

潮汐に関する誤解と正解

谷村 省吾

名古屋大学大学院情報科学研究科
(2017年4月から情報学研究科)

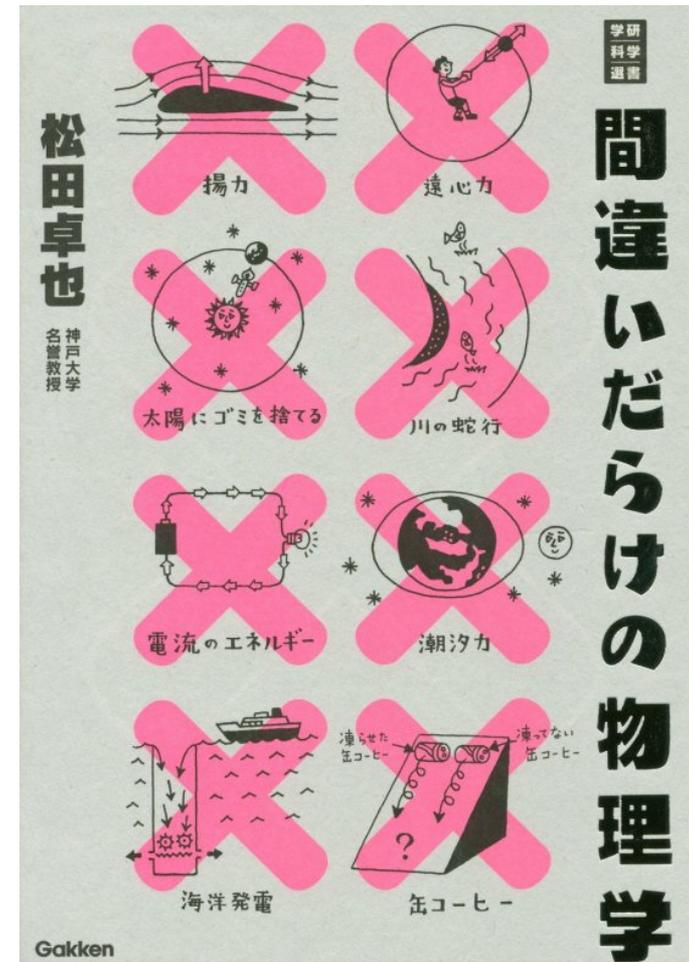
物理学会での講演後にコメントをいただきまして、
修正加筆を行いました。

話の出どころ

- 2009年6月、京大基研で松田卓也氏が 「ファイマンも間違った潮汐力」 という講演を行い、私も聴いた。そのときは、なるほどと私も思った。
- 2016年4月、名大生協主催の「研究者になりたい人集合」という新入生歓迎企画で、私は講演し、潮汐力の問題をクイズとして新入生に出題した。その議論に参加していたポスドクの方が私の思い違いを指摘してくれた。

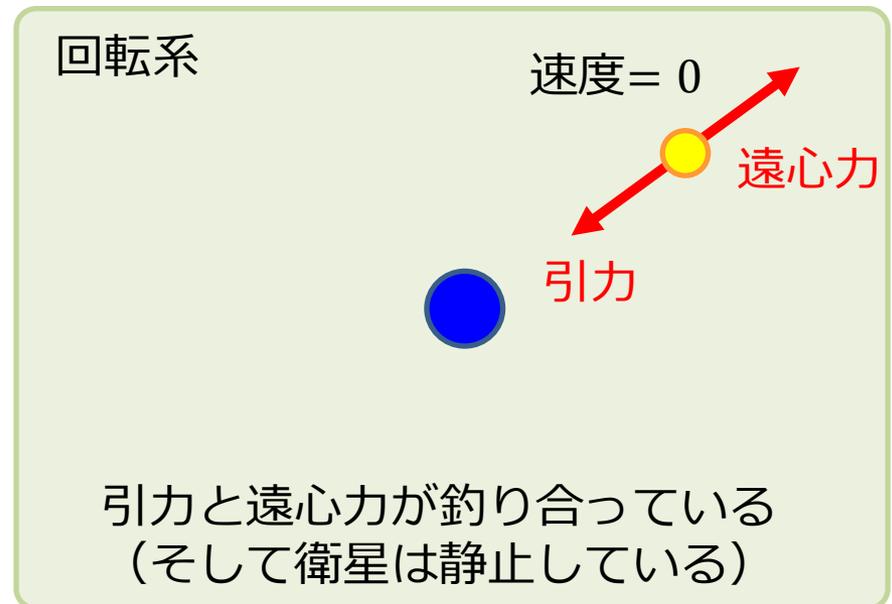
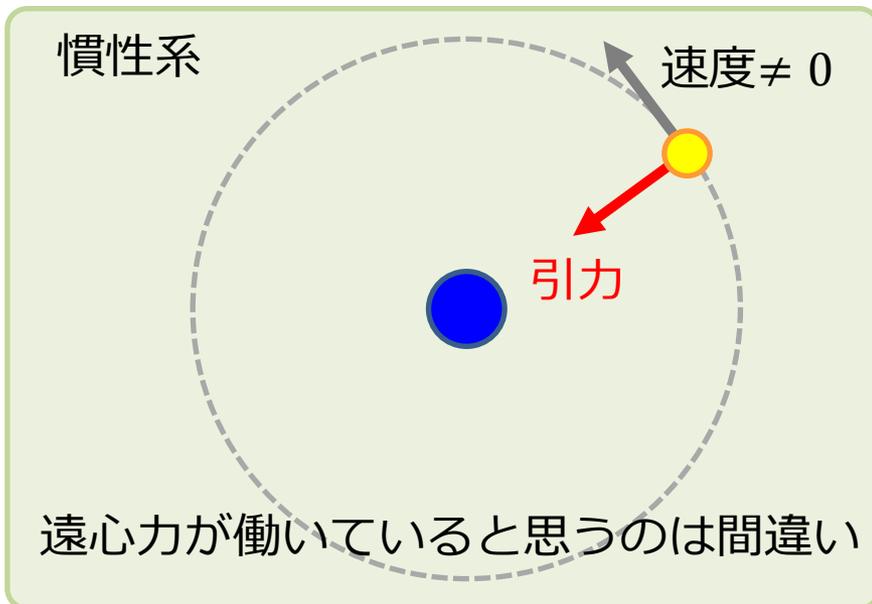
松田卓也著 「間違いだらけの物理学」

- 世にはびこる「間違った物理学」を成敗してくれようという本。
- たしかによいことも書いてある。
- しかし松田先生のお考えがまだ足りないのでは？と思える箇所もある。



遠心力は 回転している観測者のみに見える

- 「引力と遠心力が釣り合って物体が円運動する」という類の説明は、たいていの場合、正しく使われていない。
- 正しくは、「慣性系では遠心力という力はない」。
- 遠心力は回転座標系でのみ現れる。(松田先生のこの指摘は正しいと谷村も思う)



潮の満ち引き



東京都港区台場の海。
この日（2007年5月17日）は新月
で、満潮時最高潮位は**192センチ
メートル**。18時19分撮影。



同日、同地点での干潮時の写真。こ
の日の干潮時最低潮位は**マイナス
18センチメートル**。10時48分撮影。

210 cm の潮位変動

潮の満ち引き



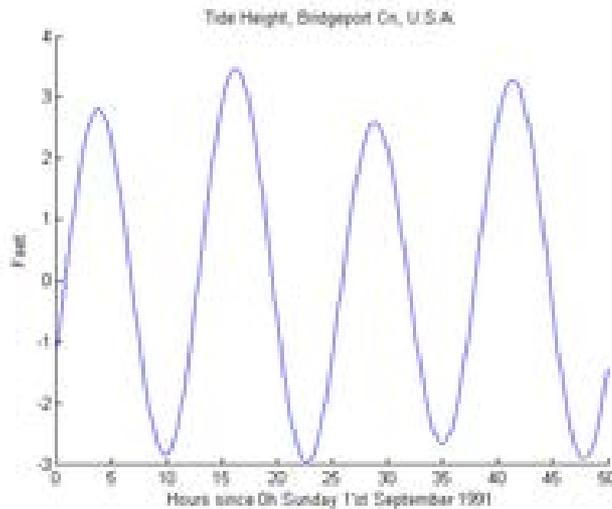
潮の干満が激しいことで知られるカナダのファンディ湾 (Bay of Fundy)。満潮時。



