

土星の衝効果はなぜ起こるのか

—モデル実験を通してその謎を探る—

平川尚毅^{*1}・中野英之^{*2}

What Causes the Opposition Effect of Saturn

—An Experimental Approach Using a Handmade Model of Saturn—

Naoki Hirakawa, Hideyuki Nakano

抄 録：土星に見られる「衝効果」現象はその環が微粒子の集まりであると考えられるようになった19世紀に初めて観測された。本研究では冷却CCDカメラを用いて「衝効果」を観測するとともに「衝効果」が起こる原因について様々な仮説を立て、発泡スチロール球によるモデル土星を用いた検証実験を行い、その解明を試みた。

キーワード：土星，衝効果，土星の環，冷却CCDカメラ，モデル土星

I . はじめに

近年，都市部を中心に光害の影響が著しくなっており，暗い天体を観測することが困難になってきた。京都駅から約3kmの位置にある京都教育大学周辺の夜空は明るく，最も条件の良い場合でも4等星を肉眼で観測することがやっとという状況である。しかし，木星・土星・金星・火星などの惑星は-4~1等と明るく，こうした光害の環境下においても十分に観測が可能な天体である。都市部でも観測が可能なこうした惑星は魅力的な天体であるといえる。

美しい環の存在で知られる土星は人気の高い天体の一つである。その環に関連した現象として「衝効果」が挙げられる。土星に見られる衝効果とは太陽，地球，土星が衝の位置関係にきた時に見られる現象で環の部分が光度増加し，土星本体よりもその環の方が明るく観測される現象である。衝効果のメカニズムについては諸説あるもののいまだに明らかになっていない。土星の衝効果はその位置関係が衝にならなければ見られず，およそ1年間に一度，数日の時期にしか観測することができない。そこで本研究では土星のモデルを作製し，それを用いて衝の位置関係を再現しながら様々な仮説を検討しつつ，衝効果の原因を探る。

II . 冷却CCDカメラを用いた「衝効果」の観測

2.1 土星の衝効果について

ある天体が地球に対して衝の位置関係にきた時にその光度が増加して観測され，普段見られるよりも明るくなる現象をその天体における衝効果という（月惑星研究会，1981）。土星における衝効果ではその環の部分が普段見られるよりも明るく観測される。

* 1 京都教育大学大学院教育学研究科

* 2 京都教育大学教育学部

2015年、太陽、地球、土星が直線状に並び、衝の位置関係になったのは5月20日である。そのため5月20日の前後数日間で土星の衝効果を観察することができる。そこで本研究ではまず実際に土星の写真を撮影し、解析することで土星の衝効果が起きていることを確かめた。

2.2 衝効果の観測

2.2.1 方法

土星の衝効果を観測することができる5月21日とその前後約1か月間に相当する5月1日、6月28日に土星を撮影し、撮影した画像を解析して衝効果を確かめた。撮影はSBIG社の冷却CCDカメラST 402-MEをビクセン製口径15cmのニュートン式反射赤道儀に接続して行った。撮影した土星の写真はFITS形式で保存した。

2.2.2 観測と分析

撮影時には土星の像以外に写真内に他天体が入らないため、各日の土星の絶対光度を求めることはできない。そこで各写真で土星の本体部分と環の部分の光度を比較することによって衝効果現象を確認した。分析にはすばる画像解析ソフト：Makali'iを用いた。これは国立天文台が中心となって作製したフリーソフトでウェブサイト上から誰でも無償ダウンロードできる。Makali'iを用いれば対象画像の測光、分光、重心検出など行うことができるが本分析では測光機能を用いたグラフ作成によって、各日の土星像の断面と光度関係を求めた。図1には5月21日に撮影した土星像を、図2には以下には3回の撮影で得られた土星像の断面と光度関係を示す。

各日の土星像を分析することによって、土星の本体部分と環の部分の光度を比較することができた。5月1日、6月28日では本体部分の光度に比べて環の部分の光度が小さい。しかし、5月21日には本体部分の光度を環の部分の光度が上回っている様子を観測することができた。



