

## 非同期回転がイオの火山分布をコントロールする?

### Nonsynchronous rotation as a possible factor of the hot-spot distribution on Jupiter's moon Io

山路 敦\*  
Atsushi Yamaji\*

**Abstract:** Volcanic hot spots on Io tend to make chains with about 120-km intervals. Many of these chains have concordant trends with the stress trajectories that would be induced by the westward secular migration of tidal bulges driven by the nonsynchronicity of Io's rotation and orbitation. This suggests that the volcanic chains are formed along fissures of the lithosphere whose azimuths are controlled by orbital dynamics. The thickness of the surface brittle layer would determine the intervals between fissures.

#### はじめに

衛星イオにはおおくのホットスポット火山があるが、それらは定義のうえで地球のホットスポットとはちがう(藤井, 1986; 川上, 1989). 地球の場合は成因的なイメージがさきにあるわけだが、イオの場合は赤外域の観測でとらえられる文字どおり高温の地点ということである。高温の地点は探査機ボイジャーが撮った画像から、火山地形と対応することがしめされ、画像のなかで火山地形として認識されるものが実際に火山であることが証明された(McEwen et al., 1986).

もはや熱くはない火山をふくめて、McEwenらは合計88の火山を同定した。それらは地球でいえば第四紀火山のようなもので、最近のテクトニクスが分布を規定していると思ってよい。

その理由は、火山噴出物の堆積速度がおおきいことにある。堆積速度は幾つかの方法で推定されているが(川上, 1989), いずれにせよ一旦死火山になると、数百万年で埋積されてしまう筈で、今みえる火山は地質学的最近につくられたものである。

イオの火山活動の原因はよく知られているように潮汐作用である。衛星は惑星からうける潮汐力によって3軸楕円体になっていて、惑星にちかづくほど軸比がおおきくなる。これを潮汐楕円体(tidal ellipsoid)という。楕円軌道をまわるイオの公転周期は約1.8日で、それにあわせて衛星が変形し、衛星内部の粘性のために発熱するわけである。潮汐発熱のパワーをしらべていたPealeたちはイオの場合それだけでマントルが熔融するほど熱くなることに気づいた。そしてボイジャーが発見する数週間まえに火山活

1992年4月17日受付。1992年7月3日受理。  
\*東北大学教養部地学科。〒980 仙台市川内

動の存在を予言した(Peale et al., 1979). 衛星の固体部分のテクトニクス(dynamics)を考えるとときには、軌道ダイナミクス(orbital dynamics)との相互作用が重要になる。

潮汐楕円体の最長軸はイオと木星をむすぶ線上にあり、最短軸は自転軸と一致し、中間軸はそれらと直交する。イオの形態はこまかく調べられているが、現実の形態とフィットする楕円体は、最長・中間・最短半径がそれぞれ1830.0, 1818.7, 1815.3kmと測定された。この楕円体は密度一定の球が潮汐変形して静水圧平衡にある状態(hydrostatic figure)と一致する(Gaskell et al., 1988)。イオ-木星ラインと赤道との交点にたつと木星を頭上にみることになるので、足もとの地点をsubjove点、その反対側をantijove点という。月はいつも同じ側を地球にむけているが、半世紀にわたる望遠鏡観測によるとイオでは自転周期と公転周期とのあいだに差がみとめられない。つまりイオもまた同じ側を木星にむけていて、subjove点とantijove点はlographicに静止している。そこで緯度のゼロ点はsubjove点におかれている。これらの地点は楕円体の最長軸と地表の交点であり、その付近を潮汐バルジ(tidal bulges)という。潮汐バルジは平均赤道半径よりも5 km以上ふくらんでいて、しかもlographicに静止している。ただしあとで議論するように、地質学的時間スケールでの移動の可能性まで、いままでの望遠鏡観測によって排除されるわけではない。