同じ地点での干潮時の写真。干満差は最大15メートルにもなる。

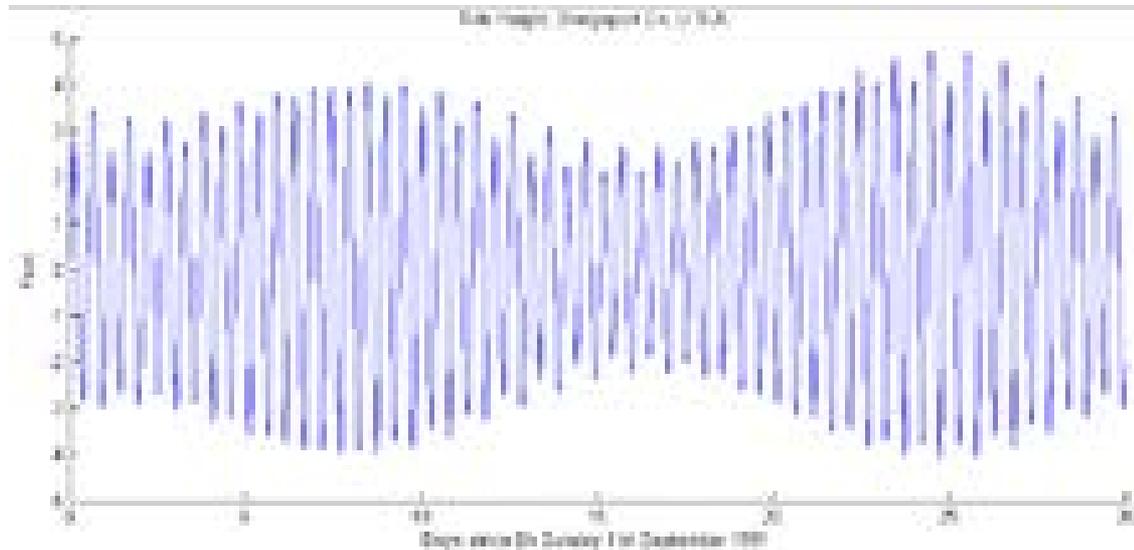
潮の満ち引き

50時間の水位の変化



↔
12時間

30日間の水位の変化



↔
15日

潮汐についての観察事実

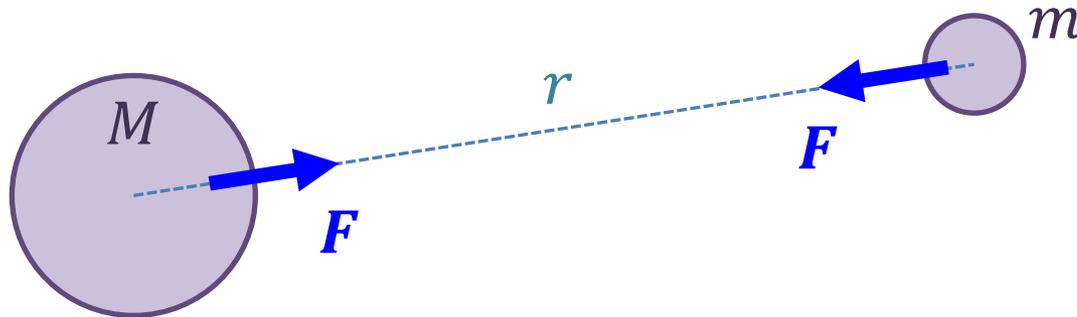
- 1日に2度、満潮と干潮がある。つまり、満潮と干潮の間は約6時間。
- 14～15日の周期で干満の差が最大になる。
- だいたい満月と新月の日に干満の差が最大になる。

万有引力の法則

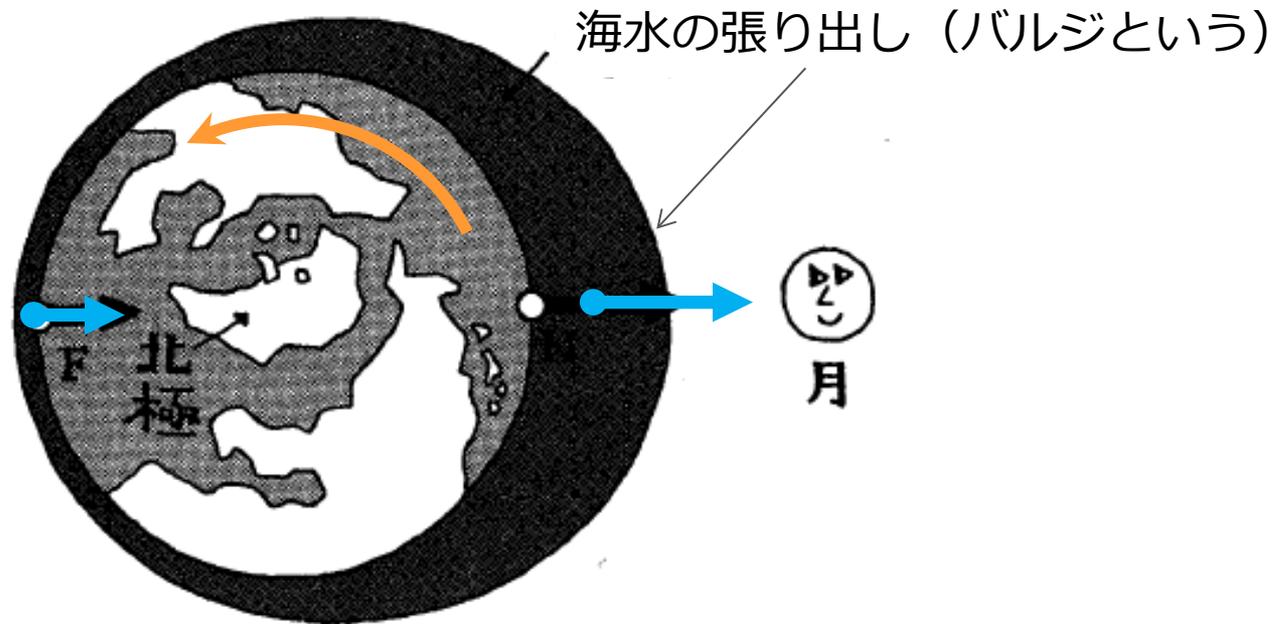
- 質量 M と m の物体が距離 r だけ離れているときの引力の大きさ F

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

万有引力定数 (ニュートン定数) $G = 6.67408 \times 10^{-11} \text{ N kg}^{-2} \text{ m}^2$

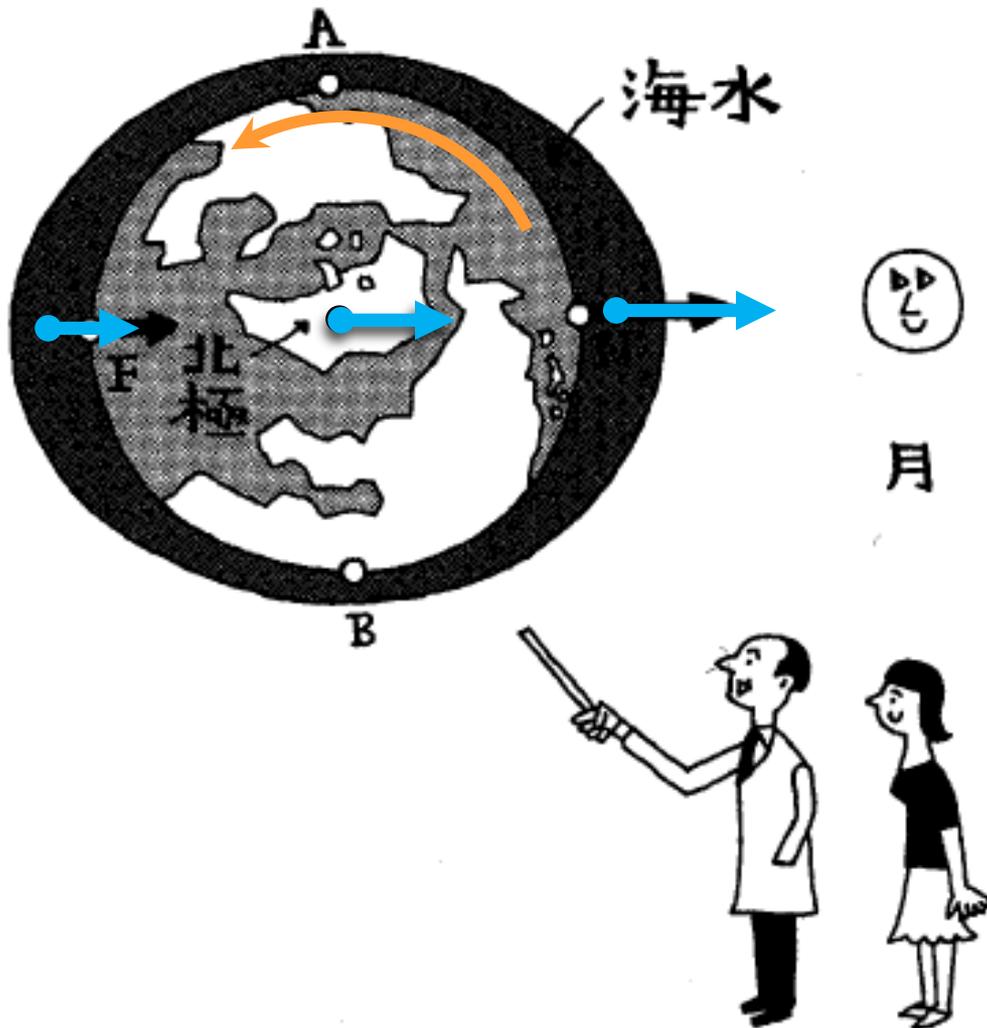


安直な説明



- 月の引力で海水が引っ張られるのが潮汐の原因だとしたら、こうなるはずではないか？
- これなら、1日1回満潮、1回干潮になるはず。
- 1日に2回起こる満潮を説明できない。

その次に安直な説明

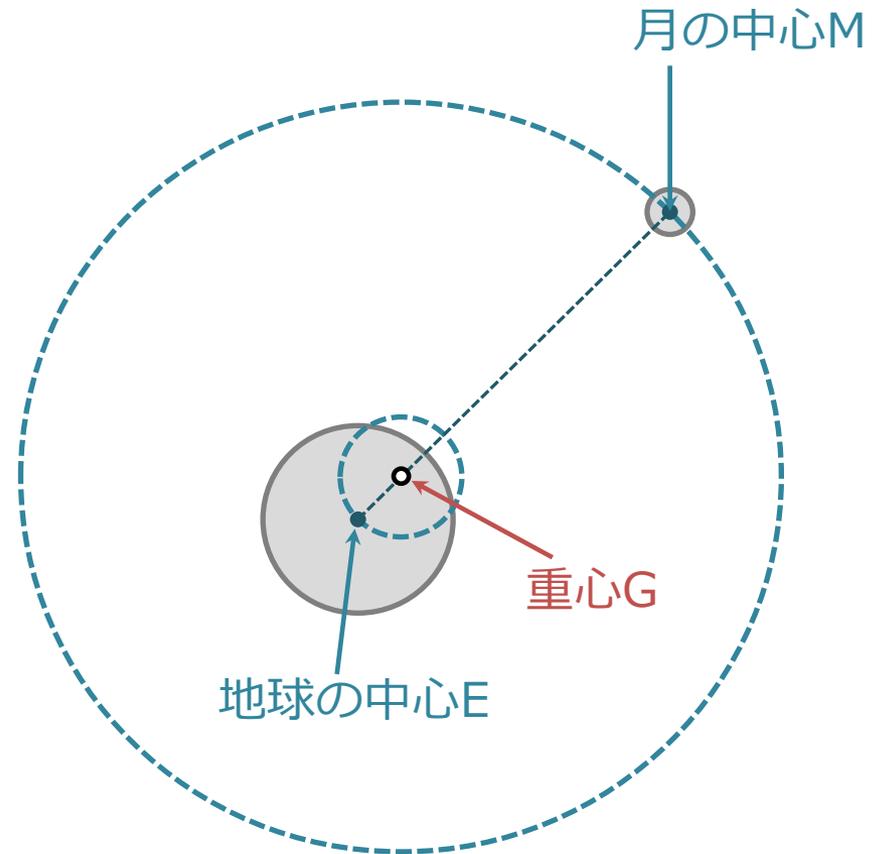


図：松田卓也『間違いだらけの物理学』より

- 海水が月に引っ張られ、地球自体もちょっと月に引っ張られる。それで月を向く海面と、月の反対側の海面の両方が盛り上がる、という説明。
- ファインマンの『物理法則はいかにして発見されたか』にも同様の図と説明が書かれている。
- 感じはわかるが、ちゃんとした説明とは思えない。「海水が後ろに置き去りにされる」というマンガ的なイメージが信用できない。
- 両側がほぼ同じ高さの満潮になることをうまく説明できない。

