

「動いている物体は、重くなる」の間違いを暴く！ ——「相対論的質量」の、ナニが矛盾なのかを、解き明かすよ♪

■「速度が速くなると、質量が増加する」とか、「物体の速さが光速に達すると、質量が無限大になって、加速するのに無限のエネルギーが必要になるので、どんな物体も光速を超えられない」とかいったハナシを、聞いたコトは、ありませんか。実は、コレらは、ありがちな誤解——もちろん、どんな速さで動いたとしても、質量が増えるなんてコトは、ありません。

□「動いている時計は、遅くなる」と、「特殊相対論では、加速度運動/非慣性系を扱えない」、そして、ココで取り上げる「動いている物体は、重くなる」——この3つを、藤野は、「**特殊相対論の3大誤解**」と、(勝手に)呼んでいます。相対論の解説とかで、コレらの文章を見かけたら、要注意ですよ。

■とは言い、なぜ、「動いている物体は、重くなる」という、明らかな間違いが、広まってしまったのか——このコトを、いろいろな視点から、じっくりと眺めて、考えていくと、特殊相対論の驚くべき奥深さが、たっぷりと味わえるのです♪ 皆さんも、特殊相対論の深遠なる深淵を、ちょっとだけ、覗いてみませんか。

【目次】

1. 「1+1」が2にならない世界？
——その光は、永遠に、この手の届かぬ未来に。
2. 積み重ねた努力も成長も、他人には分からない。
——優等生ほど、ソンをする？
3. 誰が見ても、ありさは、いつもカワイイ♪
——なぜ、女の子に、体重を訊くの？
4. 「時間」と「距離」だけが、ぼくらを、惑わす。
——そして、一般相対論へ。



■ 1. 「1+1」が2にならない世界？ —— その光は、永遠に、この手の届かぬ未来に。

■皆さんは、「**どんなモノも、光の速さ(光速)を、超えるコトはできない**」というハナシを、聞いたコトが、あるでしょうか。常識的に考えると、たとえば、秒速8kmの速さで飛びロケットから、秒速3kmの速さで小型宇宙機を发射したら、地球上から見た宇宙機の速さは、秒速8km + 秒速3kmで、秒速11kmとなるハズです。同じように、(実現性は無視して、理屈の上では)光の速さの0.8倍の速さで飛びロケットから、光の速さの0.3倍の速さで小型宇宙機を发射したら、地球上から見た宇宙機の速さは、光の速さの1.1倍——つまり、光の速さ(光速)を超えるハズです。それなのに、「**どんなモノも、光の速さ(光速)を、超えるコトはできない**」というのは、いったい、どういうコトなのでしょう。

■すでに、『**「動いている時計は、遅くなる」の間違いを暴く!**』や、『**「ウラシマ効果」の時間遅れを、計算してみよう!**』を、読んでいたら、驚かないと思いますけど、相対論の世界は、日常の常識が通用するような、単純なモノではありません。たとえば、下の図のようなコトが起こるのが、相対論の世界なのです。

■相対論の世界では、「1+1」が、「2」にならないのです！ ——「速度の合成則」(その1)



□ちなみに、この図では、キレイに割り切れるように、数値を選んでみたけど、最初の喩え話の数字では、「リトこから見たありさの速さが、光の速さの0.8倍」、「ありさから見たナーの速さが、光の速さの0.3倍」のときに、「リトこから見たナーの速さは、光の速さの約0.887倍」となります。この場合も、単純な足し算は成り立っていません。さらに、この場合には、リトこから見たナーの進む速さが、光の速さを超えない——というコトも、分かりますね。

■いったい、なぜ、こんなコトに、なるのでしょうか。すでに、『**「動いている時計は、遅くなる」の間違いを暴く!**』や、『**「ウラシマ効果」の時間遅れを、計算してみよう!**』を、読んでいるならば、すぐに、ピンとくるハズです。それらの解説記事では、「お互いに静止していない、2つの時計」や、「お互いに静止していない、2点間の距離」について、日常の常識が通用しなくなるコトを、詳しく説明しました。今回の場合は、お互いに静止していない、ありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方(測定結果)も、違う——というコトが、ポイントです。そうすると、当然、「時間」と「距離」の両方に深く関係している、「速さ」についても、お互いに静止していない、ありさとリトこでは、見え方が違ってくるハズです。だから、ナーの速さについて、「ありさから見たナーの速さ = ありさから見たナーの進んだ距離 ÷ ありさの時間」と、「リトこから見たナーの速さ = リトこから見たナーの進んだ距離 ÷ リトこの時間」で、単純な足し算が成り立たない——というコトも、当たり前のコトと、言えるでしょう。もちろん、**このハナシに、ありさたちの体重(質量)が、まったく関係ないコトは、明らかです。**

□ちなみに、「リトこから見たありさの速さ」が v で、「ありさから見たナーの速さ」が w のとき、「リトこから見たナーの速さ」を u で表すと、すべての速さの向きが、同じ場合には、

$$u = \frac{v + w}{1 + (v \cdot w / c^2)}$$

という関係が、成り立ちます(ココに出てくる c は、光の速さ(光速)です)。最初の喩え話に戻ると、秒速8kmの速さで飛びロケットから、秒速3kmの速さで小型宇宙機を发射したとき、地球上から見た宇宙機の速さは、正確には、秒速10.99999999706... kmとなるのです。でも、コレでは、秒速11kmと、ほとんど区別が付きませんよね。つまり、日常の感覚では、秒速8km + 秒速3km = 秒速11kmのように、「速さ」については、単純な足し算が成り立っていると、感じしてしまうのです。でも、「速さ」が光速に近づいてくると、単純な足し算からのズレが、どんどんと、大きくなってしまいます。