火山活動の究極の原因は、3軸楕円体の対称性をもつ潮汐作用である。しかもイオではプレート運動がないので、つくられた火山が移動することもない。火山分布は潮汐作用となんらかの関係でむすばれているはずだ。それゆえ、潮汐楕円体の対称性と火山分布の対称性とを比較すると、そのあいだのメカニズムについて制約がえられるのである。手にはいるデータが少なくなくて決定的なことは云い難いとはいえ、こうした観点では分布を規制するメカニズムをさぐる作業は、地球の場合より容易な面もある。こうした観点にたつて、Yamaji (1991)はイオのホットスポット分布をしらべた。小論はその

解説である。なお、地球のホットスポット分布とそのマントルダイナミクスにおける意味はYamaji (1992)が扱っている。

イオのホットスポット分布についてこれまでゆいいつ知られていた傾向は、高緯度にくらべて低緯度地域のほうが密なことが報告されている事であった(Schaber, 1982)。イオが放出するエネルギーの90%は火山活動ででてくるので、火山がおおいということは熱流量が低緯度地域のほうがおおいと考えることも可能で、だとすればアセノスフェアが存在する可能性がつかいことをモデル計算によってSegatz et al. (1988)がしめた。

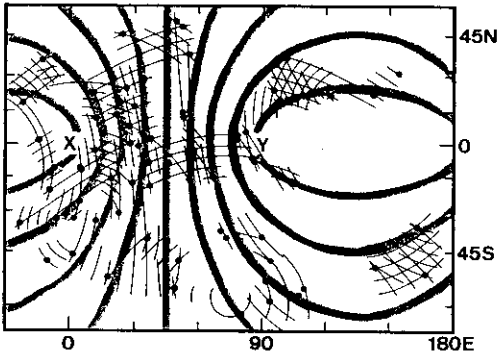
### 検出されたホットスポットの周期分布

フライ法を3次元に拡張した解析システム(山路, 1991)をつくって、イオの火山分布をしらべてみた。結果は約120kmのスペーシングをもつ周期構造が検出された。ここで周期的といっているのは、同一の極をゆうする小円が等角距離ごとに描かれているとして、ホットスポットがその小円にのっているとき、周期的に分布していると云うことにする。

ボイジャーの画像データの分解能は全球で均一というわけではない。第1図には分解能のたかい地域におけるホットスポットの分布をしめす。この図には、同極小円群が補助線としてえがかれているが、3組の小円群によって格子状の模様ができている。フライ法は位相変調に比較的つよいが、ホットスポット分布の位相変調は、結晶格子の転移にたとえることができ、それはこの図では、小円群の所々にできたズレとして表わされている。

こうしたパターンはいったいどんなメカニズムのできるのだろうか。説明すべきことは、何が120kmというスケールを規定するのかということ、第1図にえがかれた小円群の方向が何できまるかという2点である。

可能なモデルは幾つもある。遠隔地だけにデータが限られていて、決定的なことはわからないが、現時点でえられている知見にもとづく



第1図 イオのホットスポット分布(黒点)。細線は補助線としてえがいた等間隔同極小円群。太線は潮汐バルジの西遷によってリソスフェアに発生する応力場の水平最大圧縮軸の軌跡。赤道上経度ゼロの点が subjove 点。おなじく経度180度の地点が antijove 点。両地点が潮汐バルジの最高点。

ならば、2つの可能性が指摘できる。ひとつは地球のホットスポットのイメージのままに、イオの火山の成因を深部からわきあがるマントルブリュームにもとめるものである。その場合、Houseman (1989) が示唆したように対流層(イオの場合アセノスフェア)の厚さが120km というスケールをきめているのだろう。しかし小円群の方向については説明し難い。

第2のモデルは割れ目噴火と公転・自転の非同期性を想定する。120kmのスペーシングはこのモデルでは脆性層の厚さが規定するとかながえる。観測されている山岳の高さと flexural isostasy (Turcotte & Schubert, 1982) の仮定から、リソスフェアの弾性的厚さは30km かそれ以上とみつもられている(Nash et al., 1986)。したがって、120km という間隔は脆性層の厚さで規定されると思って見当はずれではなからう。これだけなら第1のマントルブリュームモデルと優劣はないが、方向についてもある程度説明できる点で、第2のモデルのほうが優れているとおもわれる。つぎにその方向について説明する。

