意識に判断したのです。

ついでに、Nロケットの誘導で一番重要で手のかかる機器はジャイロ基準装置というロケットの姿勢を計測するものでした。この機器の校正は地球の自転を検知することで行われていました。担当者はアースレートと言っていましたので、これを直訳すると地球率ですが地球の自転速度のことです。地球の自転は昔の時計みたいなものですから、これ以上確かなものはないでしょう。しかし、地球の自転は24時間で360度ですから、人間の三半規管ではとても感知できません。1960年代のロケットに搭載するジャイロの精度は、既に地球の自転も検出できるほど高感度だったのです。もしガリレオの時代にこのジャイロがあれば、「それでも地球は回っている。これを見よ。」と言って、教会の圧力に勝てたでしょう。

次にご紹介するのは航空機の加速度計です。御巢鷹山に日航機が墜落した事故報告書です。10年ほど前になりますが、この報告書に付属していた飛行データを見ていて、一つ不思議に思うことがあったのです。

それは機軸加速度計がわずかにプラスの状態が続いているのに機体の速度は変化していなかったのです。これはどういうことかと考えました。そして判ったのは機体の速度が巡航速度より遅く、そのため揚力を保つために機体の迎え角が少し付いた状態で

飛んでいたということだったのです。機軸加速度計は水平に取り付けられていたでしょうから、仰角がつくと重力の成分を感じてしまうということだったのです。

このときは「ああそうか」と判ったものですから、なおのこと「加速度計は重力を検知する」との強い思い込みが出来てしまったのです。

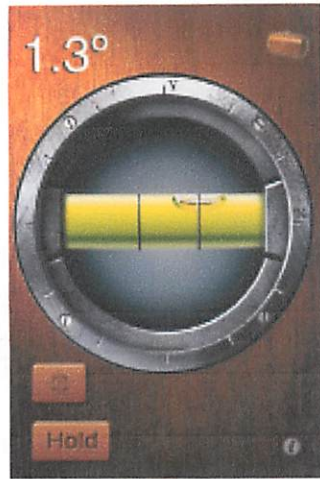
最後の例は、もう「加速度計は重力を検知しない」ことを私も納得してからのことです。それはアップルから販売されたアイパッドです。

アイパッドで写真を見ると、アイパッドを横にしますと、自動的に写真も横に回って画面一杯に大きく表示されます。これは中に加速度計が入っていて、重力を検知するからです。アイパッドを回した時の回転力を検知するものでないことは、いくら静かに横にしても、画面は45度ぐらいの角度でさっと回ることから判ります。

アイパッドをだまして、画面を回転させずにアイパッドを回す方法があります。それはアイパッドを水平にして静かに回せば良いのです。しかし、アイパッドを立てた状態で写真を逆さまにみるには、横についている画面固定のスイッチをオンにするしかありません。

アイパッド用に無料のアプリケーション・ソフトで「レベル」というのがあります。アイポッドと共通のソフトです。これをダ

ウンロードして組み込みますと、丁度大工さんが水平を見るときに使う水準器のような画像がでます。アイパッドを傾けますと、本物の水準器のように空気の泡が動くのです。そしてさすがにアイパッドはデジタル機器です。数字で角度表示も出るので、90.0度からマイナス90.0度まで、0.1度刻みで表示されるのです。精度は怪しいと思いますが、この加速度計の分解能は結構高いのだと判ります。アイパッドに組み込まれているのですから、結構小さなものだと思いますが、良くできていると感心します。アイパッドの「レベル」が実用になるとは思いませんが、科学玩具としては合格です。

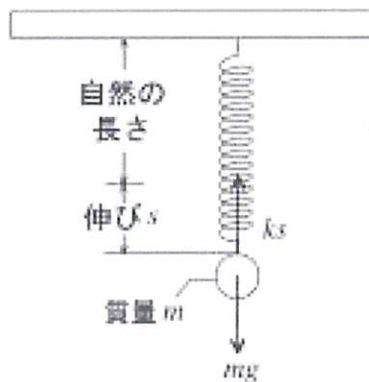


このように小さくて高感度の加速度計なら、6個付けて差分を取れば回転も含めて6自由度の動きを検知できるでしょう。例えば、村田製作所が作って宣伝に一役買っている自転車をこぐロボット「ムラタセイサクくん」はこのような加速度計がいくつも積みまれているでしょう。やはり回転運動はジャイロでないと精度良い制御はできないかもしれません。