□ココで、ちょっとオモシロい状況を、空想してみましょう。いま、ありさに、懐中電灯を持たせます。ありさから見たとき、自分が持っている懐中電灯から出る光は、当然、光の速さ(光速) c で進みます。コレは、最初の図で、「ナー」を、「ありさ」が持つ懐中電灯から出る光に替えたのと、同じ状況だと、考えることができます。すると、上の公式のなかの「ありさから見たナーの速さ w 」は、「ありさから見た光の速さ(光速) c 」に置き換えられるコトになります。実際に、置き換えてみると、この場合には、「リトこから見たありさの速さ v 」が、どんな値になったとしても、「リトこから見た、ありさ」が持つ懐中電灯から出る光の速さ u は、 $u = c$ となるコトが、分かります。リトこから見ても、ありさがどんな速さで動き回っていても、ありさが持つ懐中電灯から出る光の速さは、ありさから見ても、リトこから見ても、必ず、同じ値 c になる——というのは、ちょっと、ナニが起きているのか、理解に苦しみます。図を描いて、イメージしようにも、どんな図を描いて良いのか、途方に暮れてしまいませんか。どこかで、計算を、間違えたのでしょうか。それとも、特殊相対論自体が、間違っているのでしょうか。

□ところで、唐突にハナシは変わりますが、皆さんは、そもそも、なぜ、アインシュタインが、相対論の研究を始めたのか——そのキッカケを、ご存知でしょうか。もちろん、いろんなキッカケが、ありました。キッカケのひとつに、「**光の速さを、精密に計測してみたら、どんな向きで、どんな運動をしている観測者が測っても、必ず、同じ値になる**」という実験結果がありました。常識では、まったく理解不能な測定結果ですけど、現在に至るまで、多くの科学者が、多くの方法で、実験・観測してきたにもかかわらず、結論は変わりませんでした。**どんなに美しく、どんなに完璧と思える理論でも、現実の実験・観測結果と合わないコトがあれば、理論のほうを修正するのが、物理学の掟です。**そういうワケで、理論上は完璧で矛盾のない(もちろん、直感的にも、日常の常識どおりの結果が導かれる)理論体系であるガリレイ=ニュートン力学を、「光の速さは、観測者の運動状態によらず、常に一定である」という、非常識な現実の実験・観測結果に合わせて、修正したのが、アインシュタインの特殊相対論だったのです。

□そういう意味では、「リトこから見て、ありさがどんな速さで動いていても、ありさ」が持つ懐中電灯から出る光の速さは、ありさから見ても、リトこから見ても、必ず、同じ値 c になる」という、非常識な計算結果は、「光の速さは、観測者の運動状態によらず、常に一定である」という、非常識だけど、決して否定できない、現実の実験・観測結果を表している——というコトになります。**計算結果ではなく、日常の常識に基づいた直感的な世界観のほうを、間違っていたワケです。**

□ハナシが、だいぶ、脱線してしまいましたね。脱線ついでに、もう少しだけ、蛇足を続けましょう。上の公式は、「すべての速さの向きが同じ」という条件付きの式でした。もちろん、リトことありさとナー(または、ありさ」が持つ懐中電灯から出る光)の進む速さの向きが、ぜんぶバラバラの場合も、別の公式を使えば、計算できます(だいぶ複雑な公式になりますけど)。この場合も、ありさ」が持つ懐中電灯から出る光の速さは、ありさから見ても、リトこから見ても、必ず、同じ値 c になります。けれど、**ありさから見た光の進む向きと、リトこから見た光の進む向きは、同じにはなりません。「光行差」と呼ばれる現象です。**興味があれば、ぜひ、調べてみて下さいね。

□最後に、「リトこから見たありさの速さ v 」が、光の速さ(光速) c に達したら、どうなるのか?——というコトが、気になった人が、いるかも知れません。「光の速さで進むありさからは、光がどのように見えるのか?」とか、「光の速さで進むありさ」が持つ懐中電灯から出る光は、リトこには、どのように見えるのか?」とかいった疑問に、誰もか、一度は、悩まされるハズです。そこで、『**「ウラシマ効果」の時間遅れを、計算してみよう!**』に出てくる公式を見てみると、「リトこから見たありさの速さ v 」に、光速 c を代入したら、さまざま値が 0 や ∞ になってしまう場合が、とても多いコトに、気がつきます。コレらの計算結果を、どう解釈すれば良いのでしょうか?——日常の常識に縛られている私たちにとって、正しいイメージをつかむのは、とても難しいコトのように思えます(少なくとも、藤野には、ムリです)。そんなワケで、この問題には、これ以上、深入りせずに、本題に戻りたいと思います。



■ハナシを戻すと、ココまで、イチバン大切なポイントは、ありさとリトこが、お互いに静止していない場合は、「リトこから見たありさの速さ」、「ありさから見たナーの速さ」、「リトこから見たナーの速さ」のあいだには、単純な足し算が成り立たない——というコトでした。単純な足し算が成り立たないのは、お互いに静止していないありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方も、違うからです。もちろん、このハナシに、ありさたちの体重（質量）は、まったく、関係がありません。

■このハナシを応用すれば、ありさの速さが変化したときに、お互いに静止していないリトことありさで、その変化量の見え方が違う——というコトも、分かると思います。前の図の「ナー」を、「加速後のありさ」に置き換えてみれば、分かりやすいでしょう。次の図を、前の図と、見比べて下さい。

■相対論の世界では、「1+1」が、「2」にならないのです！——「速度の合成則」（その2）

わたしは、静止してるけど、ありさは、右向きに光の速さの0.3倍の速さで進んでますね。

ありさは、静止してるよ。リトこさんのほうが、左向きに光の速さの0.3倍の速さで動いてるんだよ。

さっきまで、静止してたけど、さっきの状態から、右向きに光の速さの0.4倍の速さだけ加速したよ！だから、速さの変化量は、光の速さの0.4倍だよな！

さっきまでのありさは、右向きに光の速さの0.3倍の速さで進んでたけど、いまは、右向きに光の速さの0.625倍の速さになったみたい。速さの変化量は、光の速さの0.325倍ってコトですね！

■「リトこから見た、ありさの速さの変化量」の値と、「ありさから見た、ありさ自身の速さの変化量」の値が、同じにならないコトが、分かります。さらに、最初の「リトこから見た、ありさの速さ」が、速ければ速いほど、2人の観測する「ありさの速さの変化量」のズレは、大きくなっていくのです。

■お互いから見た相手の速さが、速くなればなるほど、速さの変化量の見え方が、ズレていく…。

わたしは、静止してるけど、ありさは、右向きに光の速さの0.5倍の速さで進んでますね。

ありさは、静止してるよ。リトこさんのほうが、左向きに光の速さの0.5倍の速さで動いてるんだよ。

さっきまで、静止してたけど、さっきの状態から、右向きに光の速さの0.4倍の速さだけ加速したよ！だから、速さの変化量は、光の速さの0.4倍だよな！

さっきまでのありさは、右向きに光の速さの0.5倍の速さで進んでたけど、いまは、右向きに光の速さの0.75倍の速さになったみたい。速さの変化量は、光の速さの0.25倍ってコトですね！