謎解きの第一歩

- 地球と月の運動は、本当は、太陽や他の惑星も絡んだ多体問題。
- 地球と月だけに注目した慣性系では、**重心の周りを地球と月が回りあっている。**
- 楕円軌道だが円軌道で近似する。

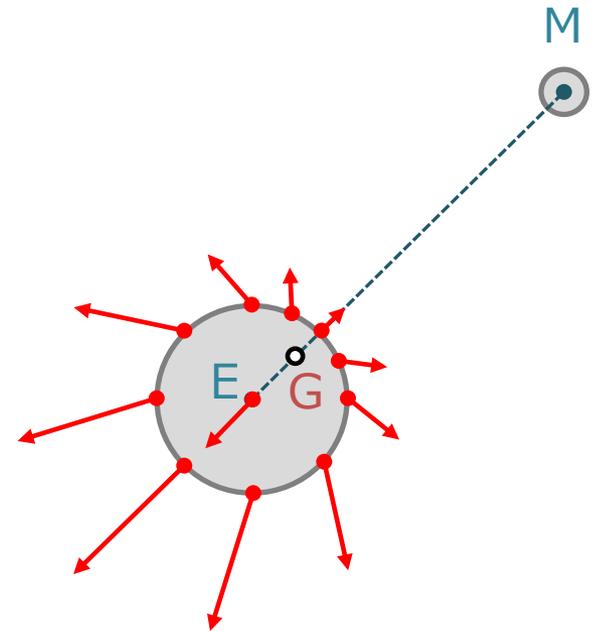


Wikipedia「潮汐」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%AE%E6%B1%90>

Wikipedia「公転運動」 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbit3.gif>

謎解きの第二步

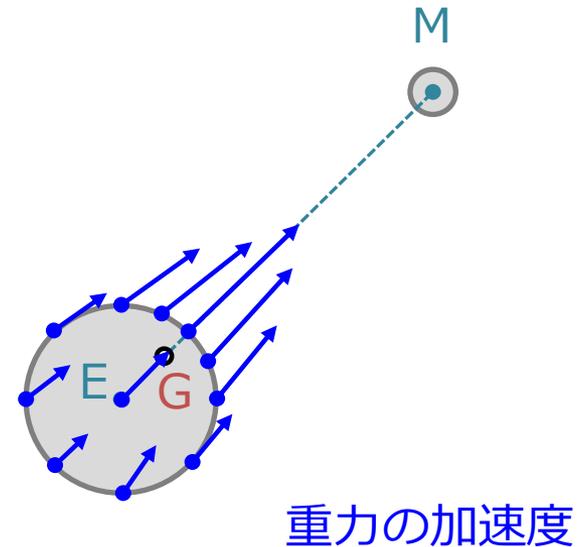
- この運動を、重心Gの周りで一定の角速度で回転している座標系から見る。
- 地球と月は静止して見える。
- 遠心力が生じる。
- 遠心力の向きは、回転の中心Gからの遠心方向。
- 遠心力の大きさは、Gからの距離に比例。



遠心力の加速度

謎解きの第三步

- 重力の大きさは相手天体の中心からの距離の2乗に反比例する。
- 遠心力と重力との合力はどうなっているか？



ここからが松田卓也氏の巧みな分析1

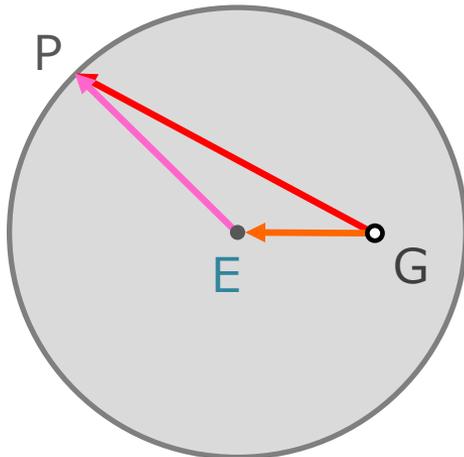
- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力の加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。

点 P における遠心力の加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例



ここからが松田卓也氏の巧みな分析2

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力の加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$

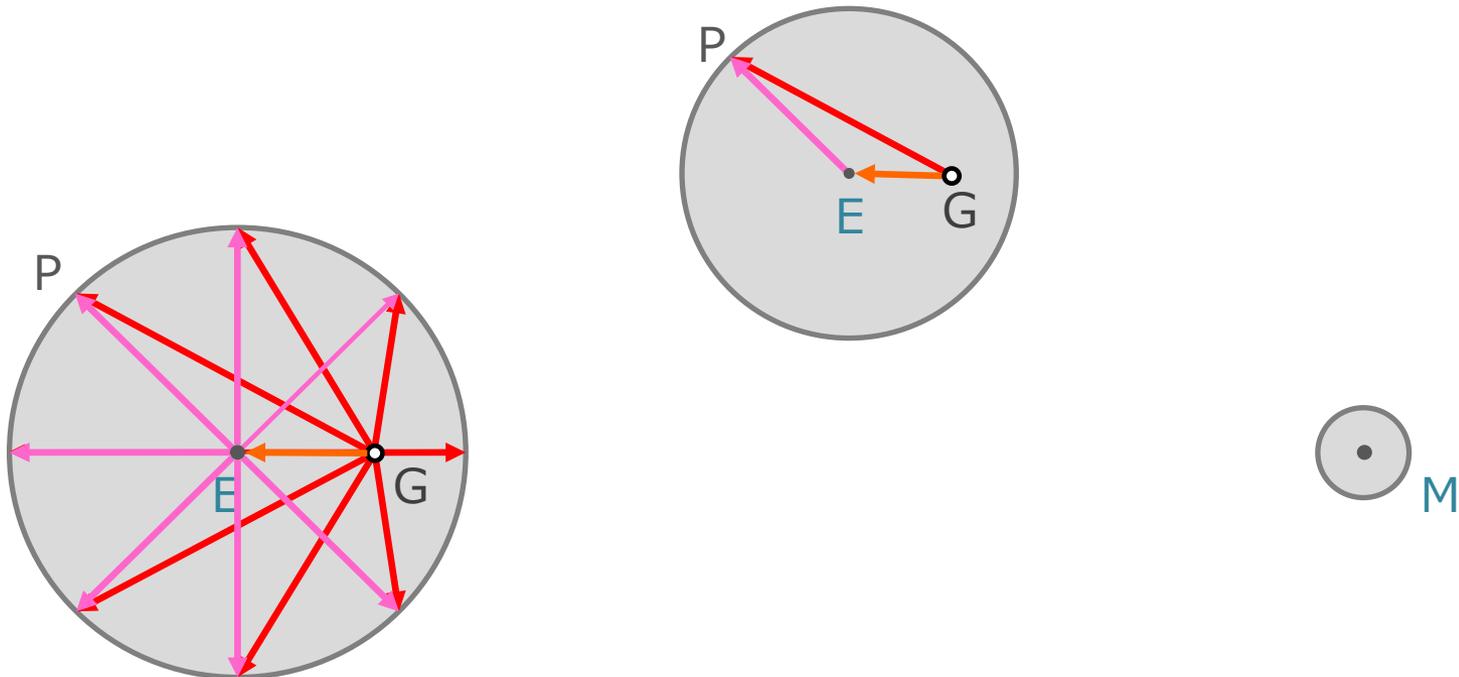


ベクトルの分解 $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$



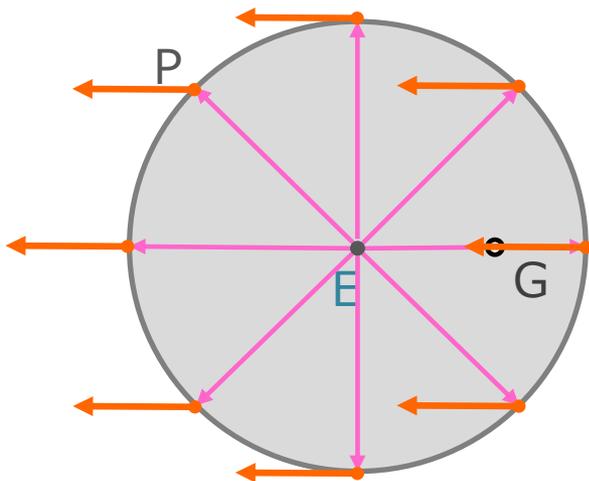
ここからが松田卓也氏の巧みな分析3

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力の加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$
- 成分 \overrightarrow{EP} は鉛直方向に作用し、海水の水平移動に寄与しない。



ここからが松田卓也氏の巧みな分析4

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力の加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$
- 成分 \overrightarrow{EP} は鉛直方向に作用し、海水の水平移動に寄与しない。
- 成分 \overrightarrow{GE} は地球表面上で一定。
- ここまでの推論は、近似なしに、厳密に成り立つ。

