

強制振動仮説と潮汐バーストの概念

池田 幸夫*

A Forced Oscillation Hypothesis and the Concept of Tide Burst

IKEDA Yukio*

(Received September 27, 2019)

ABSTRACT

A tide generating force has two dynamic properties. One of them is a property as a vector with magnitude and direction, the other is a periodicity of force acting with a cycle of about 12 hours. When an object receives a periodical external force, the object certainly vibrates. This vibration is referred to as **forced oscillation** in physics. So, from the perspective of physics, it is very rational to consider that tides are the forced oscillation movements of the ocean caused by the periodicity of tide generating force.

Applying the theory of forced oscillation to the tidal phenomena, the tides of the ocean can be classified into three types of movements according to the depth of the sea. When the depth is shallower than 22,000m, the tidal response of the ocean must be **"out of phase"** with the tidal force, and when deeper than 22,000m, it must be **"in phase"**. Further, when the depth will be equal to 22,000m, the tidal response of the ocean must be **"resonance"**. Therefore, the amplitude of tide becomes infinite in scale. In this paper, this kind of extremely huge scale of tide, predicted theoretically, is called **"tide burst"**. Some scientific meanings of the concept of tide burst, especially in relation to Earth science and astronomy, will be discussed in detail.

キーワード 潮汐, 地球潮汐, 強制振動仮説, 潮汐バースト, 起潮力

1 問題の所在

起潮力には2つの力学的要素がある。ベクトルとしての力(大きさと向き)と約12時間周期で作用する周期性である。起潮力を力学的に解明したニュートン以来,前者に関する研究は圧倒的に多いが,周期性に着目した研究は極めて少ない。高校地学教科書や科学啓蒙書などに見られる潮汐の説明は前者に属し,通説として世界中に広く浸透している。

例えば,気象庁のウェブページ「潮汐の仕組み」(気象庁,2019)では,次のように説明されている。

起潮力が地球を引き伸ばすように働くと,潮位の高いところと低いところができます。潮位が上がりきった状態が「満潮」,反対に下がりきった状態が「干潮」です。

この説明は,干潮と満潮が1日に2回起こることや大潮や小潮が周期的に起こることを説明できるが,月の南中と満潮との時間的なずれについては合理的な説明ができない。例えば,日本の太平洋沿岸では月の南中から約6時間も遅れて満潮になることについては,海水の反応の遅れや複雑な海洋地形の影響による「遅れ」と見なされてきた。ニュートン自身も,この事実についてはよく認識していたようである(河辺,1973)。

時枝(T. Tokieda)は,理論と観測事実との食い違いを「潮汐のパラドックス」と呼び,このパラドックスは強制振動(Forced Oscillation)によって解消される可能性を示唆している(Tokieda,2013)。

潮汐を強制振動現象と見るアイデアは,ニュートン以来の通説とは両立しない考え方である。このアイデアを最初に提唱した研究者は福住靖治である(福住,2001)。彼は起潮力を周期関数で表した運動方程式を

* 山口大学教育学部名誉教授

立てて、その解が強制振動の式になることを示し、潮汐と起潮力との逆位相の関係を理論的に明らかにした。また、流体力学の専門家である中野徹は、中央大学の講義用テキストとしてウェブページに公開している「力学1講義ノート」の中で、強制振動の具体的事例として潮汐を取り上げて理論的に論じている（中野，2008）。筆者自身は、2012年に講談社ブルーバックスシリーズ（B-1613）の第2版で、潮汐を強制振動によって解説したことがある（池田，2012）。

強制振動の最も重要な特性は、物体がもつ固有振動数に等しい振動数で外力が作用したとき、共振または共鳴とよばれる激しい現象が起こることである。潮汐現象が強制振動であれば、この条件が満たされたとき共振による巨大潮汐が発生するはずである。私は、理論的に予想できるこの巨大潮汐を**潮汐バースト**（Tide Burst）と呼んで、2018年度の日本物理教育学会全国大会において、その科学的意義について論じた（池田，2018）。本稿では、これに新たな考察を加えて、強制振動仮説の概要とその科学的意義について考察する。