■上の図のように、「ありさから見たありさ自身の速さの変化量」は同じだとしても、もともとの「リトこから見たありさの速さ」が、速ければ速いほど、「リトこから見たありさの速さの変化量」は、小さくなるコトが分かります。そして、もともとの「リトこから見たありさの速さ」が、光の速さ（光速）に近づけば近づくほど、「リトこから見たありさの速さの変化量」は、どんどん、ゼロに近づいていきます。だから、いつまで経っても、「リトこから見たありさの速さ」は、光の速さを超えられない——というワケです。



■2. 積み重ねた努力も成長も、他人には分からない。—— 優等生ほど、ソンをする？

■ところで、「速さの変化量」というのは、専門用語っぽく、「加速度」と、言い換えるコトができそうです。もちろん、「加速度」は、「どのくらいの時間をかけて」速さが変化したのか？——というコトが、とても重要です。だから、ただの「速さの変化量」よりも、ハナシは、少し複雑になります。でも、これまで説明してきたコトは、「速さの変化量」を、「加速度」と言い換えても、ほぼ同じように、成り立つのです。

■本人にとっては、同じ加速度でも、お互いに静止していない他人にとっては、違うのです。

ありさは、ずう〜っと、おんなじ加速度で、進んでるよ！リトこさんから見たら、いまごろ、光の速さを、超えちゃってるかも！？

ありさは、「自分の加速度は、ずっと一定だよ」って、言ってるの？わたしから見ると、ありさの加速度は、だんだん、小さくなってるとだけだなぁ…。

ありさの進む速さが、遅いときは、ありさの加速度は、ありさの言うとおりでけど、ありさの進む速さが、速くなればなるほど、ありさの加速度は、小さくなっていく…って、感じですね。

■このように、ありさ自身が、同じ大きさの加速度を感じていたとしても、リトこから見たありさの速さが速ければ速いほど、リトこから見たありさの加速度は小さくなるのです。くどいようですが、このようなコトが起きるのは、お互いに静止していないありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方も、違うからです。くどいようですが、ありさたちの体重（質量）は、まったく、関係がありません。

□ちなみに、ココで、ナンの断りもなく、「ありさ自身が、同じ大きさの加速度を感じていたとしても」と書きましかたけど、この「加速度」というコトには、少し、注意が必要なのです。『ウラシマ効果』の時間遅れを、計算してみよう！』では、「リトこ & ナーから見たありさの加速度」、「ありさが、自分の感じる慣性力の大きさから判断した、自分の加速度」、そして、「ありさが、自分の周囲の背景が流れていく速さの変化から判断した、自分の加速度」が、それぞれ、ぜんが、異なる値になる——と、説明されていたコトを、覚えておいてください。そのときと同じように、今回のハナシでも、「ありさ自身が感じているありさの加速度」は、周囲との比較で相対的に判断されるようなモノではなく、言葉通りに、「ありさ自身が感じている」、主観的・絶対的な「加速度」であるべきですよ（そもそも、周りにナニもない宇宙空間にいたら、ありさは、自分自身の加速度を知りようがない——というのでは、おハナシになりません）。そんなワケで、ココでも、「ありさ自身が感じているありさの加速度」とは、「ありさが、自分の感じる慣性力の大きさから判断した、自分の加速度」のコトとします。

□実は、「自分自身が感じている加速度」については、ちょっとした、「盲点」があります。計算上では、「速さ」=「加速度」×「時間」の公式で、「速さ」を、知るコトができるハズです。通常の場合ならば、もちろん、それで、ナンの問題もありません。ならば、ありさは、「自分が、どれだけ時間を、どんな加速度で進んだのか」を振り返って、公式に代入するコトで、「今の自分自身の速さ」を計算できるハズ——と、思うかも知れません。でも、現実には、「本当に、ありさは、計算で求めた、この『速さ』で、進んでいるのか？」を、確認する手段は、ありません。この「速さ」は、誰からも認識されるコトはなく、どこにも影響を与えないからです（それどころか、興味深いコトに、この「速さ」は、光の速ささえも、超えるコトができます）。なぜ、こんなコトに、なるのでしょうか。『動いている時計は、遅くなる』の間違いを暴く！』で説明したように、ありさが慣性力を感じていないならば、空間のあらゆる場所に、ありさ自身の持つ時計と正確に合っている時計を、置くコトができます。コレらの時計を使えば、ありさに対して静止している人なら誰でも、「ありさ自身が感じているありさの速さや加速度」を、測るコトができるでしょう（もちろん、どちらも、ゼロになります）。でも、『動いている時計は、遅くなる』の間違いを暴く！』の第6節「別れた人に会うのって、キツイ…」で説明したように、ありさが慣性力を感じている場合には、ありさ自身の持つ時計と正確に合っている時計は、どこにも存在しなくなります。つまり、慣性力を感じているありさの「時間」は、「ありさだけの時間」となってしまう、他の誰も、同じ「時間」を共有できないのです。当然、そんな「ありさだけの時間」を使って計算した「速さ」も、誰とも共有するコトのできない、「ありさだけの速さ」となってしまう——というワケです。