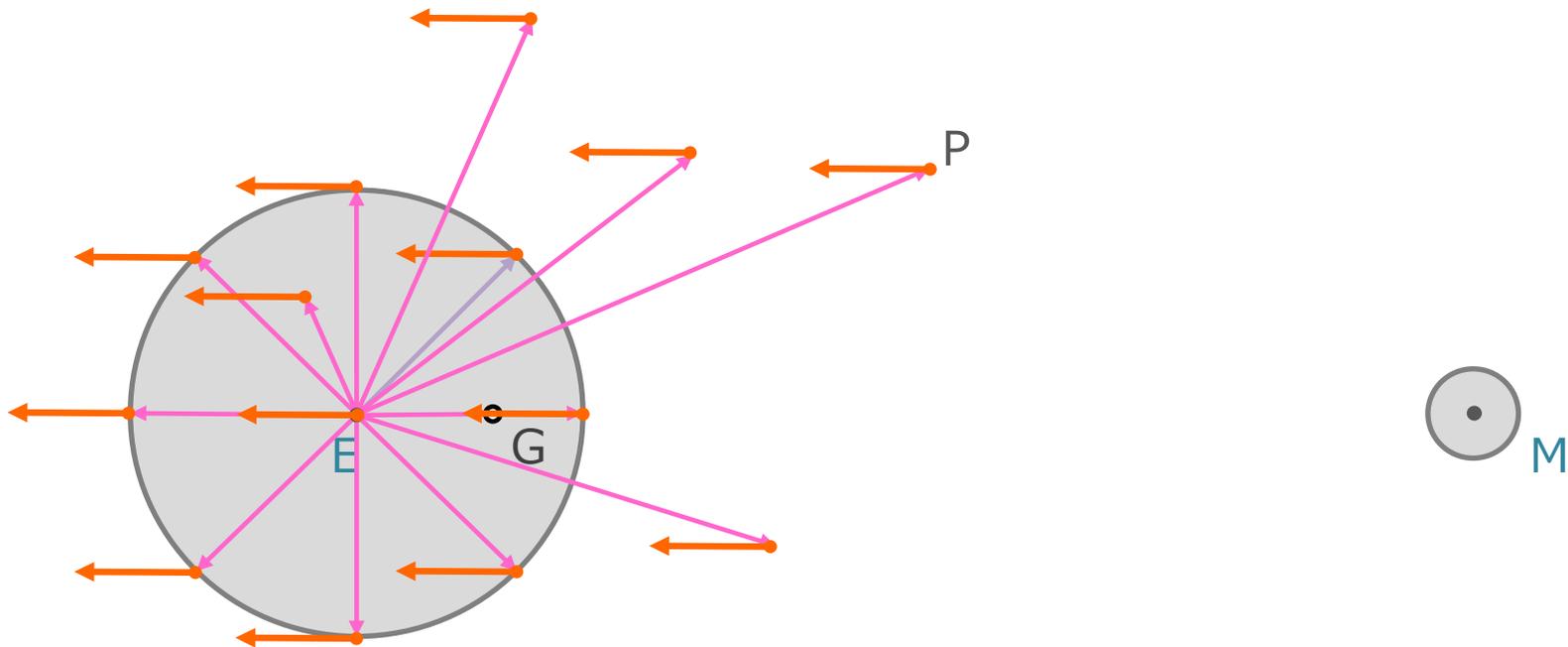


遠心力は、半径方向の成分と、月の反対方向を向く平行成分とに分解される。



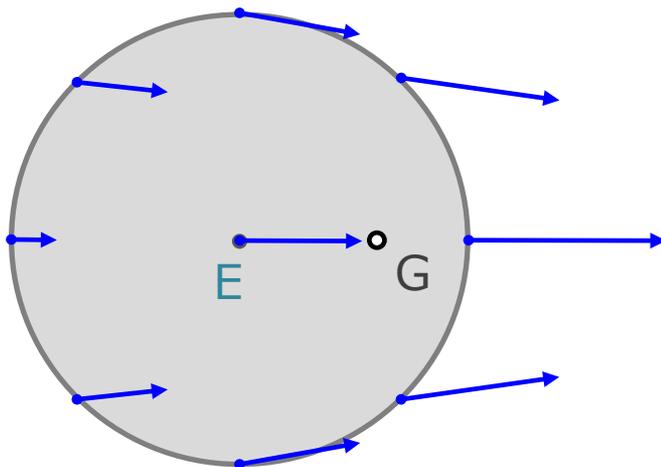
遠心力

- もっと一般的に言えば、あらゆる場所における遠心力加速度は、地球の中心からのベクトル \vec{EP} と、一定のベクトル \vec{GE} との和。
- 地球の中心も同じ遠心加速度 \vec{GE} を受けている。



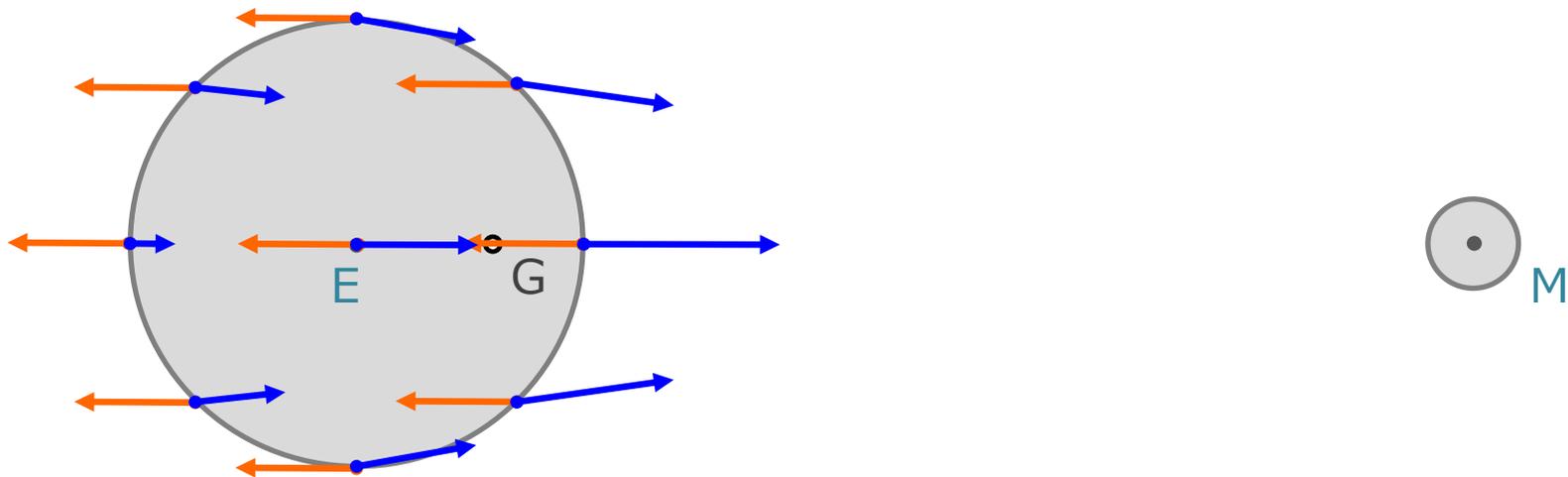
重力

- いわゆる万有引力の法則：各点に月が及ぼす重力は、月の中心を向き、大きさは距離の2乗に反比例する。
- 地球の半径に比べて月と地球の中心間の距離が十分に大きければ、地球表面上では、重力の大きさは月からの距離の1次関数として変動する（1次近似）。



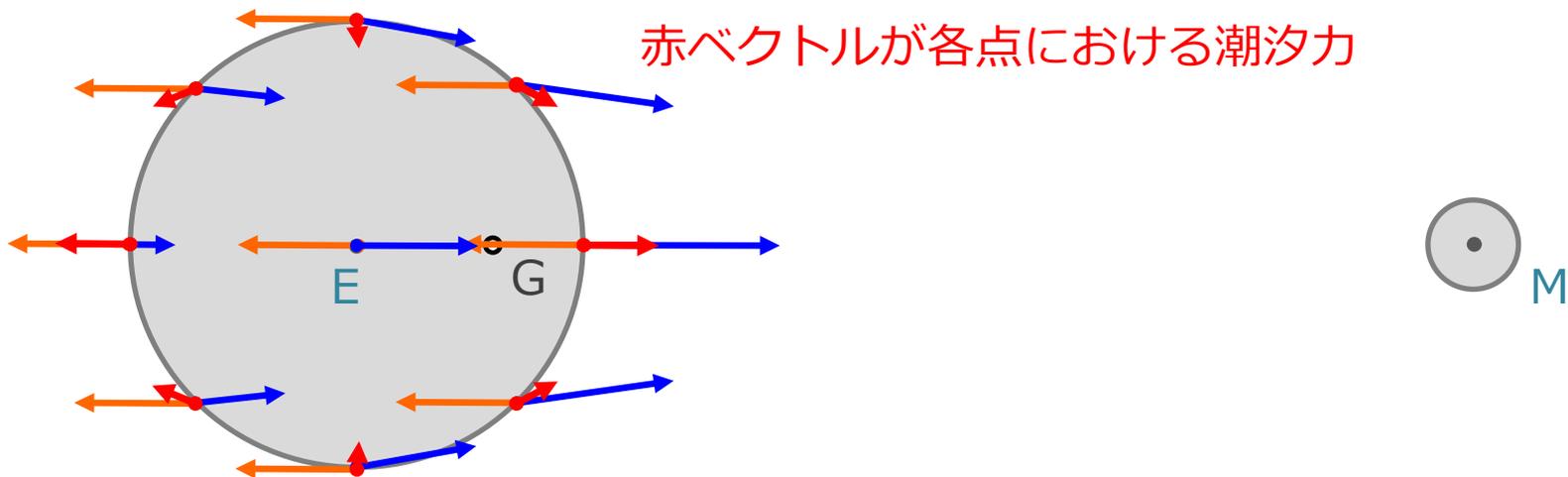
遠心力と重力

- 遠心力加速度のうち海水の移動に寄与する成分（一定ベクトル）と、月が及ぼす重力加速度のベクトルとを重ねて書くと、こうなる。
- とくに地球の中心では、遠心力と重力が打ち消し合う。



