回答

　確認のため、質問内容を以下にコピーします。

「（前文略）コリオリ力って外積では？円運動に右ねじの法則を当てはめてみたらなんか上手くいったんですよ。その具体的な手順は、

1．　回転系の回転方向に右ねじを回す
2．　その時の親指の向きを確認
3．　回転系に固定されない物体の速度について軸に直角な成分を考えてその方向に4本指を向ける
4．　2で確認した親指の差した方に4本指を（90°）傾ける
5．　その時の親指の差した向きがコリオリ力の向きになる

という感じで...（右手でも左手でもできました）。これでコリオリの力が赤道で働かない理由も回転軸と速度成分が平行になっているからだと説明でき、しっかりと向きもあっているのでまあいいかなとは思ったのですが、やはり少し気になるところがあって、

●この手順の2.で決めた親指の向きは一体なんなのかということ。

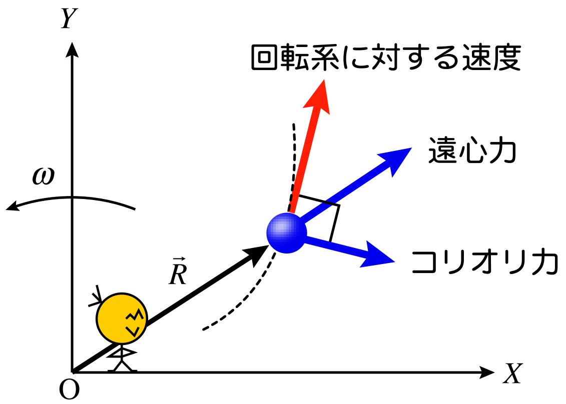
●そもそもこの考え方は大丈夫なのかということ。

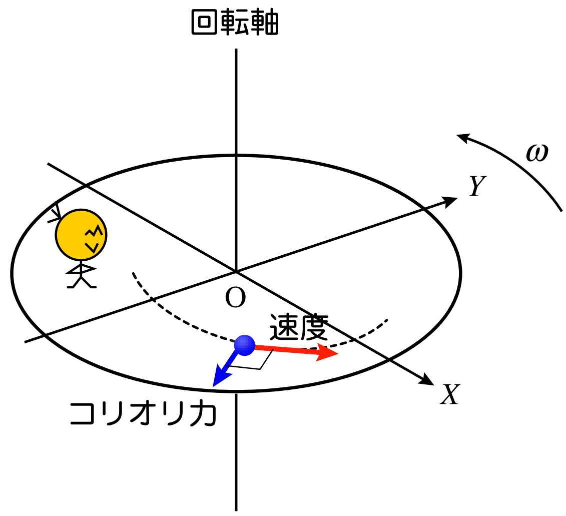
こんな感じで今少し疑問が残っていまして（特に●の１つ目）、　何かあるのかなあとは思いつつあまり深くは理解できていない状態です。」

　コリオリの力が「外積」と関連することに気づいた点は素晴らしいと思います。どのような思考過程でたどり着けたのかを想像することはできませんが、確かにコリオリ力は外積を用いて表現することができます。まずはこの点について説明させていただきます。（長くなるので、来年受験を控えているのであれば、受験後に熟読することをおすすめします。そもそもコリオリ力に関して入試でストレートに出題されることはないので安心してください。あくまで高大接続のための回答と考えていただきます。）

まず外積に関する数学的知識は授業などで完璧に理解していることを前提に説明させていただきます。また、当サイトのコリオリの力に関する動画も視聴済みとします。この講義の中でコリオリの力を導出していますが、その結論は以下のようになります。慣性系に対して角速度ωで回転する回転座標系（以下回転系）XYからみた質量mの物体の運動方程式は

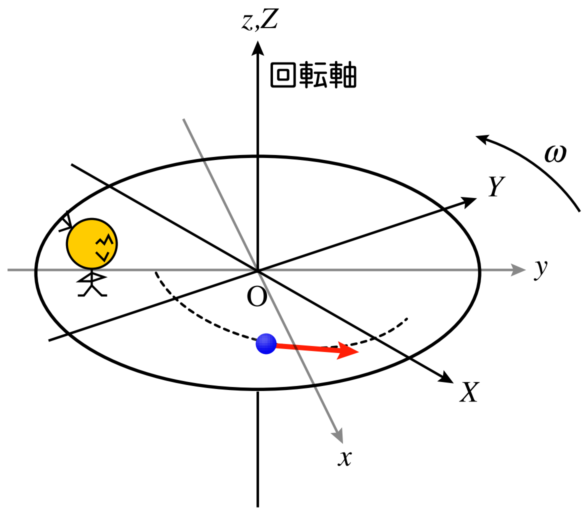
$$\begin{cases} m\ddot{X} = F_X + m\omega^2 X + 2m\omega\dot{Y} \\ m\ddot{Y} = F_Y + m\omega^2 Y - 2m\omega\dot{X} \end{cases}$$