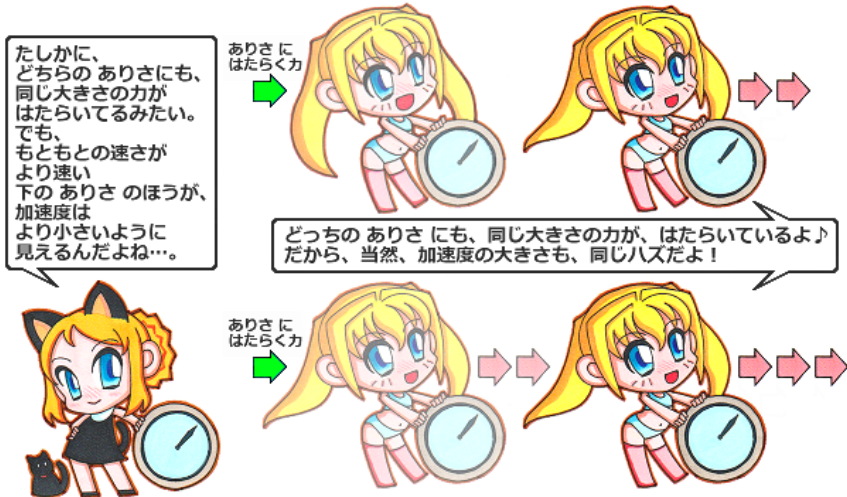
□でも、だからといって、「ありさ自身が感じているありさの加速度」が、まったく、意味のないモノである——というコトではありません。ナニよりも、実際に、ありさ自身が、直接、カラダで感じている加速度である——というコトは、誰にも否定できない事実です。その意味では、「ありさの持つ時計」と「リトこ系の時計」（「リトこの持つ時計」ではなく）を比べた、「ウラシマ効果」のハナシなどより、遙かに、現実的に重要な意味がある——と、言うに違いありません。そもそも、特殊相対論の出発点は、「ありさの持つ時計の時刻」のような、ありさ自身が自分のコトとして疑う余地なく直接的に知るコトのできる値と、「リトこの持つ時計の時刻」のような、リトこ自身が自分のコトとして疑う余地なく直接的に知るコトのできる値のあいだの、(コレまで、当然のコトとして、誰も疑わなかった) 関係を、トコトコまで疑い、問い直すコトにありました(『動いている時計は、遅くなる』の間違いを暴く!』を参照)。ですから、ナニが「疑う余地なく、直接的に知るコトができる値」で、ナニが「間接的にしか求めるコトができないハズなのに、ナンとなく分かった気になっていた曖昧な値」なのか——という区別が、ナニよりも重要になるのです。その点で、先ほどの、「速さ」=「加速度」×「時間」の公式を使って、計算で求めた「速さ」は、現実の根拠があやふやで、あくまで、計算上の仮想的な値に過ぎません。けれども、「ありさ自身が感じているありさの加速度」というのは、実際に、ありさ自身が、直接、カラダで感じている、誰にも否定できない、疑う余地のない値であり、堅固な理論を築く礎として、とても大切なモノなのです。

□ココで、これまで曖昧にしてきた、「ありさから見たありさ自身の速さ」の厳密な意味についても、明確にしておきましょう。「リトこから見たありさの速さ」は、リトことありさのあいだの距離が、どのように変化していくかを調べるコトで、分かります。同じように考えると、ありさとありさ自身のあいだの距離は、(ありさが幽体離脱しないかぎり?) 常にゼロで、絶対に変化しないので、「ありさから見たありさ自身の速さ」は、常に、必ず、ゼロとなります。つまり、ありさから見て、ありさ自身は、常に、必ず、静止している——というコトになるのです。「でも、ありさだって、全力疾走しているときには、自分自身が静止してるとは、思わないハズだ」と、反論したくなるかも知れません。けれども、特殊相対論的には、そういう場合でも、「ありさから見たら、ありさ自身は静止していて、地面のほうか動いている」と、考えます。特殊相対論の文脈で、「○○から見た××の速さ」と言ったときには、必ず、「○○と××のあいだの距離の変化を、○○の時間と距離(空間や座標)で測って、得られる速さ」であるコトを、忘れてはいけません。もちろん、リトことリトこ自身のあいだの距離も、常にゼロのまま、絶対に変化しません。したがって、リトこから見て、リトこ自身は、常に、必ず、静止しています。

■さて、ココで、『動いている時計は、遅くなる』の間違いを暴く!』および『ウラシマ効果』の時間遅れを、計算してみよう!』のなかで、「加速度運動をしている物体には、慣性力がはたらきます」や、「加速度が大きいと、大きな慣性力がはたらき、加速度が小さいと、はたらく慣性力も小さくなります」と、強調していたコトを、思い出して下さい。逆に言うと、力がはたらけば、速さが変化する=加速度運動をする——というコトです。大きな力がはたらけば、速さの変化量=加速度は大きくなり、はたらく力が小さければ、速さの変化量=加速度は小さくなります。もちろん、力がはたらいていない物体は、速さが変化しない(加速度がゼロ)というコトになります。

■そうであれば、「ありさ自身が感じる加速度」を、「ありさ自身に、はたらく力/はたらいている力」と、言い換えても、これまで説明してきたコトは、ほぼ同じように、成り立ちそうです。調べてみると、確かに、「リトこから見たありさにはたらいている力」が、まったく同じ大きさでも、「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの加速度」は小さくなるというコトが、分かります。もちろん、「ありさから見たありさ自身の速さ」は、どんな場合も、必ず同じ(ゼロ)ですので、「ありさから見たありさ自身にはたらいている力」が、まったく同じ大きさならば、「ありさから見たありさ自身の加速度=ありさ自身が感じる加速度」は、いつも、必ず、同じ大きさになります。

■同じ大きさの力がはたらいていても、速く動いていると、加速度は小さくなってしまいます。



■そんなワケで、これまで見てきたように、物体(たとえば、ありさ)に力がはたらいたときに、その物体が、どのように運動するか(どのくらいの加速度が生じるのか)は、はたらいた力の大きさだけでなく、その物体が、そのときに、どのような運動をしていたのかにも、影響を受けます。その物体が、そのときに、どのように運動していたのかは、観測者(たとえば、リトこやありさ)の運動状態によって、見え方が変わってきます。ある観測者(たとえば、ありさ)は、「物体は静止していた」と言うかも知れません。別の観測者(たとえば、リトこ)は、「物体は高速で運動していた」と言うかも知れません。そのため、物体にはたらいた力の大きさが同じだったとしても、その物体に生じる加速度の大きさは、観測者によって、異なって見えるワケです。こんなコトになるのは、お互いに静止していない観測者は、時間の進み方も、距離の感じ方も、違うからです。

□ちょっと細かいハナシになりますが、実は、ありさとリトこが、お互いに静止していない場合は、ありさとリトこの、時間の進み方と、距離の感じ方のズレに応じて、「ありさから見たありさ自身にはたらく力」と、「リトこから見た、ありさにはたらく力」の、向きや大きさにも、ズレが生じるコトになります(ただし、ありさの運動の向きと、力の向きが同じ場合には、どの観測者が見ても、力の向きと大きさは、同じになります)。それでも、上で説明した結論に、変わりはありません。