2 強制振動仮説

一般に、強制振動における変位 x は、次のような形で表されている（金原，1976）。

$$x = \frac{C}{f_0^2 - f^2} \cos(2\pi f t)$$

ここに f_0 は物体の固有振動数、 f は外力の振動数、 t は時間、 C は外力の大きさや物体の質量などによって決まる定数である。分母が $(f_0^2 - f^2)$ になることから、 f_0 と f との大小関係によって、強制振動は次のように3つのタイプに区別することができる。

I $f < f_0$: 外力と同じ振動数で同じ向きに振動

（同位相の振動）

II $f = f_0$: 振幅が無限大（共振）

III $f > f_0$: 外力と同じ振動数で逆向きに振動

（逆位相の振動）

では、強制振動の理論を潮汐現象に適用してみよう。問題を単純化するために、地球全体が水深5000mの海で一様に覆われ、南北の流れやコリオリの力などの影響を考えない仮想地球を想定する。

起潮力は月が南中している地点とその反対側で最大となるので、地球の自転によって起潮力は約半日の周期で作用する。これを1日当たりの振動数に換算すると約2.0である ($f=2.0$)。一方、海洋の固有振動数については、共振理論に基づいた古賀らの研究がある（古賀他，1991）。彼らは、水深5000mの一様な海に覆われ、コリオリの力を考慮しないという条件のもとで海洋の固

有周期を理論的に求めた。その結果、南北の振動モード (n) によるいくつかの固有周期の中で、最も重要な固有周期は $n=1$ における35.5時間であることを示した。1日当たりの振動数に換算すると、 $f_0=0.67$ である。

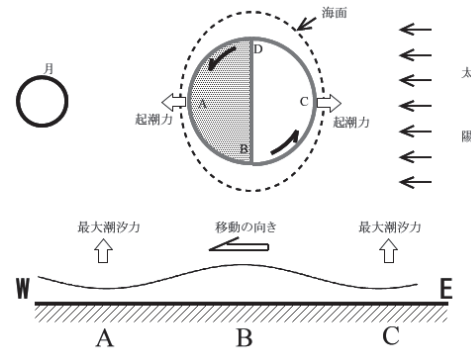


図1 強制振動仮説による月と潮汐との関係

下図は満月の日の潮汐を平面図に表したものである。月と潮汐の逆位相の関係を示す。

以上の考察から、外力（起潮力）の振動数 f と海洋の固有振動数 f_0 との関係は $f > f_0$ である。したがって、水深5000mの海洋で覆われた仮想地球における潮汐は、上述のタイプIII、すなわち逆位相の振動となる。

起潮力と潮汐との逆位相の関係は、図1に模式的に表されている。この関係は、気象庁や地学教科書などで見られる説明（同位相）とは完全に逆であることに注目して頂きたい。強制振動仮説によれば、日本の太平洋沿岸で見られる6時間のずれは、海水の反応の遅れや地形や水深などによる遅れではなく、力学的に起こる必然的な結果と考えることができる。

3 潮汐バースト

強制振動においては、外力の振動数が物体の固有振動数に一致すれば振幅が無限大になり、物体は大きく振動する。共振と呼ばれているこの振動は、強制振動における最も重要な特徴の一つである。

潮汐が強制振動であるとすれば、起潮力の振動数と海洋の固有振動数が一致した場合には、共振による巨大な潮汐が起こることになる。この巨大潮汐については、すでに福住（2001）や中野（2008）によって指摘されている。本稿ではこれを**潮汐バースト**と命名して、その科学的意義について考察する。

潮汐バーストが起こる条件は $f_0 = f$ である。波長 λ 、振動数 f 、速度 v の間には $v = \lambda f$ の関係がある。この関係を用いると、共振の発生条件を v で表すことができる。

起潮力は月に面した側とその反対側で最大となることから、地球の半径を R とすると、その波長 λ は地球の半

周 πR に等しいので、起潮力の振動数 f は、

$$f = v / \lambda = v / (\pi R) \quad \dots\dots ①$$

と表すことができる。最大起潮力の位置は、地球の自転によって東から西に移動するので、地球の円周を40000 km とすると、赤道上における起潮力の移動速度 v は毎秒約460mである。