図1 衝時の土星像

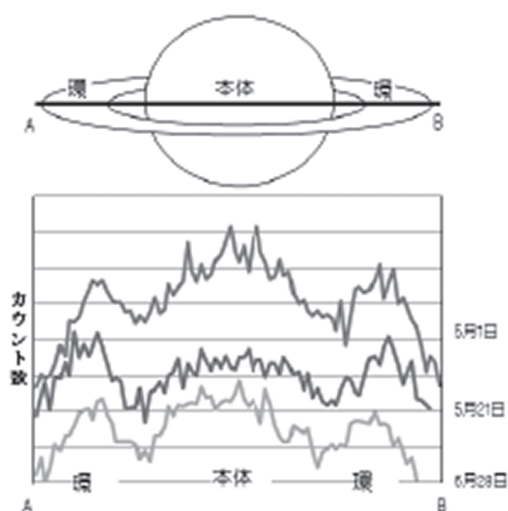


図2 土星の断面と光度の関係

すなわち実際に土星は衝の位置関係の時に環の部分の光度増加が生じ、土星本体よりも明るくなることを確認することができた。

Ⅲ．土星の衝効果はなぜ起きるのか

土星のリングに見られる衝効果の原因については諸説あるが、実際に明らかにはなっていない。そこで衝効果が起こる原因について先行研究 (Hasegawa et al, 2014) で挙げられているもの (3.1, 3.2) に加え、筆者が提唱したもの (3.3, 3.4, 3.5, 3.6) を以下に挙げる。

3.1 干渉性後方散乱

平行な光が凹凸のある反射率の高い物体表面に入射し、後方散乱するとその光（反射光）は互いに干渉しあって我々の目に届く。この時光が微小な位相角から入射しており、光ごとに経路差がほとんどない場合に波長が大きくなり、より明るく観測されることになる。

3.2 影の効果

土星の環を作っている物体は氷塊の集まりだと考えられている。氷塊どうしは影を落としあう。衝の位置関係から環の物体を観察した時よりも衝の前後で観察した時にその影がより確認されるという考え方である。

3.3 土星本体に明暗がある

土星本体に明るい部分と暗い部分があり、環に見られる光度は一定であるとする。さらに地球の公転周期と土星の自転周期が上手く合うとし、地球が衝の位置関係にきた時に土星の暗い面がいつも地球方向を向くとする。すると衝の時に相対的に環が明るくなって観測される。

3.4 環の構成粒子の形状が特殊である

土星の環を作る物体が太陽光を入射してきた方向に反射して返すような特殊な構造を持っていたとする。衝の位置関係で3天体が一直線上に並んだ時、環の物体が太陽光を太陽側にのみ返すならば環の光度が極端に大きくなるだろう。

3.5 環の構成粒子が本体に落とす影の効果

衝の位置関係の時に土星本体に落とされる影が最も大きいとする。衝の時に地球から見られる土星本体の影が最も大きくなり、環と比較して本体の方が暗く見えることで相対的に環が明るくなったように観測される。

3.6 地球の重力効果

衝の位置関係で地球と土星は最接近する。地球の重力により土星の周りにある環の物体が地球側へ引き寄せられ、地球側の環の空間密度が大きくなることでこの時に観測される環の光度が大きくなると考える。

Ⅳ．モデル実験による仮説の検証

ここまで挙げた仮説について、検証していくためのモデル実験を考案した。実際の土星のモデルを作製し、これを用いながら種々の実験を計画して衝効果の原因に迫る。

4.1 モデル土星の作製

土星の本体部分の再現に直径 20cm の発泡スチロール球、環の部分の粒子の再現に直径 1cm の発泡スチロール球を用いて作製した。黒く墨塗りした台紙に環状に直径 1cm の発泡スチロール球を等間隔で並べて吊るし、中心部に直径 20cm の発泡スチロール球を吊るす。台紙は約 90cm 四方の立方体アルミ枠の上面に貼りつける (図 3)。