■さて、ココに至るまでに、余談のほうが、分量的に多くなってしまっているので、ココで、改めて、頭を整理するために、本題の間接の部分だけを抜き出して、これまでのハナシの流れを、まとめておきましょう。

【1】まず、日常の常識的な感覚では、「リトこから見たありさの速さ」と「ありさから見たナーの速さ」を、単純に足し合わせれば、「リトこから見た ナーの速さ」を、計算できるハズです。でも、特殊相対論の世界では、このような単純な足し算は、成り立たない——というコトを、説明しました。なぜならば、お互いに静止していない、ありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方も、違うからです。

【2】このハナシの自然な発展として、お互いに静止していない、ありさとリトこがいて、ありさの速さが変化するときには、「リトこから見たありさの速さの変化量」と、「ありさから見たありさ自身の速さの変化量」は、一致しない——というコトを、説明しました。さらには、「ありさから見たありさ自身の速さの変化量」が同じだったとしても、ももとの「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの速さの変化量」は小さくなる——というコトも、説明しました。

□実は、ココで、ハナシを分かりやすくするために、ちょっとだけ、ゴマカシをしています。ホントなら、「ありさから見たありさ自身の速さの変化量」は、「速さが変化する前のありさから見たありさ自身の速さの変化量」と、書くべきです。だって、「ありさから見たありさ自身の速さ」は、常に、必ず、ゼロですから、「ありさから見たありさ自身の速さの変化量」も、必然的に、常に、ゼロになるハズ。でも、メンドくさいし、ナンとなく伝わるかな……と思って、ゴマカシしていました。許して下さいね♪

□ついでに告白しておく、前に出てきた、「速さ」=「加速度」×「時間」という式も、ホントならば、「速さの変化量」=「加速度」×「時間」、もしくは、「速さ」=「加速度」×「時間」+「初速度」が、正しいです。まあ、本題には関係ないし、言いたいコトは、伝わるだろうから、イイよね……。

【3】さらに、「速さの変化量」を、「加速度」に置き換えても、同じハナシが、成り立つ——というコトを、説明しました。つまり、「ありさ自身が感じるありさの加速度」が同じでも、ももとの「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの加速度」は小さくなる——というコトを、説明しました。

【4】最後に、別のトコで説明していた「加速度」と「力」の関係を、ココでのハナシに当てはめるコトで、「リトこから見たありさにはたらいている力の大きさ」が同じでも、「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの加速度」は小さくなる——というコトが、分かるのでした。

□はたらく力が同じでも、ももとの速さが速いと、加速度は小さく、ももとの速が遅いと、加速度は大きい——というのは、優等生がちょっと良いコトをしても、もともと高い評価は、それ以上、なかなか、良くならないけど、不良がちょっと良いコトをしたときは、ものすごく印象が良くなる——みたいなハナシと重なって、なんだか、少し、モヤりますね……。

■——というワケで、「お互いに静止していない、ありさとリトこでは、『時間』の進み方も、『距離』の感じ方も、違う」というハナシから出発して、「『リトこから見たありさにはたらいている力の大きさ』が同じでも、そのときの『リトこから見たありさの速さ』が速ければ速いほど、『リトこから見たありさの加速度』は小さくなる」という結論に、たどり着いたのでした。もちろん、ココまでのハナシに、ありさたちの体重(質量)が影響する要素は、どこにも、まったく、ありません。でも、実は、この結論が、「動いている物体は、重くなる」という誤解が生まれた、そもそものキッカケになってしまったのです。



■3. 誰が見ても、ありさは、いつもカワイイ♪ ——なぜ、女の子に、体重を訊くの？

■皆さんは、「ニュートンの運動方程式」をご存知でしょうか。「ニュートンの運動の第2法則」と言ったほうが、分かりやすいかな。最近では、学校で教わらずに、大人になってしまいう人が、とっても多いようです。1687年に、アイザック・ニュートンが、著書『プリンキピア(自然哲学の数学的諸原理)』のなかで公表して以来、物理学の歴史に燦然と輝く金字塔として、物理学の根幹を支える最も重要な基本原理となってきたモノであるだけに、とても残念に思います。

■それはともかくとして、「ニュートンの運動方程式（運動の第2法則）」は、物体の運動の状態と、物体にはたらく力の関係を、人類史上、初めて、数学的に明らかにした方程式（法則）です。物体に力がはたらくと、どうなるのでしょうか。たとえば、物体にはたらく力の大きさが2倍になったら、物体の運動の状態は？——速さが2倍になる？ それとも、2乗して4倍になる？ いやいや、どちらも違う？ ニュートンは、物体にはたらく力の大きさが2倍になると、物体に生じる**加速度が2倍になる**——と、初めて、明らかにしました。すなわち、**物体に生じる加速度は、物体にはたらく力の大きさに、比例している**——というワケです。

■それだけではありません。さらに、ニュートンは、力の大きさが同じなら、物体の質量が大きいほど、物体に生じる**加速度が小さい**——というコトも、見出したのです。すなわち、**物体に生じる加速度は、物体の質量に、反比例している**——というコトです。そして、ナニより重要なのは、**物体のあらゆる性質のうち、物体の運動の状態と、物体にはたらく力の関係に、関わっているのは、質量だけである**——と、明らかにしたコトです。物体の形、材質、色、硬さ、温度、存在する場所、過去の状態、人々の想い、……などの要素は、関係ないのです。

■ココまで分かれば、「力」「加速度」「質量」の3つの関係を考えるだけで、物体の運動の状態と、物体にはたらく力の関係は、完全に、説明できる——というコトになります。

■**物体の運動の仕方を理解するには、「力」「質量」「加速度」の関係さえ分かれば、十分です。**

ナーとありさにはたらく力の大きさが同じなら、質量の小さい（軽い）ナーのほうが大きい加速度になるよね♪

質量が同じなら、はたらく力の大きいほうが加速度は大きくなります。

加速度さえ分かっちゃえば、何秒後にどんな速さでどんな位置にいるかもカンペキに分かっちゃうよ♪



■せっかくなので、この関係を、数式で表しておきましょう。数式にすると、「**質量** × **加速度** = **力**」となります。この数式が、ちゃんと、「物体に生じる加速度は、物体にはたらく力の大きさに、比例している」と「物体に生じる加速度は、物体の質量に、反比例している」という関係を、満たしているコトを、確かめて下さいね。ちなみに、ちゃんとした数式っぽく、「質量 (mass)」を m 、「加速度 (acceleration)」を a 、「力 (force)」を F で、表すコトにすると、 $ma = F$ となります。コレが、ニュートンの運動方程式です。