$\vec{F} = (F_X, F_Y)$は真に働く力、$\vec{F}_1 = (m\omega^2 X, m\omega^2 Y)$が遠心力であり、そして$\vec{F}_2 = (2m\omega\dot{Y}, -2m\omega\dot{X})$がコリオリの力であり、遠心力とコリオリ力は見かけ上の力であることは理解できていると思われます。もし物体がXY平面内のみを動きまわるだけならば、この説明で十分なのですが、現実の物体の運動の多くは３次元的であり、コリオリの導出も３本の座標を用いて行うのが本来です。つまりz軸を追加して物体の運動を記述する方程式を導く必要があるのです。ｚ軸は図のように回転軸に沿って設置します。また、慣性系のｚ軸と回転系のZ軸を一致させると議論が容易になります。物体のz座標を慣性系ではz（小文字）、回転系ではZ（大文字）で表記するとすれば、座標軸が一致していることから、その変換式が$z = Z$であることを理解してくだ

さい。x と X 、y と Y の変換式は講義動画で説明したものと何ら変わりはありません（結構面倒な式でしたよね）。すると慣性系に対して角速度 ω で回転する回転系 XYZ からみた質量 m の物体の運動方程式は



$$\text{慣性系での運動方程式：}\begin{cases} m\ddot{x} = F_x \\ m\ddot{y} = F_y \\ m\ddot{z} = F_z \end{cases}$$

↓変換

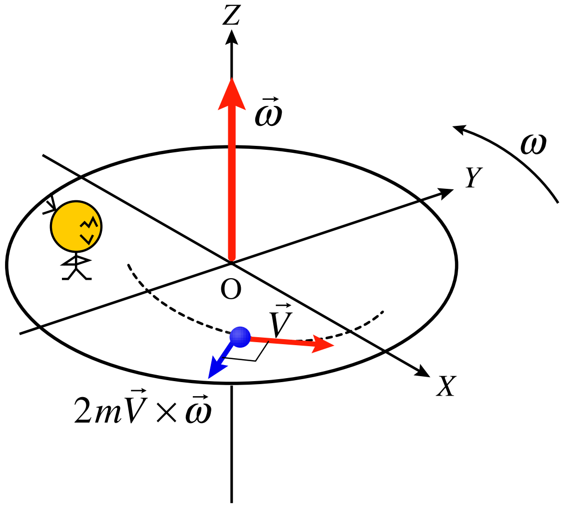
$$\text{回転系での運動方程式：}\begin{cases} m\ddot{X} = F_X + m\omega^2 X + 2m\omega\dot{Y} \\ m\ddot{Y} = F_Y + m\omega^2 Y - 2m\omega\dot{X} \\ m\ddot{Z} = F_Z \end{cases}$$

が得られます。z 軸が一致していることから、運動方程式のz成分の式に補正項が現れません。$\vec{F} = (F_X, F_Y, F_Z)$ は真に働く力、$\vec{F}_1 = (m\omega^2 X, m\omega^2 Y, 0)$ が遠心力であり、$\vec{F}_2 = (2m\omega\dot{Y}, -2m\omega\dot{X}, 0)$ がコリオリ力と呼ばれる見かけ上の力なのです。コリオリ力については $\vec{F}_2 = (2m\omega\dot{Y}, -2m\omega\dot{X}, 0)$ がすべてであり、これ以上でもこれ以下でもないのです。問題はこの結果をどのように暗記して利用するかということになるのですが、このコリオリ力をスマートに表現する方法があります。それがまさに山田君が気づいた「外積」を利用する方法なのです。まず、先程のコリオリ力 $\vec{F}_2$ は次のように式変形できることを理解してください。

$$\vec{F}_2 = \begin{pmatrix} 2m\omega\dot{Y} \\ -2m\omega\dot{X} \\ 0 \end{pmatrix} = 2m \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{pmatrix}$$