3

2. 加速度計の原理

加速度計とはどんな機器なのか、具体的にイメージを持つて頂きましょう。実際の物はいろいろな方式のものがありますが、原理は同じで簡単です。原理とする加速度計はバネと錘で出来ています。バネの一端をケースに取り付け、他方の端に錘を取り付けてケースの中を自由に動けるようにしてあるものです。加速度が加わりますとバネが伸縮しますので、その錘の動く量をみて加速度の大きさを知るという仕掛けです。



実際のもものは加速度が加わっても錘が動かないようにコイルに電気を流して元の位置に留めます。その時に必要な電流の大きさを加速度を知るといシステムで、リバランス型と言います。実際に錘が動いても正確にその量を物差しで測るといこと

方が難しいわけでは

アイパッドやカーナビに付けられている加速度計は加速度センサーと呼ばれる方が多いと思いますが、加速度計に違いはありません。これらのセンサーは先述の通り、似ても似つかぬ構造ですが、原理的にはバネと錘です。

「速度計は重力を検知できない」ということが今日のお話の主題であるわけですが、先ほどお話しした重力を検知しているように見えるのはどういうわけだったのでしょうか。

それはいずれも、バネの錘でない方の一方の端に加わる反力を検知していたのです。ロケットの加速度計の場合、横においた加速度計を縦にしたときに、錘の重さに従ってバネが縮みますが、そのとき机においた加速度計の底からの反力を検知していたこととなります。

飛行機の加速度計もアイパッドの加速度センサーもいずれも重力を検知しているように見えて、実際は反力を検知しているのです。

3. 重力を検知できない加速度計

加速度計が重力の反力を検知しているのなら、重力を検知しているのと、結局同じことではないかと反論したくなる方もおられるでしょう。

加速度計を宇宙ステーションに持ち込んだらどうでしょうか。

これは明らかにゼロを示すことが予想できません。地上で加速度計を横に置いたときと同じです。アイパッドを宇宙ステーションに持ち込んでも地上で使うようには使えません。

それでもなお、宇宙ステーションの中では重力と遠心力が釣り合っているから加速度計もゼロを示すと考えられます。

それでは、嘘でない証拠に、現在利用可能な文献にどのように書かれているのか見てみましょう。

茂原正道著「宇宙工学入門」（1994年）には次の記述があります。

「このとき重力加速度は加速度計では検知できないので、計算機に重力モデルを準備し、別に計算する。」

富田信之、他著「ロケット工学基礎講義」（2001年）には、次の記述です。

「7.3節で述べるように、加速度計は非重力加速度成分のみを検出するので・・・」

これらの本は比較的新しい本ですが、これらの本の虎の巻にあたる本が1961年に米国で出版されています。Handbook of Astronautical Engineeringという本でフォン・ブラウンが編集責任者です。当時のNASAや航空宇宙関係企業の最先端技術者が分担執筆をしている1000頁は下らないと思われる分厚い本です。

この本を見ると、半世紀も前に既にここまで進んでいたのかと、

驚かされます。因みに、space station という単語もでてきます。この時代の宇宙ステーションの役割は、宇宙実験室と月や惑星へ向かうロケットの組立整備場所であると考えられていたことが判ります。

この本の第13章に「計器で検知できる加速度は『重力ではない力による加速度だけ』である」と書かれています。そこで何故かという理由が書かれているところを探しますと、次のような表現が見つかりました。

When a vehicle is on the launch pad, or an inertial accelerometer is being tested in a fixture, the response of an accelerometer to gravity, which is the vector sum of gravitational attraction and centrifugal forces, is not inconsistent with the previous statement that inertial accelerometer will not measure gravitational accelerations. Since the accelerometer actually measures in a reference frame which has an acceleration equal to the local gravitational vector, the accelerometer must measure the restraining forces which prevent the accelerometer from falling and which accelerate it in the frame in which it measures. These restraining forces, which are given by the launch pad or the test fixture, are in every way similar to the thrust, lift, and drag forces which occur in flight.

