海洋の潮汐

日に 1－2 回潮の満ち干があり、その干満の差が大きい時(大潮)と小さい時(小潮)があることはよく知られており、これらは潮汐により生ずる典型的な現象である。Fig 1 はサハリン島沖で係留系により観測された、海面水位と流速（南北成分）の 1.5 ヶ月間の時系列である。水位(Fig 1 a)、流速(Fig 1 b)とも、ほぼ 1 日の周期で変動していること、またその振幅がおよそ半月周期で変動していること、これらの変動はかなり規則正しいこと、などが見てとれる。満月・新月のときに潮汐・潮流が大きくなる傾向もわかる。

何故潮汐が起るかということを初めて明らかにしたのは、あの有名なアイザック・ニュートン（Isaac Newton, 1642～1727 年）である。彼は「すべての物体はその質量の積に比例し、お互いの距離の二乗に反比例するような力で引きあっている。」という万有引力の法則を発見した。彼はこの法則の応用例の一つとして潮汐現象を説明したのである。

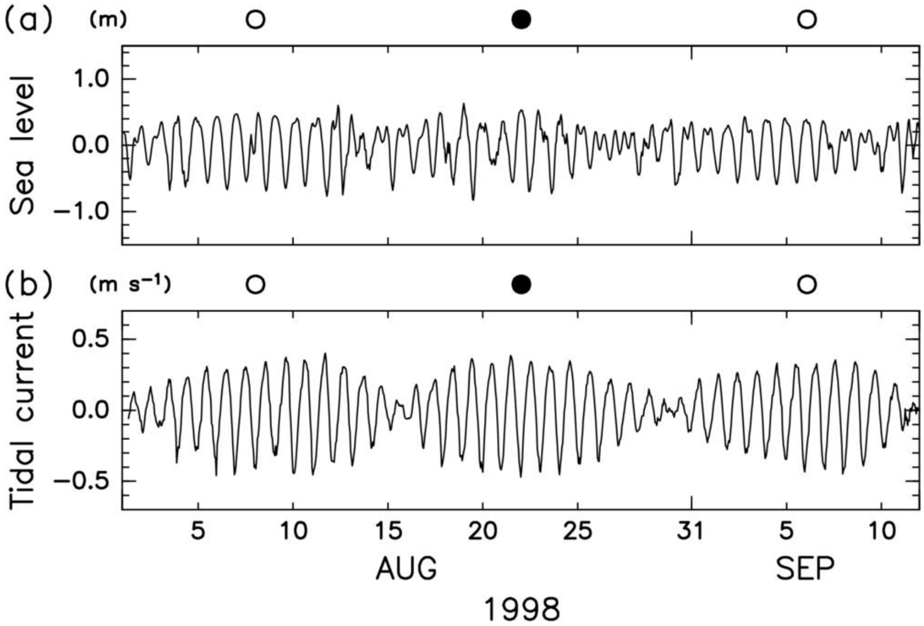

Fig　1：サハリン島東岸沖の(a)潮位と(b)潮流の南北成分。 ○は満月、●は新月。
Ono et al.(2008)より加筆。

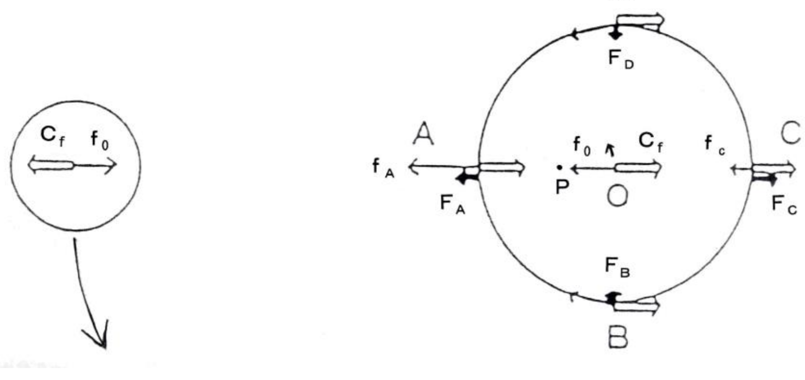

Fig　2：引力(f_0・f_A・f_C)と遠心力(Cf：白矢印)と起潮力(F_A・F_B・F_C・F_D)。
O は地球の中心、P は地球と月の共通重心を表す。P は地球の内部に位置する。

まず地球と月の関係を考えてみる。地球と月もニュートンの発見した万有引力によってお互いに引きあっている。それでは何故月はリンゴのように地球に落ちてこないのか。それは今地球の中心の単位質量を考えると、月の引力（Fig２のf_0）は月と地球がその共通重心Ｐのまわりを回るための遠心力（Fig２の C_f: 白矢印）とつりあっているからである。この遠心力は地球のあらゆる点で同じように働いている。一方、月の引力は地球上の各点までの距離の二乗に反比例するので、Fig２で月に近いＡ点の方が地球の中心のＯ点よりも引力は大きくなる（$f_A > f_0$)。今f_0はC_f とつりあっているので、Ａ点では$f_A > C_f$ となり、Ａ点の単位質量には地球の中心から外に向うようなF_Aという力が働く。同様に考えると、Ｃ点では$f_C < C_f$ となり、同じく地球の中心から外側に向くF_Cが、Ｂ点とＤ点では合力として地球の中心に向うF_B・F_Dという力が生じることになる。このF_A・F_B・F_C・F_Dが潮汐を起す起潮力と呼ばれる力である。