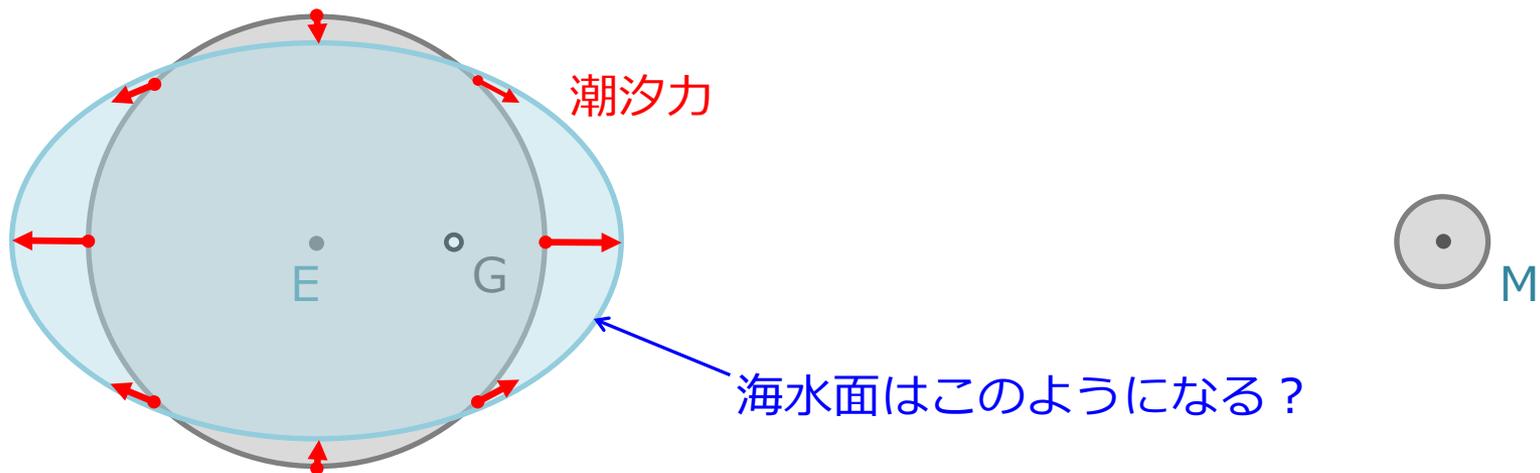
遠心力 + 重力 = 潮汐力！

- 遠心力加速度のうち海水の移動に寄与する成分（一定ベクトル）と、月が及ぼす重力加速度のベクトルとを重ねて書くと、こうなる。
- とくに地球の中心では、遠心力と重力が打ち消し合う。
- 遠心力と重力の合力が潮汐力。
- 以上が、松田氏による謎解き。
- めでたしめでたし・・・と言いたいところだが・・・



月が頭上に来ると満潮になる？

- この説明だと、月に面している側と反対側が満潮で、それに直交する箇所が干潮になるかのような印象を与える。
- 実際、松田氏の本を含め、ほとんどの本に、また、気象庁のウェブページにも、このような図が描かれている。



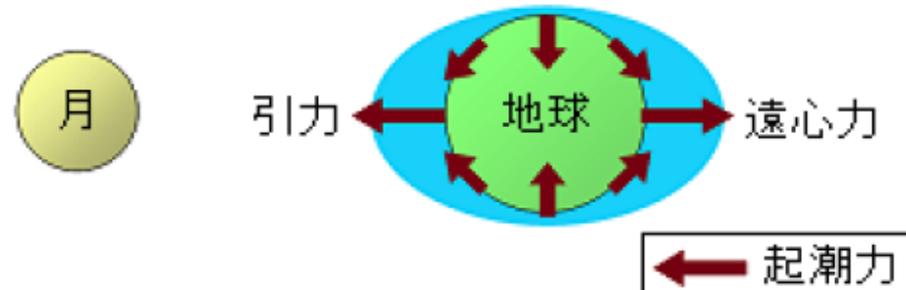
月が頭上に来ると満潮になる？

<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/knowledge/tide/choseki.html>

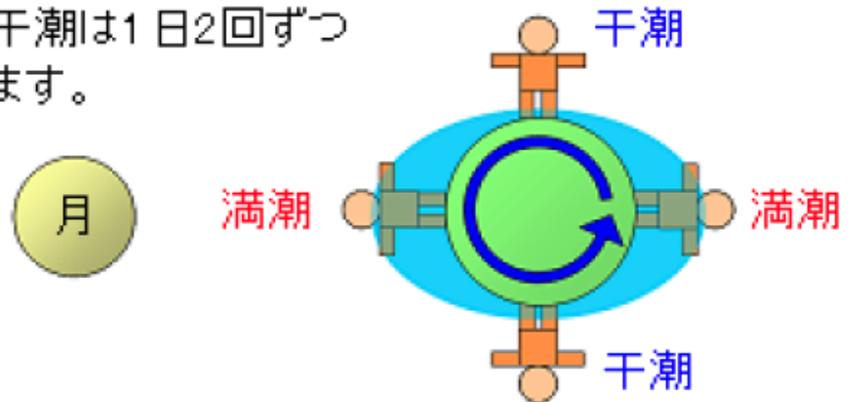
気象庁のウェブページ「潮汐の仕組み」にはこう書かれている：

潮汐が起こる主な原因は、月が地球に及ぼす引力と、地球が月と地球の共通の重心の周りを回転することで生じる遠心力を合わせた「起潮力」です。地球と太陽との間でも、同じ理由でやや小さい起潮力が生じます。

起潮力は、地球を引き伸ばすように働きます。



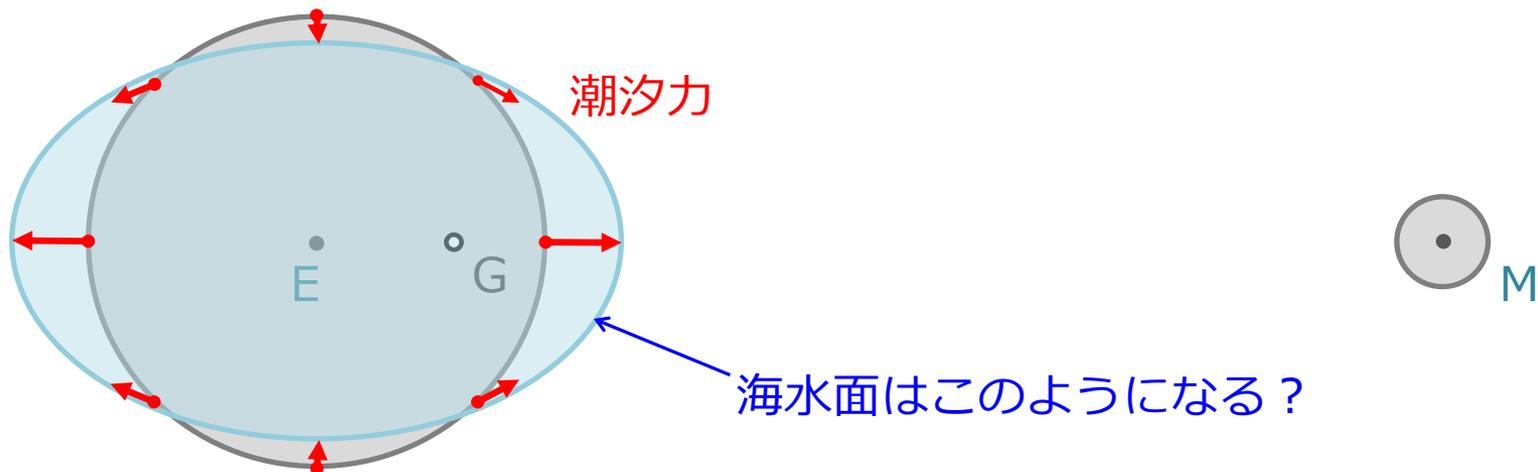
地球は1日1回自転するので、満潮・干潮は1日2回ずつ起こります。



実際は・・・大阪湾では

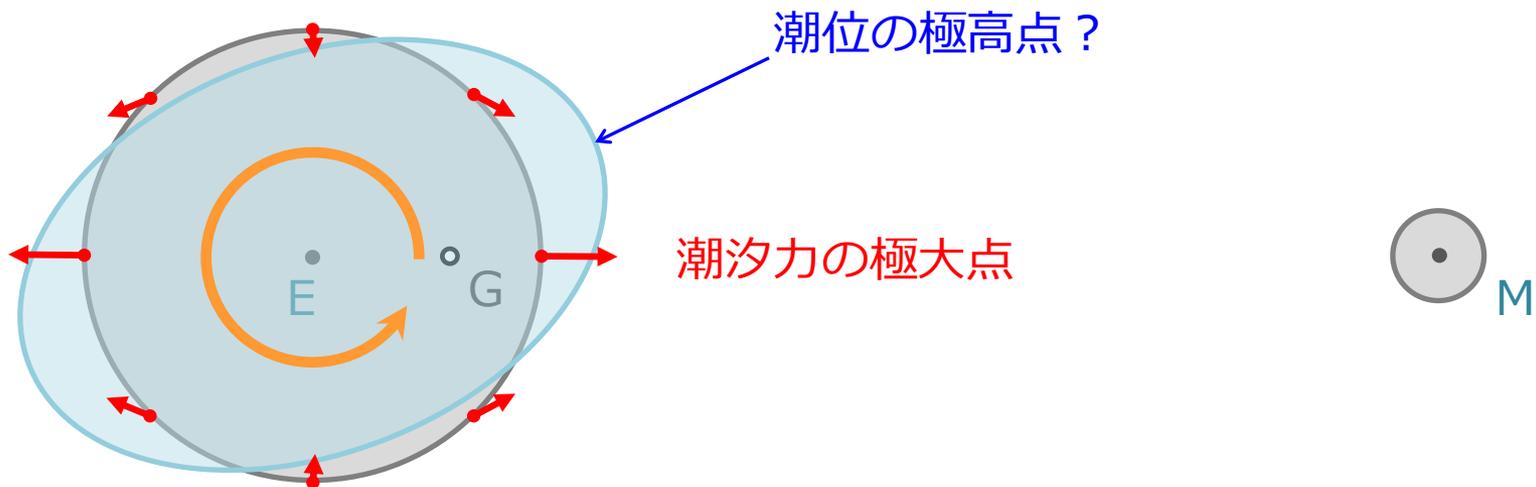
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=OS>

- 気象庁は、いろいろな海岸における海面の高さの予測値をネットで発表している。そのデータは潮位表と呼ばれる。
- 2017年3月12日は満月だった。この日、大阪の港では、
- 6:52（潮位139cm）と18:47（141cm）に満潮
- 0:37（5cm）と12:46（49cm）に干潮
- 月が南中する時刻0時頃に満潮になるわけではない。
- 瀬戸内海は潮流が複雑。