一方、仮想地球における潮汐は月に面した側とその反対側で満潮となるので、潮汐波の波長 λ_0 は地球の半周 πR に等しい。したがって、潮汐波の速度を v_0 と振動数 f_0 との関係は、

$$f_0 = v_0 / \lambda_0 = v_0 / (\pi R) \quad \dots\dots ②$$

である。①と②から共振の条件を速度で表すと $v = v_0$ となる。

潮汐波は水深に比べて波長が長い浅海波である。浅海波の速度は水深 h と重力加速度 g の積の平方根に等しいので、 $v_0 = \sqrt{gh}$ でなければならない。 $v_0 = v$ のときに共振が起こることから、

$$v_0 = \sqrt{gh} = 460\text{m/s}$$

とおいて h について解くと、 $h \approx 22000\text{m}$ が得られる。すなわち、仮想地球の潮汐バーストは、水深が22000m のときに発生することになる。

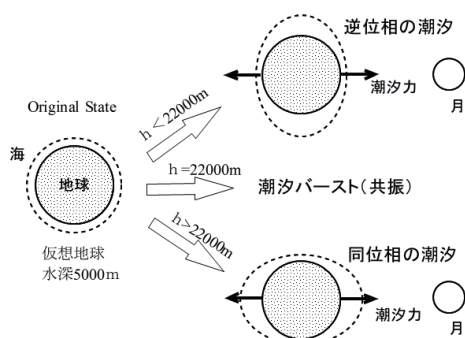


図2 水深 (h) による潮汐の分類

以上の考察より、仮想地球における潮汐は水深によって、図3に示されているような3つの型に分類することができる。すなわち、22000mより浅い場合には現在と同じ逆位相の潮汐が、22000mより深い場合には同位相の潮汐が発生し、水深22000mの場合に共振による潮汐バーストが発生するのである。現在の海洋の平均水深は約5000mであるので、海洋潮汐は逆位相の潮汐となるのである。

海洋だけでなく固体地球自体にも潮汐はおこる。固体地球の潮汐は**地球潮汐**とよばれている。海洋潮汐と違って、固体地球を伝わる潮汐波の速度が大きいため、地

球潮汐は同位相の潮汐である。

地球の海洋の平均水深は約5000m、最も深いマリアナ海溝でも10911mである。この事実から、海洋の水深が22000mまで深くなることは現実的にはありえない。したがって、水深の増加による潮汐バーストが起こることはない。

これに対して、自転周期の変化によって起こる潮汐バーストは科学的に極めて興味深い現象である。自転周期が変化すれば、起潮力の振動数 f が変化して潮汐バーストが起こる可能性が生まれるからである。

起潮力の振動数 f は地球の自転周期によって決まる。「地球の物理学事典」によると、潮汐摩擦などの影響によって、地球の自転周期は100年間に約0.0024秒ずつ遅くなっている (Stacey et al. 2013)。図3の直線はこの値を用いて推定した、地球の歴史における自転周期の変化を表すグラフである。この直線を太陽系誕生の46億年前まで内挿すると、誕生直後の原始地球は極めて高速で自転していたことになる。

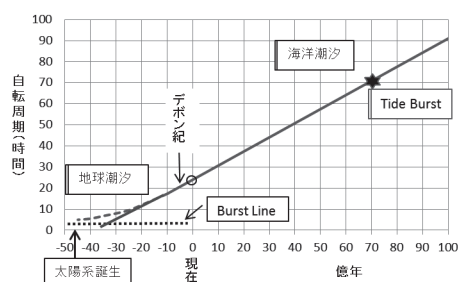


図3 潮汐摩擦による自転周期の遅れ

破線は強制振動仮説から推定した原始地球の自転周期を表す。図中の破線は潮汐バーストを考慮して推定した自周期を示す。

50年ほど前に、スクルートン (Scrutton, C. T.) は保存状態のよいデボン紀のサンゴ化石に残る日輪の数を測定して、当時の1年は13月 (約400日) であることを示した (Scrutton, 1964)。1年の長さに変化がないと仮定すれば、デボン紀の1日は約22時間、現在よりも2時間ほど短かったことになる。デボン紀は約4億年前の地質時代であるので、この結果を図3にプロットすると、潮汐摩擦から推定した自転の遅れとほとんど矛盾しないことが分かる。この事実は、図3のグラフには一定の信頼性があることを保証している。