## 非同期回転による割れ目噴火

自転周期と公転周期が一致している状態を同期回転という。非同期だと衛星のうえに立つ観測者からみて潮汐バルジが赤道上を移動するから、それにともなって赤道は5kmもの昇降運動を経験する。そうすると大きな潮汐発熱がおこって、軌道運動のエネルギーをたちまち消費してしまっ、けっきょくは同期回転におちこんでしまう。また円軌道をまわってれば潮汐楕円体の軸比は変化しないから、潮汐で軌道運動のエネルギーを消費することもない。したがって、円軌道をまわる同期回転の状態がエネルギー的にいちばん安定であって、実際おおくの衛星はそれに近い状態になっている。ところがガリレオ衛星の場合うちがわの3つ、イオ・ユーロパ・ガニメデの軌道運動はラプラス共鳴という状態になっているために、つねに軌道は円から楕円へと励起されているのである(Burns, 1986)。

じつは楕円軌道をまわっているが同期回転する衛星には自転を加速させるトルクがはたらく(Yoder, 1979; Greenberg & Weidenschilling, 1984)。それは次のようにして、木星の引力が潮汐バルジを引張るからである。楕円軌道をまわっていると、公転の角速度はケプラーの第2法則により、近木星点付近ではおおきく、遠木星点あたりでは遅い。自転角速度は一定である。同期回転だと平均公転角速度は自転角速度と一致する。ゆえに近木星点あたりでは自転による回転が公転による回転よりも遅れるために、イオのうえ subjove 点に立つひとからみると木星は頭上よりもわずかに東にかたよっている。第2A図はこの状態をあらわす。このとき潮汐バルジには図にしめすように力  $F_t$  が作用し、これが自転を加速するトルクになる。それゆえ、非同期状態にみちびかれる。

月は裏と表でちがった様相をていしているが、同期回転のために裏側は地球からみていつも裏側である。月が非同期回転にならないのは、テクトニックに死んだ星だからと考えられる。密度分布が球対称からずれていて、たとえば裏

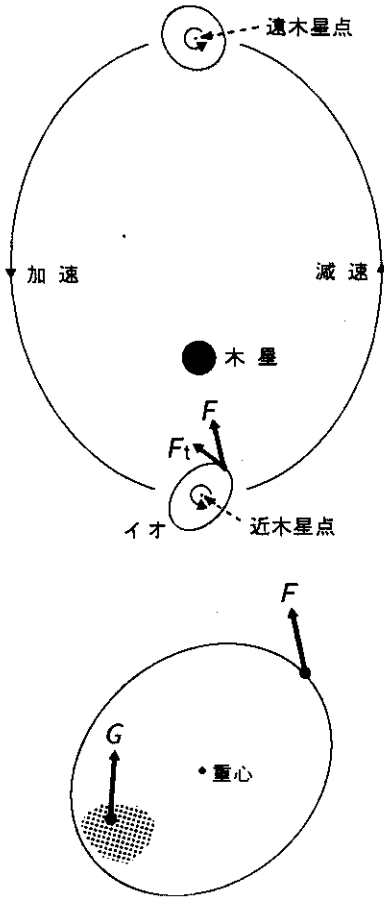
側半球が表側よりも高密度だとすると第2B図にしめすように、潮汐バルジにかかる引力( $F$ )によるトルクが、高密度部分に作用する引力( $G$ )によるトルクでキャンセルされてしまって、同期回転の状態にロックされるのである。

マンツルの粘性がひくければ、高密度の部分には地質学的時間のあいだには流動してまわりと均一になってしまうだろう。月のマンツルは遥

か昔に冷えて固くなってしまったために密度異常が粘性によって凍結され、それゆえ同期回転をつづけていられるのである。ところがイオのように活発な火山活動がある衛星ではマンツルは高温で軟らかいと予想されるから、おおきな密度異常はあったとしてもすぐに解消されてしまうだろう。したがって、半世紀にわたる望遠鏡観測で同期回転していると信じられているイオも、地質学的時間スケールでは非同期回転している可能性がある。潮汐バルジはlogographicにみて赤道をゆっくり西に移動しているのかもしれない。