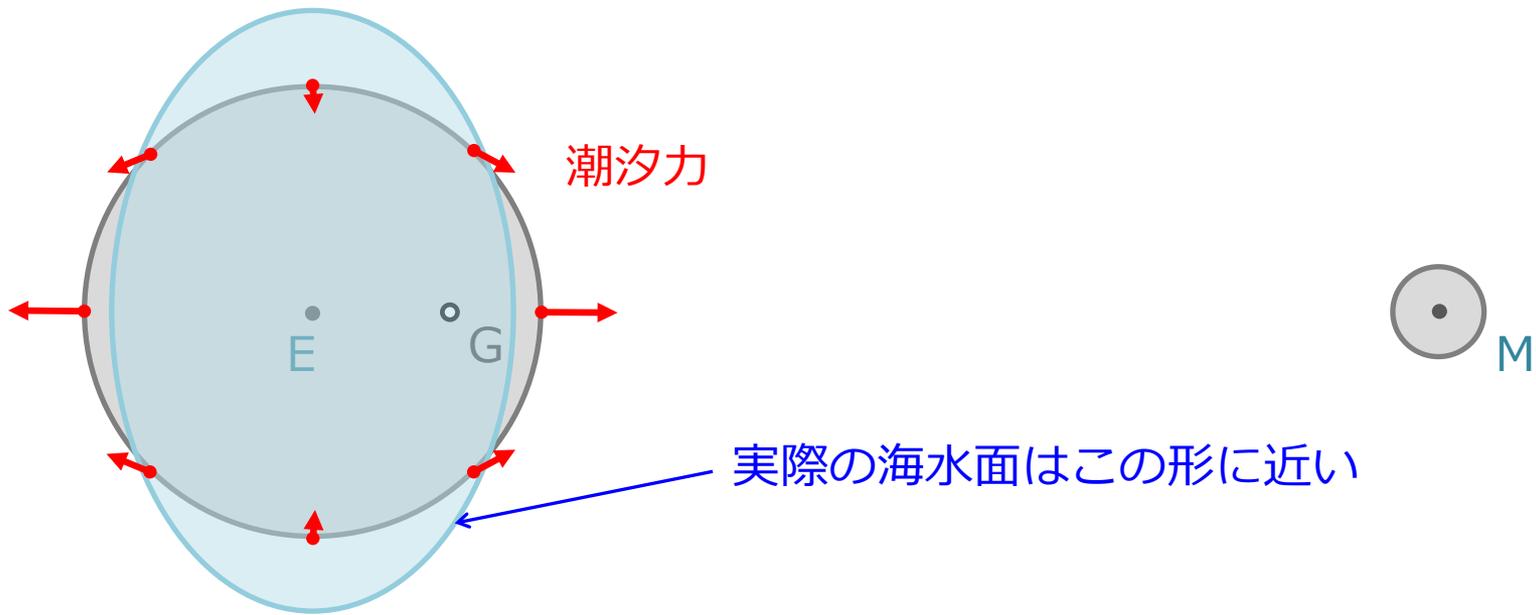
こういうことは予想できる

- 複雑な地形が海水の移動を妨げる効果はあるだろう。
- 地球は自転しているので、潮汐力が極大になる場所と、干満のピークが現れる場所は、ずれるかもしれない。



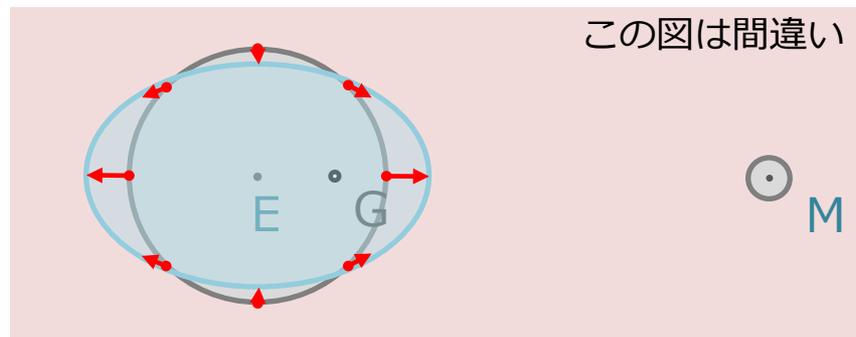
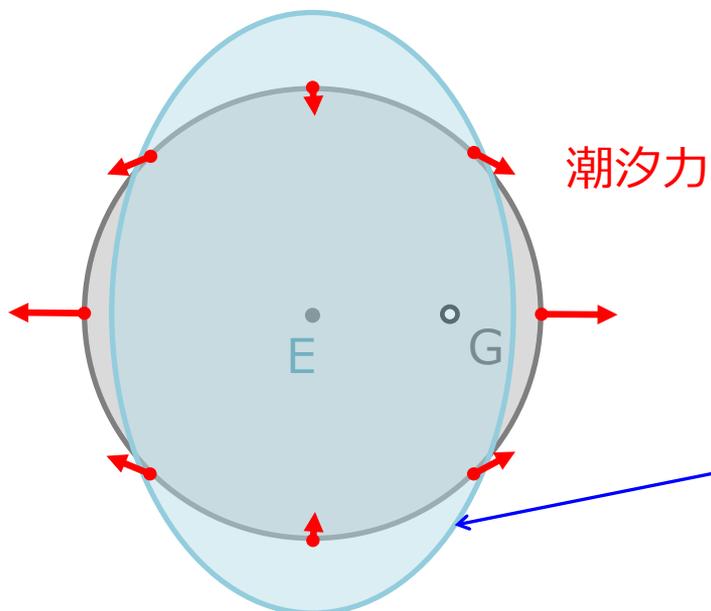
実際は・・・高知では

- 太平洋に面した港ではどうか？
- 2017年3月12日は満月だった。この日、高知市の港では、
- 6:12（潮位168cm）と 18:03（171cm）に満潮
- 23:48（2cm）と 12:06（39cm）に干潮
- 月が南中する時刻 0時付近に干潮になる。
- つまり、月が南の空に昇ると干潮、が正解。



どうしてこうなるの？

- 月が南中すると干潮、が正解。
- 潮汐力と、実際の潮汐は位相が逆転している。
- しかし、正しい図が描かれている解説書は、私が探した限り皆無であった。
- さて、どうしてこのようなずれが生ずるのか？



簡単なモデル

(これが今回の講演の中で唯一の谷村オリジナルの部分)

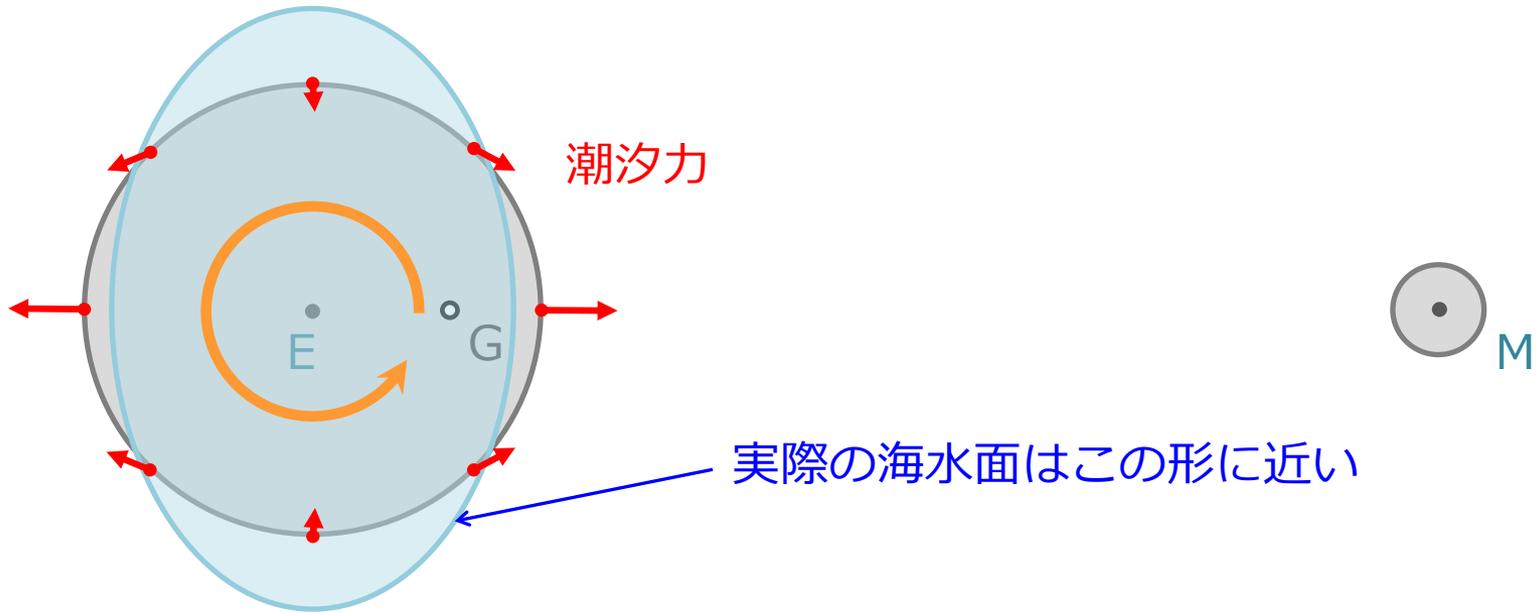
- 地球の自転を考慮
- 海面の上下運動だけが周期的外力で揺さぶられるというモデル：

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = f(t) = f_0 \cos \omega t$$