□細かいコトですけど、質量と違って、加速度と力は、大きさだけでなく、その向きも、とても大切です。そこで、向きの要素も、含まれているコトを示すために、 a と F は、太文字（ボールド）で書きました。大きさと向き、両方の要素を含んだ量を、専門用語では、「**ベクトル**」と、言います。

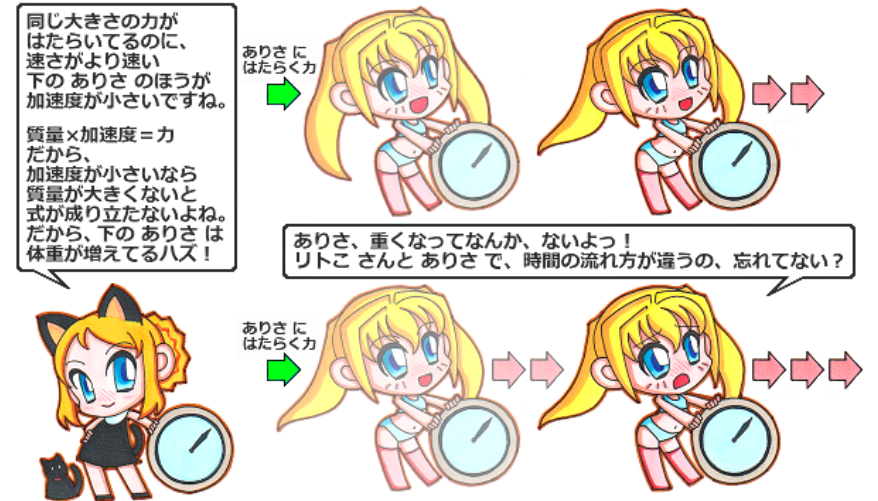
□ちなみに、ニュートンは、「ニュートンの運動の第2法則」を、世界で、初めて、発見しましたけど、その法則を、数式のカタチで、書いたワケでは、ないみたいですね（初めて、数式のカタチで表したのは、レオンハルト・オイラーだそうです）。でも、数式も、「ニュートンの運動方程式」と、呼ばれています。ココからも、運動の法則を解明した、ニュートンの業績が、いかに偉大かが、分かると思います。

■ニュートンの運動方程式は、身近な振り子の運動から、遙か宇宙の月の軌道まで、あまりにも、あらゆる現象をカンペキに解明して、あまりにも、成功したために、全宇宙を支配する究極の方程式なのではないか——と、思ってしまった、まったく、不思議ではありません。実際に、ピエール＝シモン・ラプラスは、「全宇宙の、全物体に対して、運動方程式を当てはめれば、全宇宙の未来を、すべて、完全に、予言するコトができる」と、考えました。有名な「**ラプラスの悪魔**」と呼ばれる考え方です。そんなコトを、考えてしまいたくなるくらい、ニュートンの運動方程式は、物理学の研究において、絶大な威力を発揮したのです。

■さて、ココで、特殊相対論のハナシを、思い出してみましょう。特殊相対論の世界においては、お互いに静止していない、ありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方も、違うのです。そのため、「**リトこから見たありさにはたらく力の大きさが同じでも、そのときの「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの加速度」は小さくなる**——という、摩訶不思議なコトが、起こるのでした（ニュートン力学の世界では、もちろん、「時間」の進み方や、「距離」の感じ方は、誰にとっても、まったく、同じです。だから、当然、こんな摩訶不思議なコトは、起こりようがありません）。

■このコトを、ニュートンの運動方程式に当てはめて考えると、どうなるのでしょうか。ニュートンの運動方程式は、「**質量** × **加速度** = **力**」でした。よって、**はたらくている力の大きさが同じなのに、加速度の大きさが変わるといふコトは、質量が変化しただけで考えるしかありません**。さらに言うならば、この場合は、「リトこから見たありさの速さ」が速ければ速いほど、「リトこから見たありさの加速度」は小さくなる——というコトです。だから、「**質量** × **加速度** = **力**」より、「**リトこから見たありさの速さ**」が速ければ速いほど、「**リトこから見たありさの体重（質量）**」が大きくなる——と、解釈するほかはありません。

■**ニュートンの運動方程式で、特殊相対論の世界を解釈すると、ヘンデコなコトに、なっちゃう？**



■もしも、このハナシが正しいのなら、リトことありさに限らず、どんな観測者と物体のあいだでも、この関係が成り立つハズです。つまり、リトこを「観測者」、ありさを「物体」に置き換えて、「観測者から見た物体の速さが、速ければ速いほど、観測者から見た物体の質量が、大きくなる」としても、成り立つハズです。このコトを、もっと簡単に表現すると、「**速く動く物体は、質量が大きくなる**」となり、さらに簡潔に表しても良いのなら、「**動いている物体は、重くなる**」と、なるワケです。こうして、「**動いている物体は、重くなる**」という**誤解**が、生まれたのです。

■でも、ちょっと、待って下さい。少し前に、「ニュートン力学の世界では、もちろん、『時間』の進み方や、『距離』の感じ方は、誰にとっても、まったく、同じです」と、説明されていたのを、覚えているでしょうか。ニュートンの運動方程式は、どんな観測者と物体も、時間の進み方や、距離の感じ方が、無条件に、まったく、同じである——というコトが、大前提になっているのです。でも、特殊相対論の世界は、そうではありません。お互いに静止していない、観測者と物体では、時間の進み方も、距離の感じ方も、違っています。**観測者と物体で、時間の進み方も、距離の感じ方も違う、特殊相対論の世界での現象を、観測者と物体で、時間の進み方も、距離の感じ方も同じであるという仮定を前提とする、ニュートンの運動方程式に当てはめて、理解しようとしたコトが、「動いている物体は、重くなる」という誤解が生まれた、原因だったのです。**