古賀他 (1991) が推定したように、海洋の固有振動周期は約35.5時間である。この値を引用すると、地球の自転周期が71時間のときに起潮力の周期が35.5時間となって、潮汐バーストが発生することになる。図3の直線から、海洋の潮汐バーストは約70億年後に起こると推定できる。ただし、70億年後の太陽は主系列星から赤色巨星に進化している可能性が高く、実際に潮汐バースト

が起こるかどうかは別の問題である。

これに対して、太陽系誕生直後における原始地球の潮汐バーストは、地球科学的にはより興味深い課題である。巨大地震が発生すると、その後数ヶ月にわたって地球全体が振動することが知られている。これは**地球自由振動**と呼ばれている。地球自由振動にはいくつかのモードがあるが、最も重要な周期は約54分である(Stacey et al., 2013)。この値を地球の固有周期とすれば、自転周期が108分(起潮力の周期は54分)のときに固体地球の潮汐バーストが発生することになる。図3のburst lineは、固体地球で潮汐バーストが発生する自転周期を示すグラフ上の直線である。

固体地球が潮汐バーストを起こせば、地球は爆発的に崩壊するであろう。地球が崩壊することなく現在まで生き残っている事実は、原始地球の自転周期が2時間よりは長かったことを示している。

潮汐に関係した天体崩壊のメカニズムとして、**ロッシュの限界**がよく知られている。ロッシュの限界とは、ある天体が大きな天体に接近したとき、これ以上近づけば起潮力によって天体自体が崩壊する限界距離のことである。「地球の物理学事典」によれば、月と地球におけるロッシュの限界は地球半径の2~3倍であると考えられている(Stacey et al., 2013)。

ロッシュの限界によって天体崩壊が起こるためには、天体の大接近が必要である。これに対して、潮汐バーストによる天体崩壊は天体の大接近を必ずしも必要としない。中心星から離れていても、約2時間の周期で高速自転する原始惑星は潮汐バーストによって崩壊する可能性があるからである。もし、太陽系誕生直後の原始惑星の中に2時間より短い周期で高速自転する惑星があったとすれば、潮汐バーストによって崩壊した可能性がある。以上のように、潮汐バーストの概念は天体崩壊のメカニズムの一つとして検討すべき新しい課題を提供している。

4 おわりに

強制振動仮説の導入によって得られた重要な結論は次の3点である。

(1) 海洋潮汐は水深 h によって、次のような3つのタイプに分類できる。

① $h < 22000\text{m}$: 逆位相の潮汐

② $h = 22000\text{m}$: 共振(潮汐バースト)

③ $h > 22000\text{m}$: 同位相の潮汐

海洋の平均水深は約5000mであるので、海洋潮汐は①の逆位相である。また、潮汐波の速度が大きい地球潮汐は②の同位相の潮汐となる。

(2) 自転周期の遅れから推定すると、約70億年後に自転周期が約71時間となって、海洋の潮汐バーストが

発生する。

(3) 自転周期が2時間以下の原始惑星は潮汐バーストによって崩壊した可能性がある。

強制振動仮説は、ニュートン以来広く信じられている潮汐論とは両立しない仮説である。そのため、その仮説は広く認められている理論と整合性がないので科学的意義はないと見なされることがある。しかしこの主張は必ずしも正しくはない。著名な相対主義科学哲学者ファイヤーアーベントが指摘しているように、よく確立された理論と矛盾する仮説は、他のどんな方法によっても得られない証拠をわれわれに提供する(ファイヤーアーベント, 1983)からである。彼が指摘しているように、本稿で提唱した水深による潮汐の分類や潮汐バーストの概念が通説から生まれることはない。通説と対立する強制振動仮説によって初めて明らかになる概念なのである。