赤道上で潮汐バルジにあたっている地域は平均赤道半径よりも地面は5 km以上たかくなっていて、それから90度はなれたところは5 km以上ひくい。だからバルジが移動すると赤道上の観測者からみて地面が5 km以上の振幅で昇降することになる。バルジが接近しつつある地域では隆起し、遠去かる地域では沈降する。隆起しつつある地域では、東アフリカのリフト帯がそうであるように、リソスフェアのなかの応力場は引張りの状態になる。逆に沈降しつつある地域では圧縮場になる。潮汐バルジの頂点はinstantaneousなsubjove点にあって、長期的にみるとバルジはそのうにたつ人からみて西に移動するから、subjove点のすぐ西側ではだんだん隆起し、東側は沈降する。つまり、この点の西側は引張られつつあり、東側は圧縮されつつある。また赤道上東経90度の地点は潮汐ベイスンの底だから、その西側・東側はそれぞれ圧縮傾向と引張傾向になる。

非同期回転でリソスフェア中に広域応力場ができるというのは、そもそも衛星ユーロパを念頭においてGreenberg & Weidenschiling (1984)が云いだしたことである。ユーロパの水のリソスフェアには全球的規模の割れ目系が発達しているが、そのパターンを説明するために、非同期回転で潮汐バルジが西遷するときの応力場をHelfenstein & Parmentier (1985)が計算した。McEwen (1986)は非同期回転を考慮すると、割れ目系のパターンがモデルからえられるものと一致することをしめた。



第2図 (A)楕円軌道をまわりながら同期回転する衛星。公転も自転も時計まわりで、後者の角速度は一定。公転の角速度は近木星点付近ではやく、遠木星点付近でおそい。近木星点付近で潮汐バルジに作用する引力( $F$ )の接線成分( $F_t$ )は自転を加速しようとする。(B)高密度の部分(影をつけた部分)に作用する引力( $G$ )と潮汐バルジに作用するトルク( $F$ )。

これをイオに適用して、水平最大圧縮軸の軌跡を第1図に描いた。火山のならびが割れ目にそっているならば、細線でしめされた火山のならびは応力軌跡と平行するはずである。例外もあるが、多くのならびが実際そうになっていることがわかる。また、Schaber (1982)がボイジャー画像から割れ目噴火したところを数か所みつけているが、それらはこの応力軌跡と調和的な方位をしめす。

このような路線とは独立に、Ross et al. (1990)はやはり非同期回転の可能性を指摘している。イオの形にフィットする潮汐楕円体を Gaskell et al. (1988)がしめし、さらにこれが静水圧平衡の形であることをしめた。したがってこの楕円体と現実の表面とのズレ(高度異常)は内部のダイナミクスの情報をふくんでいると信じられている。高度異常は最大1 km程度の振幅をもつことも同時にしめされた。Segatz et al. (1988)の潮汐発熱モデルの予言するところによると、高度異常は自転軸のまわりに4回対称をなすはずで(厳密にはそれに近い2回対称)、対称性は実際その通だった。ところが観測された高度異常は位相がいくらかずれていた。そこでRossたちは非同期回転を想定してズレを説明しようとしたわけである。

### むすび

ここに述べてきた事柄から、割れ目噴火モデルが検出されたホットスポット分布の規則性を現時点ではいちばんよく説明できるものであると思われる。自転周期と公転周期の差はちいさいのだろうが、しかし定量的なことはなにもわからない。探査機ガリレオが木星に着いた時点で故障が回復していれば、それも検出できるのではないかと云われている。

ところで地質図をみると、同じ規模の断層が等間隔に並走している事がしばしばみられる。破壊はフラクタル的でスケール不変の性質を示すが、破壊する物質自体のおおきさ、テクトニクスの言葉でいいかえると、脆性層の厚さに匹敵するスケールでは周期構造におちこむ傾向が