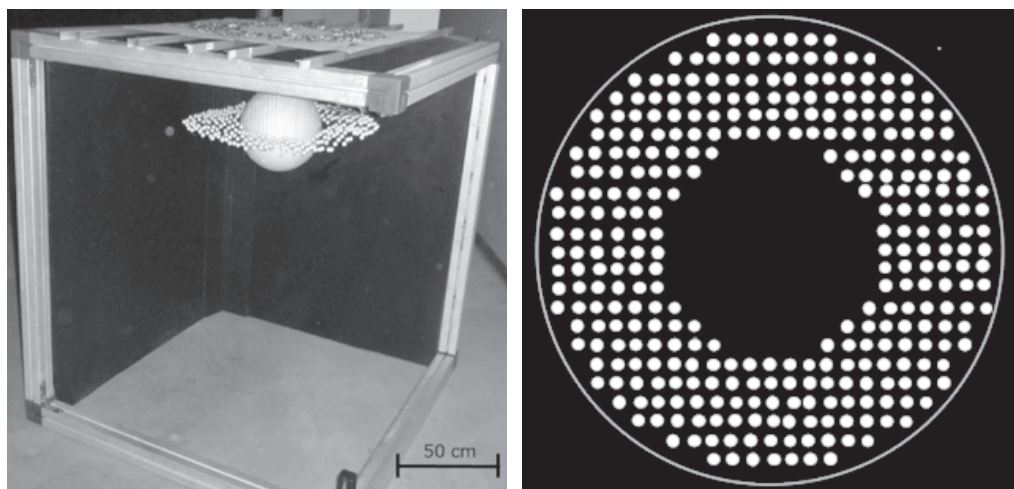


図 3 モデル土星と 1 cm 発泡スチロール球の並べ方

4.2 モデル実験

モデル土星を用いていくつかのモデル実験を考案した。

① 衝効果の位置再現実験

実際の宇宙空間における土星-地球-太陽の位置関係を再現しながら行う。太陽-地球間の平均距離が 1AU であるのに対し、太陽-土星間の平均距離は 9.55AU である。このことから地球が太陽周りを 1 周するのにかかる時間が 1 年であるのに対し、土星は 29.5 年で 1 周することが言える。そこで本実験では土星が衝の位置に来る前後 1 か月間において、土星はほとんどその位置を変化していないとみなす。実際の宇宙空間での太陽、地球、土星の 3 天体の位置関係を京都教育大学のグラウンドを用いながら縮尺を合わせて表現する。土星を照らす太陽光の代わりに車のハイビームを用い、

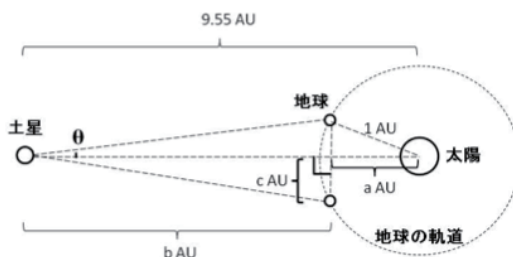


図 4 土星-地球-太陽の位置関係

太陽，土星の位置は変化させず，衝とその前後1か月間ずつの地球の位置から撮影することにする。ここで衝の1か月前後での位置の時に位相角が何度になっているか計算する必要がある。図4のように衝と衝の1か月前後の位置関係をもとにしてその位相角を求めた。

地球が1年間に太陽の周りを1周することから1か月間あたり 30° 回転することが言える。この時，図のaは0.87AU，cは0.5AUである。太陽と土星の平均距離は9.55AUであることから $b = 9.55 - 0.87 = 8.68\text{AU}$ 。これらから $\theta = \tan^{-1}(0.5/8.68) = 0.058 [\text{rad}] = 3.30 [^\circ]$ と求められる。