最後に現れた「×」の記号はもちろん「クロス記号」であり「外積」を意味します。 $(\dot{X},\dot{Y},\dot{Z})$ は回転系に対する物体の速度であり、これを $\vec{V}=(\dot{X},\dot{Y},\dot{Z})$ と表すことにします。すると $(0,0,\omega)$ のベクトルも略記したくなりませんか！　そこでこのベクトルを $\vec{\omega}=(0,0,\omega)$ と書くことにすれば

$$\vec{F}_2 = 2m\vec{V}\times\vec{\omega}$$



と極めてシンプルに表現できます。イメージできる？（女王の教室風w） $\vec{\omega}$ がどんなベクトルなのか想像してみてください。$\vec{\omega}=(0,0,\omega)$ の成分をみればわかるように、大きさが ω で、回転軸に平行なベクトルですよね。つまり $\vec{\omega}$ は回転軸の方向と角速度の大きさを合わせ持った人為的につくられたベクトルであり、その名も角速度ベクトルとよばれているのです。回転系が決まれば、自動的にこの角速度ベクトルは定まります。そして、回転系から物体の運動を眺めれば、真の力以外に遠心力 $\vec{F}_1=(m\omega^2X,m\omega^2Y,0)$ とコリオリ力 $\vec{F}_2=2m\vec{V}\times\vec{\omega}$ が働いて運動しているように見えるはずです。

「だったら、動画でもこの説明すりゃいいじゃん！」と思うでしょうが、入試物理で扱うコリオリの知識の有無を問う問題が、100％回転面内での平面運動になっているため、座標軸をxyに限定して証明しております。そのため３座標必要な外積を用いることが出来ないのです。そもそも多くの方がコリオリ力を理解するのに苦労しているわけで、いきなり３次元運動する物体のコリオリ力を導出しイメージさせることは技術的に難しいと考えます。ですから多くの場合、段階的に知識を引き上げる方法をとることになり、まず

は２次元で理解させ、その先に３次元運動での導出と取り扱いを説明するのが一般的手法となるのです。

公式を覚えるという視点でみても、この順番で学ぶことに無理がないことがわかります。２次元運動の場合のコリオリ力の強さは$F_2 = 2mV\omega$ と計算し、向きについては別途求め方を指導します。これを３次元運動に拡張指導する場合、向きと大きさを合わせて$\vec{F}_2 = 2m\vec{V} \times \vec{\omega}$ と表現できるわけで、$F_2 = 2mV\omega$ に矢印２本とクロス記号を付加するだけで思い出せてしまうため、難なくステップアップできることがわかります。

当サイトの講義はあくまで受験物理対策の位置づけで講義を制作している関係上、2次元運動に限定して解説をしていることを理解してください。

さて、ここから本題の回答になりますが、コリオリが$\vec{F}_2 = 2m\vec{V} \times \vec{\omega}$ と外積で記述できるため、その方向も「右ねじ」や「右手（いいねボタンの形）」を用いて判断することができるわけです。$\vec{F}_2 = 2m\vec{V} \times \vec{\omega}$ は$\vec{V}$ から$\vec{\omega}$ の方向に右ねじをまわしたときに右ねじが進む方向にコリオリ力は働くのです。これは例外はありません！！

山田君の質問にある「●この手順の2.で決めた親指の向きは一体なんなのか」についてですが、１.２.の作業はまさに角速度ベクトル$\vec{\omega}$ の方向を確認していると考えてよいでしょう。そして3.4.の作業が$\vec{V} \times \vec{\omega}$ の方向をさぐっていると考えられます。その方向が$\vec{F}_2$ の方向を表すと5.で結論しているので、「●そもそもこの考え方は大丈夫なのか」については、概ね正しいといってよいと思います。ただ気になるのは「左手でもできました」と説明されている点でしょうか。左手だと結果が逆になりませんかね。それとも1.2.も左手、3.4.も左手でやったのでたまたまうまくいくのでしょうか（左の左は右みたいなイメージです）。そのあたりが気になりました。

そこで提案ではありますが、コリオリが外積で記述されること、外積の向きを調べる方法は右ねじ（右手）が世の中のスタンダードであることを考えると、今後は右手で作業をしていただいた方が安全かと思います。

ついでに遠心力$\vec{F_1}=\left(m\omega^2X, m\omega^2Y, 0\right)$についても説明しておきましょう。物体の回転系に対する位置を$\vec{R}=\left(X,Y,Z\right)$とします。$\vec{F_1}$を$\vec{R}$で表わせそうですが、残念ながら$\vec{R}$の$Z$が邪魔ですよね。そこで$\vec{R}'=\left(X,Y,0\right)$を用意してあげれば$\vec{F_1}=m\omega^2\vec{R}'$とシンプルに表現できます。$\vec{R}'$は$\vec{R}$の$XY$平面への射影ベクトルであり、そのイメージは下図で確認してください。そして$\left|\vec{R}'\right|=r$（回転軸と物体との距離）とすれば$F_1=mr\omega^2$であり、高校物理で学ぶ遠心力の大きさの公式と一致することが理解できます。