後半が探した理由の記述です。「加速度計は実際に重力に従って加速している基準座標系において測定するのだから、その加速度計は自由落下から加速度計を妨げる、そして測定する座標系のなかでそれを加速するところの、拘束力を測定しなければならぬ。これら拘束力は、射点の台座や試験治具によって与えられるものだが、飛行中に起こる推力、揚力そして抗力にあらゆる点で相似なものである。」

まあこんなことを言っているようですが、判ったような、判りくい説明です。もう少し、じっくり考えてみる必要があります。まだ、重力を検知できないということが腑に落ちない方がいらっしやるでしょう。では加速度計を宇宙機に乗せてあらゆる星から遠く離れた宇宙の彼方に持っていたと想像してください。重力はゼロに近いですから、ロケット・エンジンを止めると、この加速度計はゼロを示すでしょう。そこで次に、地球の近くまで戻ってきて、エンジンを止めて地球に向かって自由落下させます。このときも加速度計はゼロを示すでしょう。重力の存在を検知できないからです。宇宙機が木星や土星の重力を利用してフライバイにより加速するときも同じです。宇宙機に搭載された加速度計はゼロを示したままです。

4. 重力を検知できない真の理由

ここからは私の考察が加わります。誤魔化されないようにしつ

かり聞いてください。

宇宙ステーションの中では加速度計は常にゼロを示します。つまり地球の重力場にありながら、重力を検知していません。この理由は遠心力と重力が釣り合って無重力状態にあるからだと説明されてきました。

宇宙ステーションのように地球を回っているのではなく、スペース・ワンのように高度100kmまで弾道飛行をする宇宙機のなかではどうでしょうか。ロケットのエンジンが停止した後は無重力状態になりますから同じように加速度計の指示はゼロになります。この場合は重力と慣性力が釣り合っているからであると説明されます。つまり、宇宙ステーションでの遠心力も慣性力であるということです。

すると、重力は常に慣性力と釣り合っているということになります。加速度計に重力以外の外力が加わりますと、その外力がロケット・エンジンから来るものであれ、大気との摩擦力であれ、必ず加速度計のバネに伸縮がありますから、加速度を検知できます。重力分は常に慣性力と釣り合っている状態しかなのです。これが重力を検知できない常識的な理由です。

ここでもう少し考えるとこの常識とされた理由を覆すことになりません。

重力は常に慣性力と釣り合って検知できないというのは口実で、本当は重力という力が作用していないのではないかという疑

いが出てきます。

重力が100ニュートン(N)作用しているのだけでも、慣性力が100Nで打ち消しているので合力はゼロです。または、月の近くでは50N作用していますが慣性力と釣り合って合力はゼロです。何時でもどこでも重力は慣性力と釣り合って常にゼロです。このように言わなければならぬことは、力が掛かっているかないことと同じではないでしょうか。見かけの力と見かけの慣性力が釣り合っているというのは実際に意味があるのだろうかということなのです。

コーヒーのコマースシャルではありませんが「違いが判る」ことが大事です。「違いが無いのを同じと言う」のは一種の等価原理です。力が掛かっている状態と、重力が慣性力と釣り合っている状態は同じだということです。結局、宇宙ステーションでは重力が慣性力と釣り合っているため無重力状態にある、ということは何も掛かっているかないことと同じなのです。

真空中を地球に向かって落ちていく物体は自由落下の状態にあります。自由落下の状態は重力と慣性力が釣り合っているから合力としての力は働いていません。それでも物体は地球に向かって加速しながら落ちていきます。

重力と慣性力が釣り合い状態にあると言う説明はダランベールの原理を背景にした説明なのですが、慣性力を見かけの力とすると釣り合い状態にあると考えられるというものです。

見かけの力と言っても外力と釣り合う慣性力は実際の力です。バケツに水を入れて水平に振り回しても水は慣性力でバケツの底に押し付けられてこぼれません。実際の力だからです。

重力と釣り合っているとされる慣性力はどのようにしても検知できません。ダランベールの原理で見かけの力でもなく、幻の力です。すると幻の力に釣り合うことができる力は幻の力ではありません。

私たちは力学を、質点系の力学として学びます。つまり、物体は、質量だけはあるものの体積の無い点であるとして、力の釣り合い式などを作ります。この数学的なモデル化で必要な解析は出ます。しかし、物体に働く応力の有無までは記述できません。従って、外力と慣性力の釣り合いも、重力と慣性力の釣り合いも同じように見えてしまうのです。この点が、質点系力学の盲点だと思います。