積分すると、

$$z(t) = -\frac{f_0}{m\omega^2} \cos \omega t$$

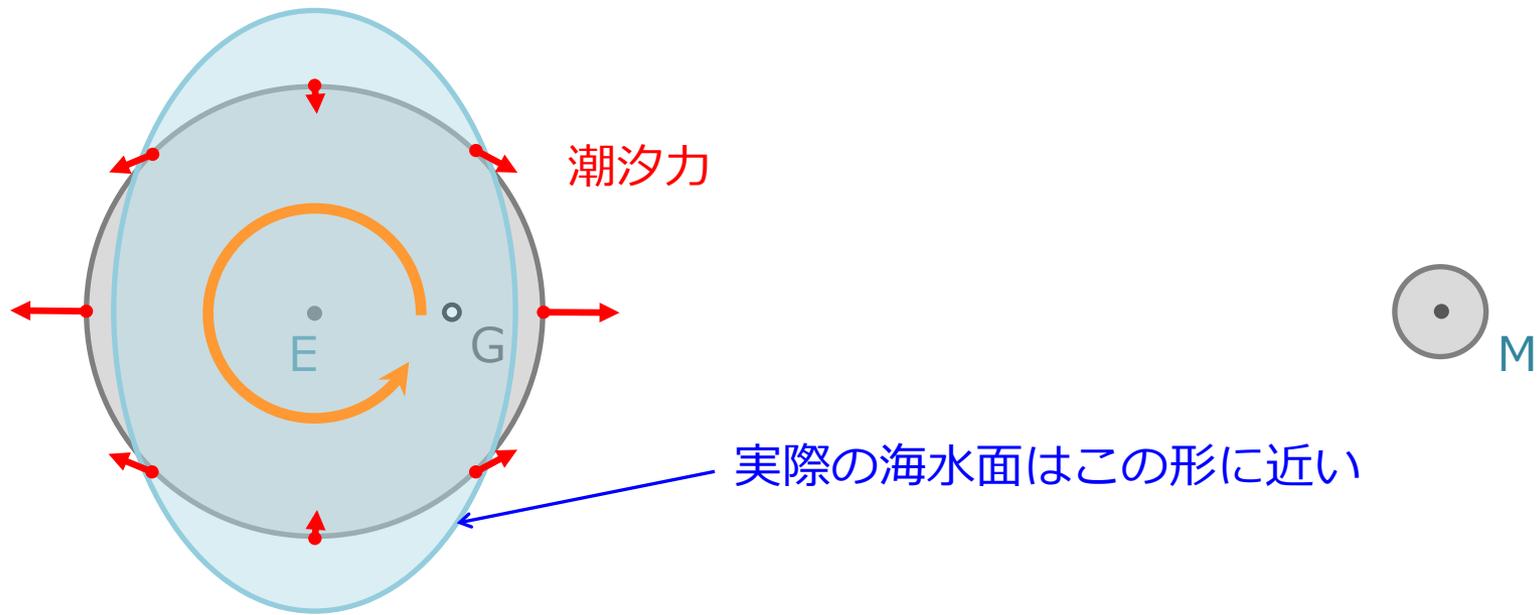
- 潮汐力と潮汐は位相が逆転。



現実には . . .

潮汐に影響する要因が多数ある：

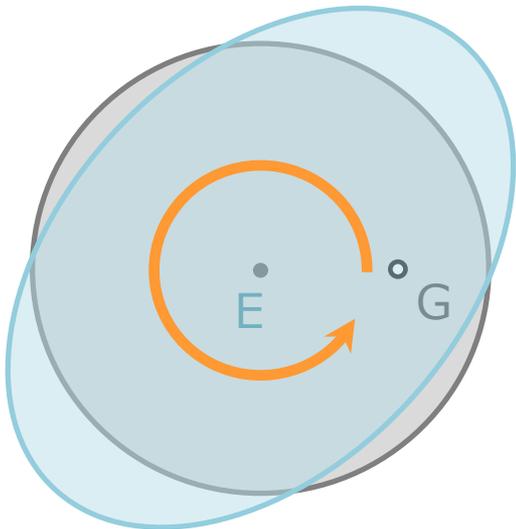
- 太陽の影響
- 地球の自転によるコリオリ力
- 海底の形、海岸線の形、海流、海水の鉛直方向の運動
- 月の公転面と地球の自転軸との傾き、楕円軌道
- 風、波浪、大気圧の変化、海水密度の非一様性 . . . など



ハワイでは

<http://tides.mobilegeographics.com/calendar/year/2602.html>

- 太平洋に浮かぶハワイ島ではどうか？
- 2017年3月12日は満月。この日、**ハワイ・オアフ島**では、
- 4:03（潮位1.8ft）と 16:29（1.3ft）に満潮
- 10:33（-0.1ft）と 22:18（0.0ft）に干潮
- 月が南中する時刻 0:00 よりも 4時間遅れて満潮になる！
- このしくみを明快に説明するのは難しい。



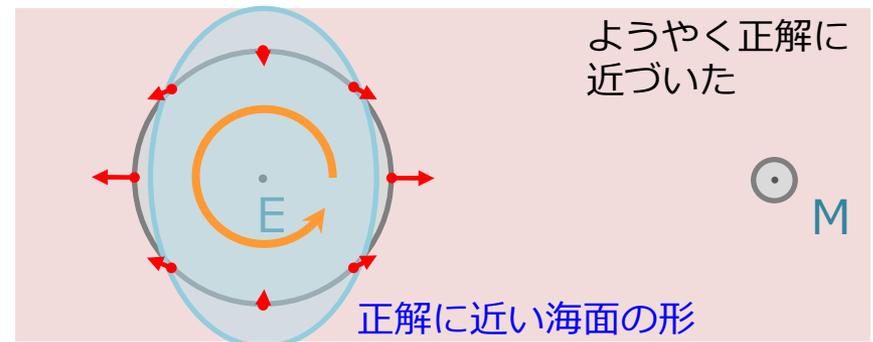
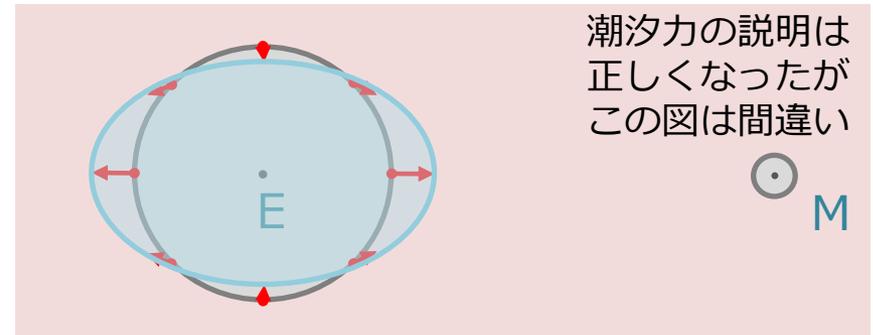
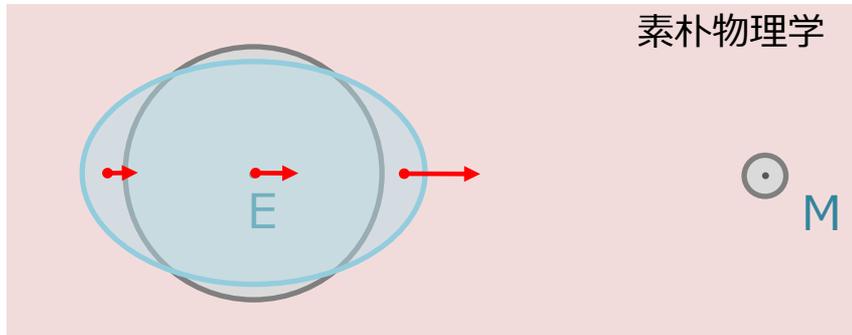
その他

- オホーツク海沿岸や日本海沿岸では干満の差は小さく、引き潮・満ち潮が1日に1回しか明確に観測できない場所・時期もある。
- 潮汐力と潮位とのずれは、水深にも依存している（浅いと逆位相、深いと同位相になる）。
- これらの原因は、地球物理的には説明がついている（永田・彦坂・宮崎『海洋物理Ⅲ』などを参照）。
- 惑星や衛星の内部にも潮汐力は及んでおり、天体内部のダイナミクスに大いに影響を与えている。



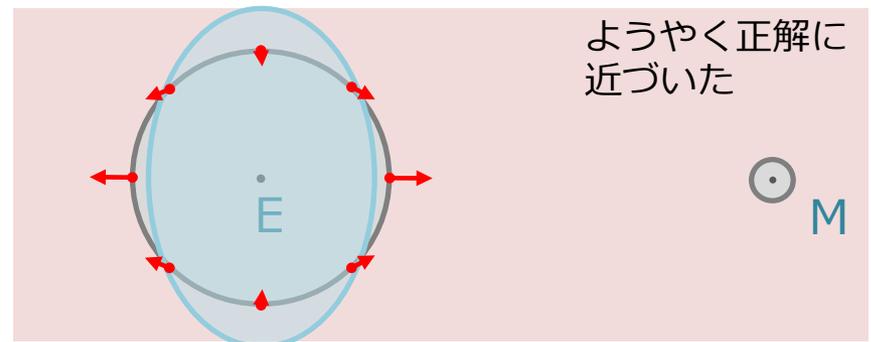
まとめ 1/2

- 素朴物理学は、正統派物理学者から見れば、笑いものであることがある。
- しかし、素朴物理学を正そうとする正統派物理学者の答えですら、完璧ではないことがあり、学習者を中途半端にわかったつもりにさせていることがある。



まとめ 2/2

- しかし、**真の正解はわかりやすくはないことがある**。とくに「絵解き」には限界がある。
- ちなみに松田卓也氏の論文『潮汐力と潮汐』は、**潮汐力と潮汐の区別をし、理論的な分析の対象を潮汐力に限定している**。
- 考え得ることが考えられていて、本質的な部分が絞りこまれていて、一貫性があるストーリーになっていて、しかも見落とししやすい事実をも気づかせてくれる説明が「よい説明」だと思われる。