ここで、Ａ点の単位質量に働く起潮力の大きさF_Aを計算してみる。まずC_f はＯ点での引力f_0に等しいので、

$$C_f = f_0 = G \cdot M / R^2 \quad 。 \qquad (1)$$

ここで、Ｇは万有引力定数、Ｍは月の質量、Ｒは地球の中心と月の中心間の距離を表す。一方f_Aは、

$$f_A = G \cdot M / (R - e)^2 \qquad (2)$$

で表わせる。ここで、ｅは地球の半径を表す。従って、起潮力F_Aは

$$\begin{aligned} F_A &= f_A - C_f \\ &= G\{M/(R-e)^2 - M/R^2\} \\ &\fallingdotseq 2GMe/R^3 \qquad (3) \end{aligned}$$

となる。万有引力定数Ｇは我々が地球の中心に引きつけられている重力ｇによって

$$g = G \cdot E / e^2 \qquad (4)$$

のように表わせる。ここでＥは地球の質量を表わす。　結局F_Aは

$$F_A = 2g(e/R)^3 \cdot (M/E) \qquad (5)$$

となる。

ここで式（５）に地球の半径と地球－月間の距離の比（$e/R \fallingdotseq 1/60.3$)、月と地球の質量比（$M/E \fallingdotseq 1/81.3$）を代入すると、$F_A = 1.12 \times 10^{-7} \times g$ となる。つまり月の起潮力の大きさは我々が地球中心に引きつけられている重力のわずか１千万分の１の大きさにすぎない。同様な計算を行えば、Ｃ点ではF_Aと同じ大きさで逆向きの、Ｂ点とＤ点ではF_Aの半分の大きさで地球の中心に向う起潮力が存在することがわかる。

今地球の表面が一様な厚さの海水に覆われ一様な重力が働いていると、海面は球形になる。ここで起潮力が働くと、月の真下（Ａ点）とその反対側（Ｃ点）では海面が膨らみ、月を水平線上に見る点（Ｂ、Ｄ点）では海面がへこみ、海面の形は、ラグビーボールのような形、回転楕円体となる(Fig３)。このような海面を平衡海面と呼ぶ。平衡海面を詳しく計算すると、一番ふくらんだ所（Ａ、Ｃ点）で 35.7 cm、一番へこんだ所（Ｂ、Ｄ点）で－17.9 cm となる。ここで地球の自転を考えて、私達が一日のうちに Fig３のＡ・Ｂ・Ｃ・Ｄ各点を通りすぎるとすると、一日に二回の満潮と二回の干潮を経験して、その干満差は 53.6 cm となることがわかる。

今までは月の起潮力だけを考えてきたが、太陽によっても同様にして起潮力が働く。太陽は月よりもはるかに大きい質量を持っているが、遠くにあるためその起潮力の大きさは月の半分位になる。実際、式（５）に太陽と地球の質量比（$S/E=3.33\times10^5$）、地球の半径と地球－太陽間の距離の比（$e/R_S=1/2.35\times10^4$）を代入すると $F_A=5.15\times10^{-6}g$ となり、月のそれの 0.46 倍にしかならないことがわかる。また太陽の起潮力による平衡海面の干満差も 26.7 cm となり月によるそれの約半分となる。月と太陽両方の起潮力に加え、地球の自転軸が傾いていることなどにより、半日だけでなく、一日、さらに他の周期の潮汐成分も生ずることになる。

満月や新月の満潮の方が上弦や下弦の満潮より高く､干満差も満月や新月の方が大きくなる(Fig１)。このことは月による平衡海面と太陽による平衡海面の重ね合わせとして理解できる。Fig４の上段に示すように満月や新月の時は太陽と月と地球がほぼ直線に並ぶ。したがって満潮の高さはより高く、干潮の高さはより低く、ゆえに干満差も大きくなる。一方上弦や下弦の時は、Fig４の下段に示すように太陽と地球と月はほぼ直角を為すため、月と太陽による平衡海面が打ち消しあって、満潮の高さは低く干満差も小さくなる。満月や新月の頃の潮の状態を大潮、上弦や下弦の頃の潮の状態を小潮と言う。

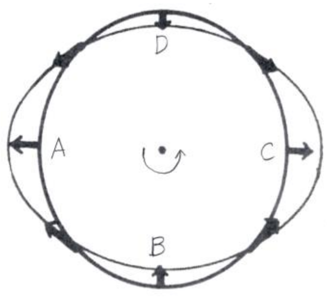

Fig３:起潮力により変形を受け、回転楕円形となる平衡海面。

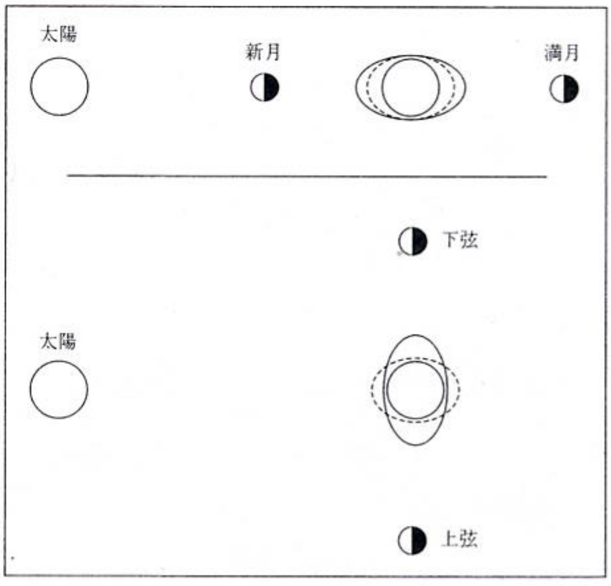

Fig４ ：大潮（上段）と小潮（下段）の時の月の起潮力による平衡海面（実線）と太陽の起潮力による平衡海面（破線）