重力は「力」でなくても物体を加速させる働きはあるのです。「重力」は自然界に存在する Gravitation の訳語ですが、「力」でないのですから「汎加速度」とでも訳す方が良かったのです。

「重力が力ではない」ということは現在の常識に反しています。しかし、これを一度認めてしまうと、加速度計が重力を検知できないのは「重力が力ではない」からだという説明で簡単に納得できるかもしれません。

重力が力でないということ、まだ納得できない方も、重力が

加速度運動を起こすことは認められるでしょう。エレベータのロープが切れるとそのエレベータはどんどん早く落ちていきます。重力は加速度運動なのです。

では重力が加速度運動であるならば、加速度計は何故重力加速度を検知出来ないのでしょうか。加速度計という名に値しないではありませんか。

5. 問題の所在

「宇宙機が重力によって地球の中心に向かって自由落下しているとき、その宇宙機に取り付けられた加速度計は何故重力加速度を検知できないのであろうか。」

これが当初の問題の本質だったので。

ここで加速度計の検知原理をもう一度じっくり眺める必要があります。加速度計が加速を検知するためにはバネが伸縮して錘が動くことが必要です。この動きは加速度計本体に対しての錘の動きがあることが必要です。ところが自由落下の場合の運動は、加速度計のすべての部分が同じように加速するので、全体が加速運動をしていても錘とケースの間で動きの差が全くないのです。

「違いが無いと判らない」という原理は正しいでしょう。屈折率が水と同じの透明なプラスチックでできたボールを水に漬けますとそのボールは消えてしまいます。黒い扉の前に立つ黒装束の泥棒は見えにくいでしょうが赤外線カメラで撮れば写ります。

月面は真空ですからアポロ15号のスコット宇宙飛行士はハンマーと鳥の羽を落とす実験をしてくれました。地上でもこの実験はスペース・チャンバーの中でやれるでしょう。しかし、地上



加速度計を作る物質に何を選んでも運動に差は出ません。ケースをアルミで作り、錘を金で作っても同じです。重力の与える加速度は材質を選ばないのです。これが、ガリレオがピサの斜塔からいろいろな物質のボールを落として落下させたら殆ど同じように落下したという伝えのあの重力の性質なのです。

本質的な問題の答えは、「重力の性質だから」ということになります。簡単すぎる答えですが、これしかありません。「重力とは加速度計では検知できない加速度運動である。」と定義して良いことになります。



の重力は月面より6倍大きいですから、落ちるのが早いので高速度カメラが必要かも知れません。YouTubeを探しますと動画でこれらの実験の様子が出てきます。

6. 重力の秘密

標題の間には結論が出ました。ここからは、本当にお話ししたかったことです。内容はアインシュタインも見落としたニュートンの間違いというものですから、頭から否定されることを恐れて隠したのです。

重力は「力」でなく加速度運動であるというのは300年以上続いたこれまでの常識からかけ離れた考え方です。ただし、ここでいう「力」とはニュートン[N]を単位とする本来の力です。「眼の力」とか「統率力」とか力は広い意味に使われますが、広い意味なら重力も力であることに変わりはありません。物体を動かすのですから。

重力は定義により地球の自転の影響を入れたり、局地的な質量の偏在を考慮したりします。しかし、9割がた万有引力ですから、大きく見れば万有引力と言っても構いません。

ニュートンが万有引力を数式でプリンキピアに明確に記したのでニュートンの万有引力と言われるようになりました。逆二乗則はガリレオも気がついていましたし、フックとの一番争いのごたごたもありますが、月もりんごも同じ万有引力の法則が支配していることを言明したのはニュートンに間違いありません。地上も天上も同じ法則に支配されている、としたことがニュートンの偉大な貢献です。

チコ・ブラーエが一生かけて天空の星の動きの正確なデータを残しました。ケプラーがチコ・ブラーエのところに弟子入りし、働き始めて1年程度でチコ・ブラーエは亡くなったのです。ケプラーの才能を見抜いたチコ・ブラーエはケプラーに観測データを生かすように譲ったのです。このデータを引き継いだケプラーはこのデータを基にケプラーの法則を打ち立てました。