撮影した画像をMakali'iで解析し，モデル土星の現条件で衝効果が確認されるか確かめた。実際に得られた写真と解析結果を示す(図5)。

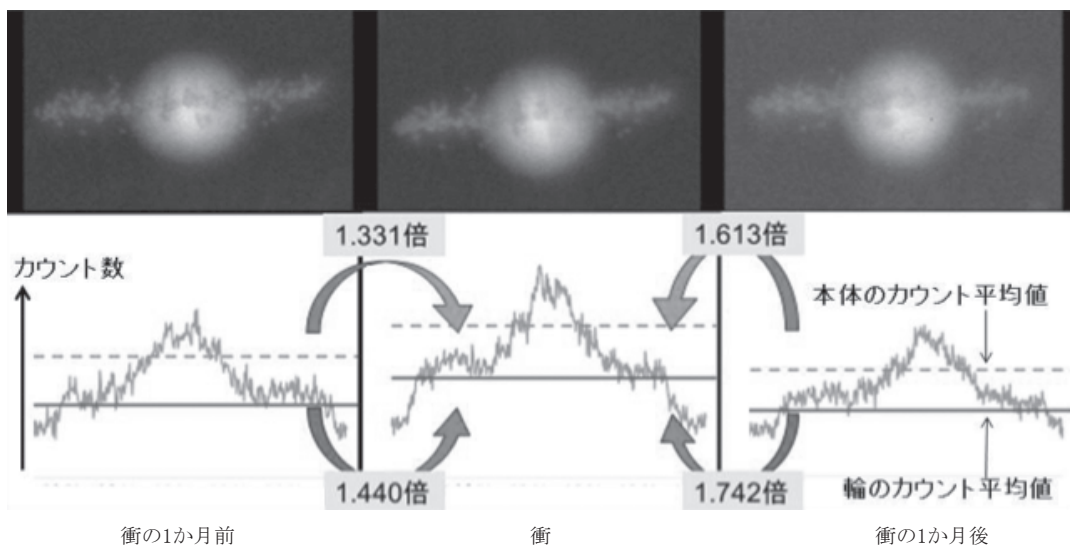


図5 モデル土星（環：発泡スチロール球）の衝効果

いずれの解析結果も土星本体部分が最も明るく，それに続いて環の部分が明るい。また衝の位置における光度は本体部分でも環の部分でも衝の1か月前後より明るい。そこで，衝の1か月前から衝への，また，衝の1か月後から衝への光度増加を本体部分，環の部分それぞれの平均光度で比較した。衝の1か月前から衝への光度増加は本体部分が1.331倍，環の部分が1.440倍である。衝の1か月後から衝への光度増加は本体部分が1.613倍，環の部分が1.742倍である。衝への環の光度増加は本体の光度増加を上回ることが言える。すなわち衝での環の光度増加が生じており，衝効果が生じたと言える。

本実験において衝効果が観測された事実は次のようにいくつかの仮説を否定する根拠となる。

- ・環を作る球の空間分布密度を変化させなかったが衝効果が見られた。このことから衝効果は環を作る球の空間分布密度の変化によるわけではなく，仮説3.6は否定される。
- ・モデル土星に用いた発泡スチロール球は模様のない滑らかな球面を持っていた。このことから衝効果は土星本体や環の物体が特別な模様や形状を持っていなくとも起こることが言え，

仮説 3.1, 3.2 を否定できる。

ここで本実験において、本体の光度増加が見られたことについてであるが、その大きな要因は素材に用いた発泡スチロール球にあるだろう。実際の土星本体はガス球であり、衝とその前後1か月ずつにおける光度変化はより小さなものと予想される。また、実際の土星の環の部分は氷塊の集まりと言われ、発泡スチロール表面よりも反射率の大きな表面を持つと考えられる。そのため、本来の土星ならばよりはっきりと衝効果が確認される。

② 板状の環の実験

望遠鏡により初めて土星が観測された頃、土星の環は氷塊の集まりではなく、一枚の板のように考えられた。そこで作製したモデル土星の環部分の発泡スチロール球を引き上げ、それと同範囲、厚さの発泡スチロール板を吊り下げて、この条件下で衝効果が再現できるか確かめた。

衝とその前後1か月間で地球から観測できる土星の姿を再現してモデル土星を撮影し、Makali'iによる測光でグラフを作成して確認する。モデル土星の位置と撮影位置は固定したまま太陽の代わりに用いたライトによる照射角度を変化させ、地球を中心にした衝とその前後1か月における太陽と土星の位置変化を再現した。得られた撮影像とその解析結果を図6に示す。