■実は、特殊相対論の世界において、ニュートンの運動方程式は、観測者と物体が、お互いに静止している場合**にだけ**、成り立つ方程式だったのです（なお、観測者にとって、観測者自身は、常に、静止していたのです。したがって、観測者が、観測者自身の運動の様子を考えると——たとえば、ありさが、ありさ自身の運動を考えたとき——には、ニュートンの運動方程式が、適用できます）。でも、観測者と物体が、お互いに静止していない場合は、もはや、ニュートンの運動方程式は、正しくないのです。

■ただし、観測者から見た物体の速さが、光の速さ（光速）よりも、十分に小さい場合には、正しい運動方程式と、ニュートンの運動方程式の「誤差」は、とても小さくなります。だから、日常生活の範囲では、ニュートンの運動方程式は、「ほとんど」正しい——と、言うコトができます。第1節では、「秒速8 kmの速さで飛ぶロケットから、秒速3 kmの速さで小型宇宙機を放射したら、……」というハナシをしましたけど、この程度の速さでは（日常生活の感覚から言えば、とてつもなく、凄まじい速さですけど）、ニュートンの運動方程式で計算しても、「誤差」はゼロだとみなして、まったく問題はありません。ところが、観測者から見た物体の速さが、光の速さ（光速）に近くなると、「誤差」は、どんどん大きくなってしまいます。

□ココで、ちょっと、専門的なハナシをしましょう。まずは、加速度について。たとえば、3 [秒] が経過するあいだに、速さが 15 [m/秒] だけ変化したら、加速度は、「速さの変化量」=「加速度」×「時間」より、15 [m/秒] ÷ 3 [秒] = 5 [m/秒²] となります。けれど、3 [秒] が経過するあいだにも、時々刻々と、加速度は変化しているかも知れません。だから、コレは、正確には、「平均の加速度」と呼ばれます。一方で、仮に、とても短い時間間隔（たとえば、 dt [秒]）と表すコトにします）を考えれば、この dt [秒] のあいだに、加速度は、ほとんど変化できない——すなわち、この時間間隔のあいだだけは、加速度が一定であるとみなして、計算しても良いはずで（時間間隔が、どのくらい短ければ、加速度一定とみなすのに十分かは、重要な問題ですけれど、いまは、追求しないでいきます。ちなみに、記号に「 d 」を付けるコトで、「とても小さな量」や「変化量」を表す——という慣習があります。「時間 (time)」を、記号 t で表す場合、「 dt 」と書く、「とても短い時間間隔」を意味します）。すると、この dt [秒] のあいだに、どのくらい速さが変化したのか（ココでは、速さの変化量を、 dv [m/秒]）と書くコトにします）を調べるコトで、「瞬間の加速度」 $a = dv/dt$ [m/秒²] を求めるコトができます。ふつう、ただ単に、「加速度」と言ったときは、「瞬間の加速度」のコトを、指しています。ちなみに、このように、「微分対象を、とても小さな量（ココでは、とても短い時間間隔）に分けて、計算するテクニックを、「微分法」と呼びます。

□さて、加速度 a が、 $a = dv/dt$ と表せるのなら、コレを、ニュートンの運動方程式 $ma = F$ に代入するコトで、ニュートンの運動方程式は、

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

と、書き直せます。このように、微分法を用いて表した数式を、「微分方程式」と呼びます。微分方程式で書いたほうが、専門家っぽく見えますよね（もちろん、専門家っぽくだけでなくて、ただの方程式よりも、微分方程式のほうが、より詳しく、たくさん情報を、引き出すコトができるのです）。

□ところで、観測者と物体が、お互いに静止している場合には、ニュートンの運動方程式が、成り立つワケですけど、観測者と物体が、お互いに静止していない場合には、どうなるのでしょうか。観測者と物体が、お互いに静止しようとして、いまいと、常に成り立つ、「特殊相対論的に正しい運動方程式」は、

$$m \frac{d(v/\sqrt{1-(v/c)^2})}{dt} = F$$

と、表すコトができます。もちろん、ココに出てきている c は、光の速さ（光速）です。

□「特殊相対論的に正しい運動方程式」の意味を理解するためには、いったん、ニュートンの運動方程式に戻って考えてみると、分かりやすくなるかも知れません。ニュートンの運動方程式 ($ma = F$) は、文章で表すと、「物体にはたらく力 F は、とても短い時間間隔 dt のあいだの物体の速さ v の変化量 (dv) ——すなわち、加速度 $a = dv/dt$ に比例する。その比例定数が、物体の質量 m である」と、なります。では、特殊相対論的に正しい運動方程式を、文章で表した場合は、どうなるのでしょうか。「(観測者から見た) 物体にはたらく力 F は、(観測者から見た) とても短い時間間隔 dt のあいだの (観測者から見た) 物体の $v/\sqrt{1-(v/c)^2}$ という量の変化量 ($d(v/\sqrt{1-(v/c)^2})$) に比例する。その比例定数が、物体の質量 m である」と、なります。ココに出てくる $v/\sqrt{1-(v/c)^2}$ という量は、速さや質量などとは違って、直感的にイメージできる量ではないので、ちょっと、難しく感じるかも知れません。それでも、とにかく、物体にはたらく力 F が、作用するのは、物体の速さ v (の変化量) ではなくて、物体の $v/\sqrt{1-(v/c)^2}$ という量 (の変化量) である——というコトが、ナニよりも重要です。そのため、物体にはたらく力が同じでも、物体の速さの変化量 (加速度) が同じには、ならなかったのです。ちゃんと調べてみると、**どんなときも、物体にはたらく力が同じならば、物体の $v/\sqrt{1-(v/c)^2}$ という量の変化量は、必ず、同じになるコトが、**分かります。皆さんなら、物体の $v/\sqrt{1-(v/c)^2}$ という量に、どんな名前を付けますか。

■4. 「時間」と「距離」だけが、ぼくらを、惑わす。——そして、一般相対論へ。

■さて、ココまでの説明で、「動いている物体は、重くなる」というハナシが、まったくの誤解であるコトが、良く分かってくれたと思います。だけど、まだ、反論の余地は、あります。「いやいや、『動いている物体は、重くなる』というハナシでも、正しい特殊相対論の説明はできる。特に、エネルギーや運動量に関する現象は、コチラのほうが、直感的に分かりやすく説明できる。すなわち、コレは、どちらの解釈を使うのかという問題であって、解釈自体は、どちら間違いない」——と、反論されたなら、どう答えれば、良いのでしょうか。