ケプラーの法則は次の通りです。

第一法則：すべての惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を回っている。

第二法則：惑星は面積速度一定で太陽を回る。

第三法則：惑星の軌道周期の二乗は軌道長半径の3乗に比例する。

ニュートンはケプラーの法則から惑星と太陽が万有引力で引かれていることを示したのです。このとき、ニュートンは万有引力という「力」の式にしてみました。

おそらく、加速度があるのは力が働いているからだという思い込みがあったからでしょう。ニュートンの運動の法則で有名な第二法則は力と加速度の関係式で、 $F = ma$ です。ただし、この表現は後世の人が整理したもので、ニュートンがプリンキピアにラテン語で書いた表現は、「物体の運動の変化は力による」という少し漠然としたものです。運動の変化は力が働くからだと思っかけていることは間違いありません。

度の次元の量を定義しているだけです。

ケプラーの3法則から解析的に万有引力の式を導いたのはラプラスです。この誘導でニュートンの運動の第2法則を加えています。しかし、この第2法則は運動方程式とも呼ばれますが、力の定義式でもあるわけです。力だけでなく質量も同時に定義しています。一つの式で二つの量を定義することはできません。従って本当に定義しているのは、 F/m 、力を質量で割った量、加速

「万有引力 (Universal Gravitation) は「力」でなく、加速度運動である」というのが私の考察による結論です。ケプラーが導き出した3法則は、チコ・ブラーエの星の位置と時刻のデータですから、あくまでも時刻、位置、速度、加速度に關係するものであって、次元的に「力」が出てくる余地はありません。加速度の關係式に留めるべきなのです。ニュートンの万有引力の式は数式として間違っているではありませんが、物理の式として力の關係式になっているのが、思い込みが入っているということなのです。

$$F = mG \frac{M}{r^2}$$

重力場に拡張した ニュートンの運動方程式

重力場にある一つの物体が他の物体から受ける作用は外力で表され、外力はその物体に起こされる加速度と重力加速度との和に比例する。その比例係数を質量と呼び、時間にも外力にも無関係である。

$$F = m(a + g) \quad \text{または} \quad a = \frac{F}{m} - g$$

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

F : 外力
 m : 物体の質量
 a : 物体の加速度

g : 重力加速度
 G : 万有引力定数
 M : (地球の)質量
 r : (地球の)中心からの距離

実際、ラプラスが誘導したようにケプラーの3法則に加速度の F/m をそのまま使っても同じように逆二乗則が導けます。

物体に重力が働いていても自由落下の状態、つまり無重力状態にある物体には一切力が働いていません。物体に力が働くとその物体には応力が生じ、歪が生じます。応力があっても歪が生じない物体を剛体といいます。剛体は理論上の抽象的物体で実在しません。石でも圧縮するとミクロレベルでは変形し、破壊します。重力が働いているが慣性力と分子レベルで釣り合っているからだと言う説明は無理があることを先述しました。

7. 力が働くとき

それでは重力が力でないならば、力はどのようなときに働くのでしょうか。

重力は物体に加速度運動を引き起こします。重力の大きさによって加速度運動の大きさも違ってきますが、ガリレイの実験からも明らかのように、物体の質量には依存しません。力は、この重力が決める加速度運動から外れた運動をさせる時に働く慣性力に釣り合わせるために必要です。この慣性力は質量に比例します。そして、この質量のことを慣性質量と言うのです。

ニュートンの運動の法則で第2法則は運動方程式とも呼ばれます。これは重力の働く場の運動方程式になっていません。これまでは重力も外力の一つとして扱ってきたのです。

重力が力でないとするともはや運動の第2法則はそのままでは使えないこととなります。

重力場における運動方程式は次式のように、重力加速度をあらかじめ組み込んでおく必要があります。

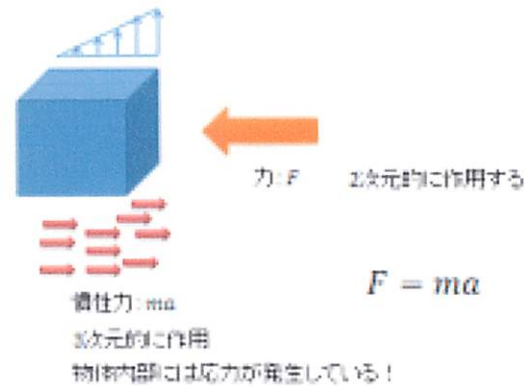
重力場に拡張した ニュートンの運動方程式



$$F = m(a + g)$$

8. 力が働かない加速度運動
 力がなくても加速度運動があるのは重力以外にないと思われ
 ます。力が働いていないのに加速度運動があるとは考えられない
 という方は、ニュートン同様に先入観に捉われているからです。
 応力と歪の関係を考えてみてください。物体に働く応力とその