指摘されている (Vendeville et al., 1987; Wu, 1991)。脆性層の厚さと断層のスペーシングの関係というのはすぐれて構造地質学的テーマだが、それは地形からテクトニクスなどさまざまなことに迫ろうとすると、惑星科学にとっても非常に有意義なこととであらう。構造地質学は惑星科学と直結しているのである。

### 文 献

- Burns, J. A., 1986, The evolution of satellite orbits. In: J. A. Burns & M. S. Matthews eds., *Satellites*, pp. 117-158, Univ. Arizona Press, Tucson.
- 藤井直之, 1986, 他の惑星における火山現象. 火山第2集, 30, 特別号, S209-S219.
- Gaskell, R. W., Synnott, S. P., McEwen, A. S. and Schaber, G. G., 1988, Large-scale topography of Io: Implications for internal structure and heat transfer. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 581-584.
- Greenberg, R. and Weidenschilling, S. J., 1984, How fast do Galilean satellites spin? *Icarus*, **58**, 186-196.
- Helfenstein, P. and Parmentier, E. M., 1985, Patterns of fracture and tidal stresses due to nonsynchronous rotation: implications for fracturing on Europa. *Icarus*, **61**, 175-184.
- Houseman, G., 1989, Hotspots and mantle convection. *Nature*, **340**, 263.
- 川上紳一, 1989, 木星の衛星イオの潮汐加熱, 内部構造と火山活動. 火山第2集, **34**, 213-229.
- McEwen, A. S., Matson, D. L., Johnson, T. V. and Sonderblom, L. A., 1985, Volcanic hot spots on Io: correlation with low-albedo calderas. *J. Geophys. Res.*, **90**, 12345-12379.
- McEwen, A. S., 1986, Tidal reorientation and the fracturing of Jupiter's moon Europa. *Nature*, **321**, 49-51.

- Nash, D. B., Carr, M. H., Gradie, J., Hunten, D. M. and Yoder, C. F., 1986, Io. In: A. Burns and M. S. Matthews eds., *Satellites*, pp. 629-688, Univ. Arizona Press, Tucson.
- Peale, S. J., Cassen, P. and Reynolds, R. t., 1979, Melting of Io by tidal dissipation. *Science*, **203**, 892-894.
- Ross, M. N., Schubert, G., Spohn, T. and Gaskell, R. W., 1990, Internal structure of Io and the global distribution of its topography. *Icarus*, **85**, 309-325.
- Segatz, M., Spohn, T., Ross, M. N. and Schubert, G., 1988, Tidal dissipation, surface heat flow, and figure of viscoelastic models of Io. *Icarus*, **75**, 187-206.
- Schaber, G. G., 1982, Geology of Io. In: D. Morrison ed., *Satellites of Jupiter*, pp. 556-597, Univ. Arizona Press, Tucson.
- Turcotte, D. L. and Schubert, G., 1982, *Geodynamics: applications of continuum physics to geological problems*. John Wiley & Sons, New York.
- Vandeville, B., Cobbold, P. R., Davy, P., Brun, J. P. and Choukroune, P., 1987, Physical models of extensional tectonics at various scales. In: M. P. Coward & P. L. Hancock eds., *Continental extensional tectonics*, Geol. Soc. Spec. Publ., No. 28, 95-107.
- Wu, H., 1991, Effect of thickness on fracture spacing and density in layered brittle rock masses: a model experimental study. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **72**, 457.
- 山路 敦, 1991, 球面上における点の分布の周期解析—ホットスポットの研究. 月刊海洋, **23**, 571-575.
- Yamaji, A., 1991, Periodic hot-spot distribution on Io. *Science*, **254**, 89-91.
- Yamaji, A., 1992, Periodic hotspot distribution and small-scale convection in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 107-116.
- Yoder, C. F., 1979, How tidal heating in Io drives the Galilean orbital resonance locks. *Nature*, **279**, 747-770.