参考文献

1. [松田卓也「ファインマンも間違った潮汐力」第二回科学交流セミナー, 2009年6月22日, 京都大学基礎物理学研究所](#)
2. [松田卓也「潮汐力と潮汐」日本流体力学会2009年予稿集](#)
3. 松田卓也『間違いだらけの物理学』学研教育出版 (2014)
4. 潮汐力と遠心力を巡るよくある誤解 ([基礎科学研究所 科学の散歩道](#))
5. S. Weinberg, "To Explain the World" Harper (2015)
6. ファインマン『物理法則はいかにして発見されたか』ダイヤモンド社(1968)
7. 潮汐のしくみ ([気象庁ウェブページ](#))
8. 潮位表 ([気象庁ウェブページ](#))
9. 中野猿人『潮汐学』 (古今書院) (1940)
10. 永田豊・彦坂繁雄・宮崎正衛『海洋物理Ⅲ』 (東海大学出版会) (1971)
11. [半田利弘「潮汐力は共通重心周りの遠心力で起こるのではない」 \(天文教育\)](#)
12. [樋山克明「潮汐と自転による天体の変形およびそれを用いた衛星の内部構造の推定について」 \(北海道大学\)](#)
13. [池田幸夫・酒井啓雄・古川博「高校地学教科書における潮汐現象の説明とその問題点」 \(科教研報\)](#)

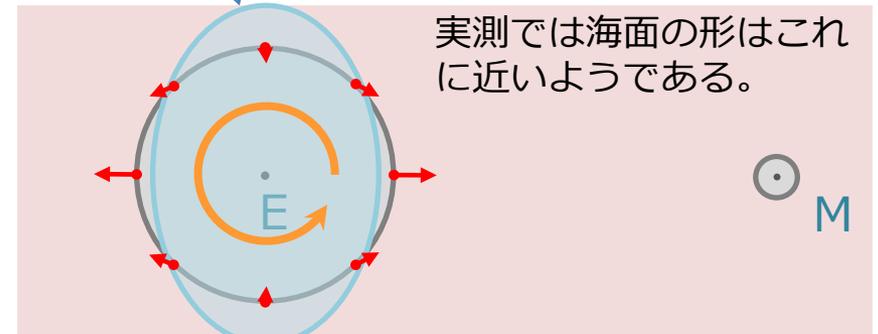
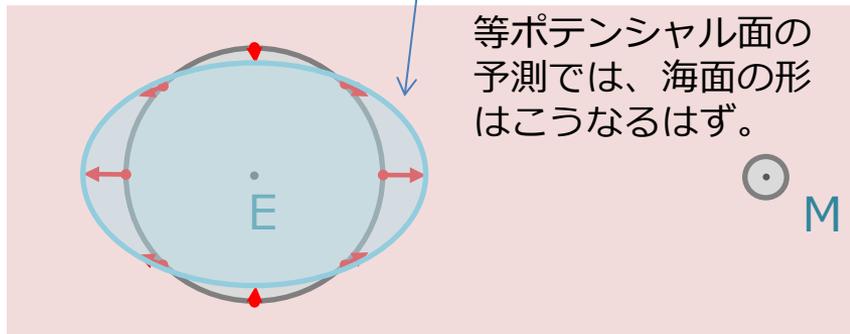
谷村の目から見て、間違いが目立たない (おそらく正しい) のは、8, 9, 10, 12, 13.

この講演に対して物理学会の会場で コメントをいただきました

- 齋藤嘉夫氏（立命館大学・サイ理研）

私はその問題を解いて2007年に講演した。計算は実測値ともぴったりに合っていた。
チャールズ=ダーウィンの息子も同様の分析を行っている。

その後、齋藤氏の論文を探させていただきました。私が見つけたのは「[よく分かる潮汐力の説明](#)」（[第22回物理教育研究大会予稿集](#)）という論文だけでしたが、これについてコメントさせていただきます。月・地球の静止系における重力と遠心力の有効ポテンシャルが定める等ポテンシャル面が、海面の平衡形と一致するだろうという平衡モデルは、たしかによく知られています。ただ、そうやって求めた等ポテンシャル面は、月に向かって張り出した形になります（松田卓也氏の2009年の論文(1-19)式を参照）。しかし、実測値は、むしろ、海水面は月に直角方向に張り出した形になっていることを示唆しています。



谷村の講演は、慣性による海水変位の遅れを考慮すれば、この形になることを示した。

この講演に対して物理学会の会場で コメントをいただきました

- 齋藤嘉夫氏（立命館大学・サイ理研）

私はその問題を解いて2007年に講演した。計算は実測値ともぴったり合っていた。
チャールズ=ダーウィンの息子も同様の分析を行っている。

齋藤氏の論文「[よく分かる潮汐力の説明](#)」（[第22回物理教育研究大会予稿集](#)）では、
「海面=等ポテンシャル面」とするモデルから求めた海面水位の予測値と、実測値とを
比較して、潮位の絶対値も波形もよく似ていたと評価なさっています。

しかし、私が問題にしたことは、月の南中時刻に対して6時間（4分の1日）ほどの位相
のずれも含めて予測値は実測値と一致するか、という点でした。論文中のグラフ（次
ページに掲げる）を見る限り、4分の1日の精度で予測値と実測値の位相が一致している
かどうかの判定は困難です。

齋藤氏の分析は、地球・月・太陽の三体を考慮しており、地球と月だけを考慮したモデル
よりも現実に近い構成になっていますが、静的な平衡モデルでは月と潮位の位相関係を
正しく再現できないという点が、今回の私の問題提起でした。

齋藤嘉夫「よく分かる潮汐力の説明」(第22回物理教育研究大会予稿集)よりコピー

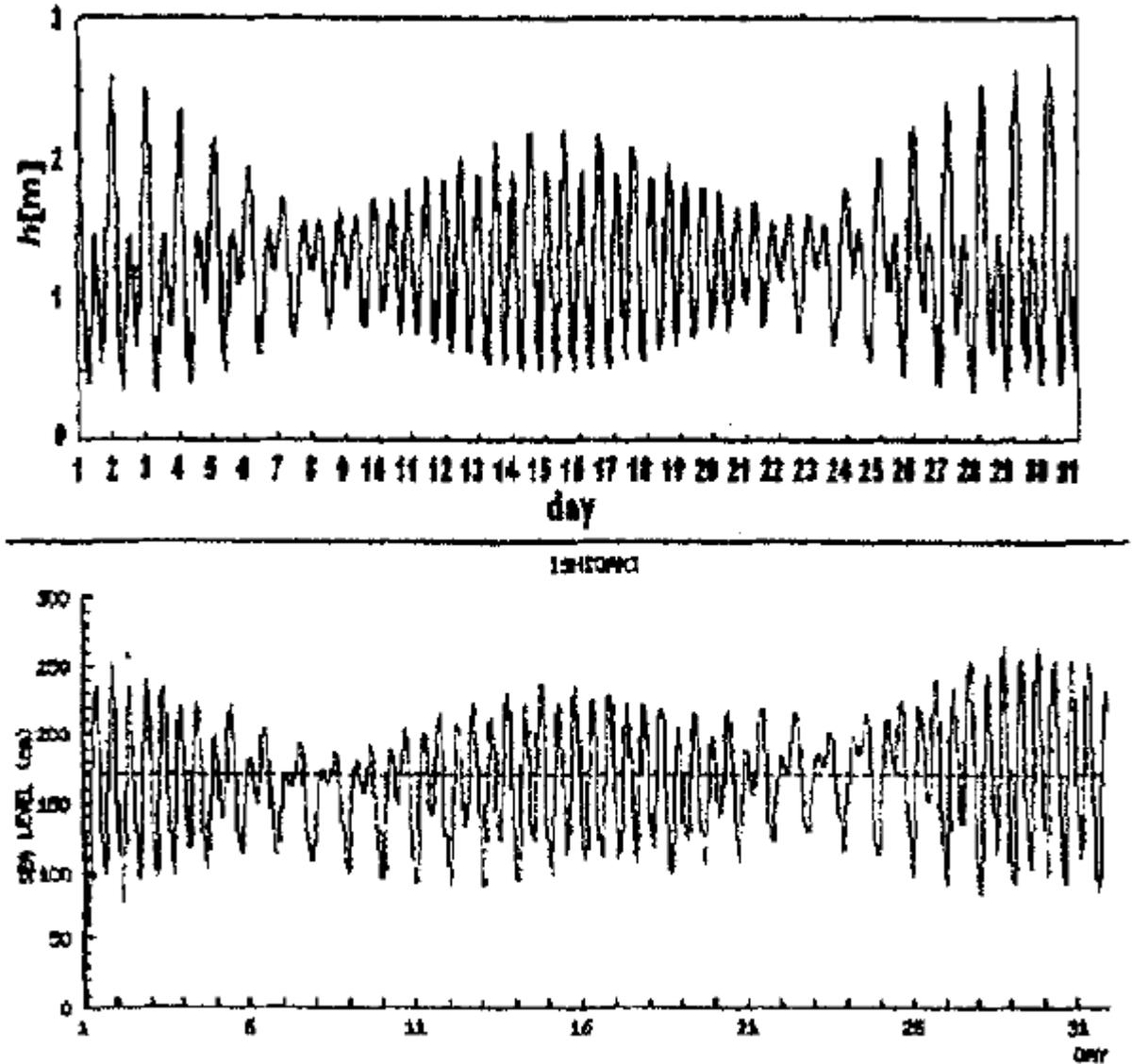


図 4: 潮位 ; 上 : 理論, 下 : 実測

この講演に対して物理学会の会場で コメントをいただきました

- 庄司善彦氏（兵庫県立大学・Spring-8）

地球の地盤も潮汐力によって毎日伸縮していて、Spring-8のビームは、加速器が設置されている岩盤の伸縮によって周長が変化します。そのことを考慮してビームを調整しなければならないのですが、最初は潮汐効果のモデルが間違っていて、正しく調整されませんでした。モデルを修正したら正しく調整できるようになったという経緯があります。そういう論文も出ていたと思います。いまでは、ビームラインの微妙な変化をいろいろなセンサーとして使うことも考えられています。

興味深い情報を教えていただきましてありがとうございます。[Takao, Shimada, "Long term variation of the circumference of the Spring-8 storage ring"](#) という論文を見つけた。ウェブに解説記事 [「月と太陽が播磨科学公園都市の岩盤も伸縮させている」](#) もありますね。

潮汐力による地盤の変形は、他の加速器やLIGOでも考慮されていると聞いたことがあります。地球だけでなく、木星の衛星などが潮汐力で変形され天体内部に摩擦熱が発生し火山活動が起きるなど、地質学的なダイナミクスが影響を受けていることも知られていますね。

加速器が環境変化の影響を受けやすいことを逆手にとって、加速器を鋭敏なセンサーとして利用しようという発想は見事だと思います。