本稿では、一様な水深の海で覆われた仮想地球の潮汐を論じた。現実の海洋はいくつかの大陸に分断された複雑な形態をもち、水深も一定ではない。そのため、実際に観測される潮汐は極めて複雑な様相を呈している。気象庁が発表している潮汐予報では、観測地点ごとの水位の変化を単純な波に分けて、これらを数学的に合成することによって、各地点ごとの潮汐をかなり正確に予測することができる。近年は人工衛星による海水面の観測精度が格段に上昇し、分潮という方法を用いた精度の高い数学的モデルが公表されている(例えば、松本(2004)など)。最後に、実際の観測データから導かれた数学的モデルと強制振動仮説との関係について、私見を述べておく。

本稿の目的は、潮汐の力学的原理を明らかにすることである。そのために、仮想地球という極めて単純なモデルについて考察を行った。一方、数学的モデルは精度の高い潮汐を予測することが主たる目的であり、必ずしも力学的原理を明示しているわけではない。

強制振動仮説は潮汐を「強制振動」という力学的原理で説明しているが、現段階では極めて複雑な実際の潮汐現象を完全に説明できるわけではない。私は、強制振動仮説の信頼性を高めるためには、有限な形と広がりをもった海洋に対する強制振動の特性を理論的に解明しなければならぬと考えている。有限な広がりと深さをもつ海洋の強制振動特性が明らかになれば、少なくとも太平洋、大西洋およびインド洋という三大海洋で発生している実際の潮汐との対比や数学的モデルとの対比が可能になるからである。この小論が潮汐に対する研究者の興味関心を高める契機となり、潮汐研究が進展することを期待している。

謝辞 本研究は、2018年度山口大学基金の「名誉教授

による研究プロジェクトに対する助成事業」の支援によって行われている。強制振動仮説は、教育学部の元教授古川浩先生（山口大学教育学部名誉教授）から頂いたアドバイスがきっかけとなった。また同学部の重松宏武教授には、本誌への投稿に関して様々な助言を頂いた。本研究に支援をして頂いた山口大学の教職員の皆様に、心から感謝の意を表します。

引用文献

- 池田幸夫（2012），「科学・考えもしなかった41の素朴な疑問」第2版，松森靖夫編著，講談社。
- 池田幸夫（2018），第365回 物理教育研究大会予稿集，「強制振動仮説における潮汐バーストの概念とその意義」．日本物理教育学会。
- 宇野木早苗・久保田雅久（2007），「海洋の波と流れの科学」，東海大学出版会。
- 金原寿郎（1976），「基礎物理学（上巻）」，裳華房。
- 河辺六郎編訳（1973），「世界の名著 ニュートン」，中央公論社。
- 気象庁（2018a），「潮汐の説明」
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/knowledge/tide/choseki.html>．
- 気象庁（2018b），「潮汐観測資料」
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>．
- 古賀雅夫・松島 晟・武政剛弘（1991），長崎大学教養部紀要（自然科学編），32巻，1号，1-5，「海の潮汐について」．
- Scrutton, C. T.（1964），*Palaeontology*, vol.7, 552 – 558, “Periodicity in Devonian Coral Growth”.
- Stacey, F. D. and Davis, Paul M.（2013），「地球の物理学事典（本多了代表訳）」，朝倉書店。
- Tokieda, T.（2013），“Tides: A Tutorial”. In Souchay, J., Mathis, S. and Tokieda, T. (eds), *Tides in Astronomy and Astrophysics*, Springer.
- 中野徹（2008），「力学 I 講義ノート」，
<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/nakano/rikigaku/sec6.pdf>．
- ファイヤーアーベント, P. K.（1983），「方法への挑戦（村上陽一郎訳）」，新曜社。
- 福住靖治（2001），物理教育，49巻，4号，353-357，「起潮力と潮汐運動」．
- 松本晃治（2004），測地学会誌，第50巻，3号，187-200，「海洋潮汐モデルNAO，99bの構築と普及」．