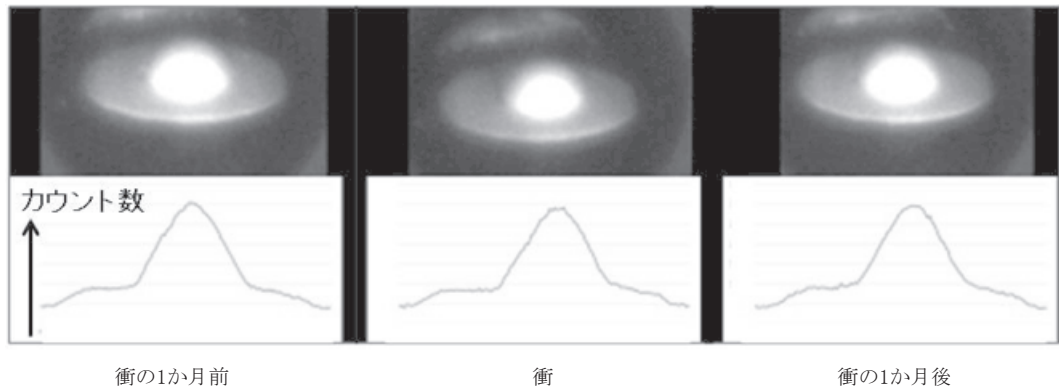


図6 板状の環におけるモデル土星の写真とMakali'iによる解析

解析結果を比較するとすべてのグラフがほぼ同様の形状をしていることが分かる。つまり衝とその1か月前後での光度変化が見られなかったと言える。板状の環では衝効果は起こらないと言える。

③ 環の粒子に見られる影に着目した実験

土星の環は多数の氷塊が集まったものであることから、氷塊どうしや氷塊から土星本体へ落とされる影の存在に注目できる。また光源により照らされていない部分は夜の部分として暗くなる。本実験はモデル土星に様々な角度からライトの光を当ててできる影を確認し、影の存在が衝効果の原因になっていることを確かめるものである。また、影ができる条件について見て行くためにモデル土星の環の部分の空間密度を変化させながら見られる影の濃さにも注目す

る。実験の流れとしてはまずあらゆる角度からライトの光を当てて、撮影したモデル土星の環を作る球に見られる影の種類に着目して、実際の宇宙空間で土星，地球，太陽が作る位相角を参考に本実験で扱っていくべき影の種類を特定する。次にその影について，衝と衝の1か月前後の位置を再現した照らし方で撮影した写真を比較し，環全体に対する影の見える個数の割合で衝効果の有無に言及する。この際，環の空間密度をもとの密度とその2分の1密度，4分の1密度と変化させる。さらにその後，環の一つの球に見られる影に着目し，環の空間密度の変化に伴うその影の濃さを確かめ比較する。

初めに注目すべき影の特定を行った。上でも述べたが影には主に2種類のものが想定される。一つは光源に照らされていない夜の部分の影，もう一つは光源に近い物体がその後方にある物体に対して落とす食の部分の影である。ライトとモデル土星の間の距離を一定にしたまま正面から照らす角度を 0° として左右に 3° ， 30° ， 60° ， 90° と動かす。撮影は常に正面から行い，写真をもとに影の種類を確かめる。図7に撮影結果を示す。 $0\sim 3^\circ$ でより確認されたのは食になる影， 30° 以上でより確認されたのは夜の部分の影であった。

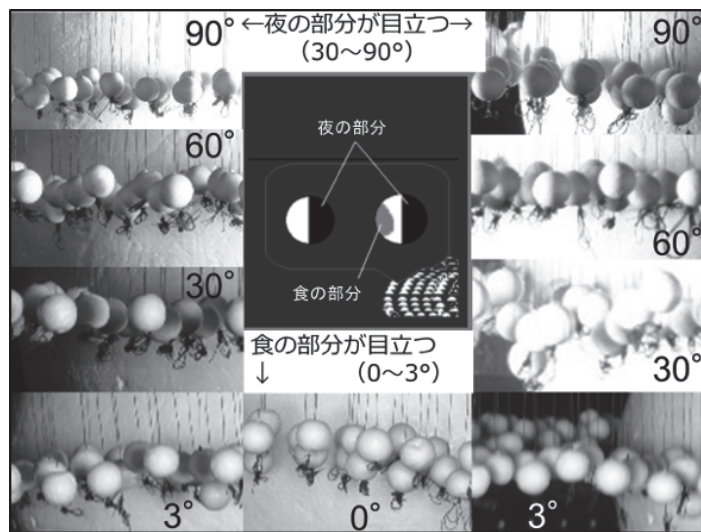


図7 観察される影の種類

ここで実際の宇宙空間で太陽，地球，土星によってできる最大位相角は次のような状態の時と言える（図8）。太陽から土星までの平均距離9.55AU，太陽から地球までの平均距離1AUを用いて最大位相角 θ を求めると $\sin^{-1}(1/9.55)=0.105[\text{rad}]$ より $6.016^\circ \approx 6^\circ$ と言える。すなわちこの3天体によってできる位相角