反作用は慣性力



物体の歪にはフックの法則があります。 $\sigma \parallel \epsilon$ です。 ϵ はヤング率と呼ばれる係数です。

物質の応力状態を正確に記述するには6つの成分で2階のテンソル量になりますが、ここでは簡単にするため、1軸の引き張り・圧縮応力だけを考えます。

フックの法則から応力があれば歪もある、逆に歪があれば応力もあると言えそうです。実際、有限要素法では応力を未知変数とするか歪（変位）を未知変数とするかの二通りの方法があつて、これらは双対関係にあります。コンピュータへの入力データの作りやすさから現在ではもっぱら変位法（または剛性法という）が用いられています。

横道にそれましたが、応力・歪の関係にはフックの法則以外に、応力が無くても歪がある場合があります。

それは熱歪です。物体を熱しますと殆どの物質は膨張します（逆の物質もあります）。つまりプラスの熱歪がでます。もし、この膨張を強制的に抑えると熱応力が発生します。昔の鉄道のレールはこの膨張を考慮して25 mぐらいの長さのレールとレールの間に冬は5 m mぐらいの隙間を作っていました。最近ではガタゴトンを避けるためレールを溶接でつなぎますから、夏場は熱応力で圧縮応力が掛かっている筈です。あるいは冬場に引き張り応力かもしれません。

力が働かなくても加速度がある状態との対応関係は、熱と重力、

応力と力、熱歪と加速度です。この類推から、重力が加速度は引き起こすのに力は発生しないこともあり得ることが納得できるのではないのでしょうか。

9. 重力を検知する方法

重力を検知する方法は、もちろん外からの観察による方法がありません。歴史的にもチコ・ブラーエの星の運動を観察した結果が元になって万有引力の法則が確立しました。

加速度計のような機器で重力加速度を検知することは全く不可能かという設問にしますと、これまで説明してきたことでは当然出来ないということなのです。

しかし、将来的には可能性が全くないわけではありません。それは重力加速度の式をご覧になると判るのですが、距離の二乗が分母にきています。つまり、鉄アレイのような物体を縦に自由落下させますと、上部の塊より下部の塊の方が重力加速度は大きいのです。鉄アレイは一体になっていますから、同時に落ちざるを得ません。すると、上部の塊は上方に残されようとし、下部の塊は早く落ちようとしています。つまり中央部には引き張り応力が生ずるのです。実際に応力が発生すれば歪ゲージでも貼って検出することができます。しかし、現在の宇宙ステーションぐらいの規模ではこの応力は小さすぎてとても検出できないのです。

重力が逆二乗で決まるために起きるこの効果は潮汐効果とも

呼ばれています。スケールが大きくなればこの応力も極めて大きくなります。マックススウェルが土星の輪が板状でないことを立証したのはこの効果を計算して、石や氷では持ちこたえられないことを示したものです。軌道エレベータ（または宇宙エレベータ）が本にもなっていますが、夢物語であることに変わりありません。これには多くの実現を拒む要素がありますが、まず地球上にあるどんな材料でも強度が持たないからです。

おわりに

加速度計が重力を検知できない理由は、それが重力の性質だからという簡単な説明に戻ってしまいました。しかし、付随してニュートンの万有引力は、万有加速度運動であるというのが正しいことを指摘しました。ニュートンの運動方程式は重力場における運動方程式に変更する必要があります。これらの違いは些細なようですが、重力質量の概念が必要になることが大きな違いです。力は重力が決める加速度運動に逆らったときのみ発生する慣性力に釣り合うものであるということが重要な概念変更です。ご清聴ありがとうございました。

(平成 22 年 10 月 16 日)