■まず、そもそも、「動いている物体は、重くなる」という解釈で、ホントに、正しく、特殊相対論の説明が、できるのでしょうか。ココまで読んできたなら、すぐに分かると思いますけど、「動いている物体は、重くなる」という解釈では、第1節で述べた、「ありさとリトこが、お互いに静止していない場合、『リトこから見たありさの速さ』、『ありさから見たナーの速さ』、『リトこから見たナーの速さ』のあいだには、単純な足し算が成り立たない」という現象が、まったく説明できません。確かに、力がはたらく現象や、エネルギー・運動量に関わる現象などでは、「動いている物体は、重くなる」という解釈で説明したくなるコトが、多いかも知れませんが、でも、第1節で紹介したように、リトこ、ありさ、ナーが、みな、別々の速さで等速直線運動をしている場合でも——つまり、誰にも、まったく、力がはたらいけない場合でさえ、速さに関しては、単純な足し算が成り立ちません。コレは、ココまでに、何度も強調してきたように、お互いに静止していないありさとリトこでは、「時間」の進み方も、「距離」の感じ方も、違うからです。質量が影響する余地は、どこにもありません。質量が関係する現象には、「動いている物体は、重くなる」という解釈を使うけれど、質量が関係しない現象には、別の解釈を使うというのは、ずいぶん、ご都合主義のように感じます。一方で、「お互いに静止していないありさとリトこでは、『時間』の進み方も、『距離』の感じ方も、違う」という解釈なら、どんな特殊相対論の現象でも、説明できるのです。どちらが、「正しい解釈」なのかは、明らかでしょう。

■別の観測者のハナシも、紹介しておきましょう。ココに、1つの電荷があるとします。そして、この電荷が持つ電気を調べる観測者が、何人もいます。この電荷がどんな速さで動いていても、さらに、観測者たちが別々にどんな速さで動いていても、すべての観測者にとって、この電荷が持つ電気量は同じ大きさに見える——というコトが、電磁気学の基礎であるマクスウェルの方程式から、わりと簡単に証明できます。つまり、電気量は、電荷が動いても、その大きさは変わらないのです。それなのに、同じく物体の性質を表す量である質量は、物体が動くとも、その大きさが変化する——というのは、いかにも、不自然に感じてしまいます。この点からも、「動いている物体は、重くなる」という解釈は、やっぱり、ご都合主義のような印象を抱かざるをえません。

□ココで、どうして、わざわざ、「同じく物体の性質を表す量である質量は、物体が動くと、その大きさが変化する——というのは、いかにも、不自然に感じてしまいます」のように、お茶を濁すような言い方を、したのでしょうか。「電気量は、電荷が動いても、その大きさは変わらない」というコトが、マクスウェルの方程式から証明できるのなら、[質量は、物体が動いても、その大きさは変わらない]というコトも、ニュートンの万有引力の法則とかから、証明できても、不思議ではないですよ。でも、実は、**ニュートンの万有引力の法則を、特殊相対論に当てはめると、致命的な矛盾が生じてしまうから**です。

□『動いている時計は、遅くなる』の間違いを暴く！』の第3節『他人の目なんか、気にするな!』のなかで、「**相対性原理**」のハナシをしたコトを、思い出して下さい。ここでは、「誰が運動していて、誰が静止しているかは、誰に尋ねるかで、答えが変わってくるのです」、「すなわち、『静止』という概念は、絶対的なモノではなく、観測者によって変わる、曖昧なモノなのです」、「この考え方を、『相対性原理』と呼びます」と、説明していました。実は、**ニュートンの万有引力の法則を、特殊相対論に当てはめると、この「相対性原理」が、成り立たなくなってしまうのです**。つまり、ニュートンの万有引力の法則は、十分に軽い物体どうし、かつ、お互いに静止している（または、光の速さ（光速）に比べて、十分に遅い速さで動いている）観測者と物体のあいだだけで成り立つ、近似法則に過ぎなかった——というワケです。

□それなら、特殊相対論的に正しい万有引力（重力）の法則は、どうなるのでしょうか。実は、**特殊相対論の枠組みでは、万有引力（重力）を扱うコトは、できません**。つまり、「相対性原理」が成り立ち、かつ、万有引力（重力）を含めても、破綻しない理論は、特殊相対論の枠組みでは、どうしても、つくるコトが、できないのです。そこで、特殊相対論を発展させて、「相対性原理」が成り立ち、かつ、万有引力（重力）を含めても、破綻しない理論が、つくられました。それが、「**一般相対論**」です。

□一般相対論の枠組みでは、質量は、もはや、万有引力（重力）の原因（源）では、ありません。万有引力（重力）の源は、エネルギーと運動量です（エネルギーや運動量の大きさは、質量の大きさにも影響されるので、万有引力（重力）の強さは、**間接的に**、質量の大きさにも、影響される——というワケなのです）。だから、万有引力（重力）の大きさが変化した場合にも、その原因として、「質量が変化したから」という解釈だけに、こだわる必要は、ありません。すなわち、一般相対論の枠組みで考えても、「動いている物体は、重くなる」という解釈に、こだわる必要は、どこにも、ないのです。

■そんなワケで、「動いている物体は、重くなる」というハナシが、まったくの誤解である——というコトは、十分に、納得してくれたい、思います。ところで、実は、ココまでの説明で、ある「核心」に関わるハナシを、慎重に避けてきたコトに、気づいていましたか。それは、「**質量の定義**」——つまり、「**そもそも、質量とは、なんぞや**」に関わるハナシです。もしかしたら、「動いている物体は、重くなる」が成り立つように、つまり、あくまで、ニュートンの運動方程式 $ma = F$ に基づいて、「質量」を定義するコトは、不可能ではないのかも知れませんが（間違いなく、理論体系の合理性や美しさは、損なわれると思いますけれど）でも、この問題にハマり込んで、哲学の迷宮から抜け出せなくなったら、タイヘンです。皆さんも、気をつけて下さいね。

ERO-GAME BRAND "Littlewitch" presents SUGAR COAT FREAKS