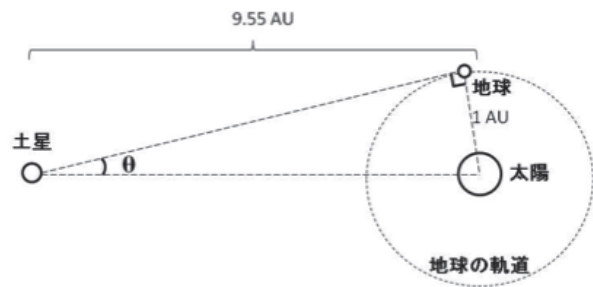


図8 最大位相角になる時の3天体の位置関係

は 6° 以上になることはなく、本実験で注目すべき影は $0\sim 3^\circ$ において目立つ食の部分の影であることが分かる。そこで、 $0\sim 3^\circ$ の位相角の各写真で食の部分の影が見られる球の個数は写真内に見える球の個数に対していくつ見られるか割合で求めた。またこの際にはもともとの環の球の密度とその2分の1密度、4分の1密度で比較した。各条件で求められた値を表1に示す。尚、通常密度は図3における空間密度を意味する。

表1の通常密度、2分の1密度における衝での割合はその1か月前後の割合よりも値が小さく得られた。衝の位置の観察において最も影の見られる割合が小さくなったことを指す。つまり土星の環に見られる影の総計は衝の1か月前後で大きくなり、これが普段見られる土星の環の光度を衝の位置で見た時よりも相対的に暗く見せている要因と考えられる。

しかし、4分の1密度で観察した場合において衝とその1か月前後の影の割合に変化はほとんど見られなかった。このことは土星の衝効果は土星の環がある空間密度以上なければ起こらないことを示しており、4分の1密度程度では起こらないことが言える。

表1 輪を構成する球に投影された影の割合

	衝の1か月前	衝	衝の1か月後
通常密度 (2.5×10^{-1} 個/cm ²)	35/48 (72.9%)	19/45 (42.2%)	20/48 (48.8%)
2分の1密度 (2.5×10^{-1} 個/cm ²)	14/29 (48.3%)	12/33 (36.4%)	12/27 (44.4%)
4分の1密度 (2.5×10^{-1} 個/cm ²)	6/40 (15.0%)	5/26 (19.2%)	4/26 (15.4%)

これらの密度条件で影の濃さに注目する。もともとの密度、2分の1密度、4分の1密度すべての条件で見られる一つの球に着目し、表面に映る影の濃さを密度ごとに比較する。濃さの比較はMakali'iによる測光で得られたカウント数の比較によって行う。それぞれの密度条件で次の表のような値が得られた（表2）。

2分の1密度条件の時に最もカウント数が小さく、4分の1密度条件の時に最もカウント数が大きい。カウント数が小さい時、その部分が暗いことを示し、カウント数が大きい時、その部分が明るいことを示す。すなわち2分の1密度条件で最も影が濃く、4分の1密度で最も影が薄くなったことが分かる。通常密度と2分の1密度で比較した時に球どうしで見られる現象は影を落としあうだけでなく互いに反射光で照らしあうことが考えられる。反射光による照り返しで通常密度では球が少し明るく観察される。一方で4分の1密度条件の時に最も明るいことが言える。この時反射光による照り返し効果よりも球どうしの距離が大きくなったことによるものと考えられる。

表2 各密度条件での影の濃さ

	通常密度	2分の1密度	4分の1密度
カウント数	8.46×10^8	6.76×10^8	1.15×10^9

V. まとめ

モデル実験を通して、次のようなことが分かった。

- ・土星の環が粒子の集まりである。
- ・土星の環を作る粒子がその背後にある粒子に対して落とす影が衝効果の要因に挙げられる。
- ・衝効果が起こるには環の構成粒子がある空間密度以上必要である。
- ・環の構成粒子の空間密度によって、粒子に見られる影の濃さが変化する。

ここまでの実験によって衝効果の原因が明らかになったわけではないが衝効果を起こす要因により迫ることができたと言える。本研究では影による効果が主要な要因として挙げられることになったが、実際に土星の環で起こっている現象は影だけでなく互いの照らしあいまで考慮に入れなければならない。よりモデルを改良することによって、さらに衝効果に迫ることができるだろう。

◎引用・参考文献

Hasegawa et al. (2014): The Opposition Effect of the Asteroid 4 Vesta, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66 (5), 89-1-18

月惑星研究会 (1981): 『惑星ガイドブック 2』 誠文堂新光社