

月面クレーターの深さと直径の関係

3年 A.T T.T M.S N.T H.T T.T

1. 概要

デジタルカメラと天体望遠鏡を使って月面クレーターの画像を撮影し、影の長さとクレーターの直径の相関を考察した。その結果、クレーターの直径と深さには相関関係が認められたが、その強さはゆるいものであることがわかった。このことは、衝突時にできるマグマの量が関係していると考えられる。

2. 目的

本研究の目的は、月面クレーターの影の長さと、クレーターの直径の相関の考察し、クレーターの成因について迫ることである。

3. 本研究に関する基礎知識

3.1. 月の成因

アポロ計画の一環でアポロが月の石を持ち帰り、酸素同位体の放射性年代測定を行った結果、月は約45億5000万年前に誕生し、35億年前には微惑星の衝突が多発していたことがわかった。また、月の石の研究成果を踏まえて1975年に地球と他の天体との衝突によって飛散した物質によってできたというジャイアントインパクト説が唱えられた。この説では、46億年前の原始地球に火星ほどの大きさ(地球の質量の約10分の1)の微惑星が斜めに衝突し、地球内部のマントルを弾き飛ばし、微惑星の破片とともに宇宙に飛び散り、その破片が集積して月を形成したとされている。そして月が形成された当時は今よりも地球に近い場所にあり、時間の経過とともにだんだん遠ざかり現在の位置になったと言われている。微惑星は正面衝突ではなく斜めに衝突したので、多くの破片が地球の周囲を回る軌道に残り、一時的に土星の環のような円盤の形を形成し、やがて破片が集積して月が形成された。この説では地球のマントルの破片で月ができているとされているので、地球のマントルと月の化学組成が似ている理由も説明できて、現在ではもっとも有力な説だと考えられている。他にもかつて有力とされていた兄弟説、捕獲説、分裂説があるが、いずれも解決の難しい矛盾点を抱えており、現在では有力視されていない。しかしながら、ジャイアントインパクト説もあくまでも一つの仮説であり、現在コンピューターシミュレーションによる検証が行われつつあり、その裏付けとなる観測的な証拠が求められている。(参考文献1~6)

3.2. クレーターの成因

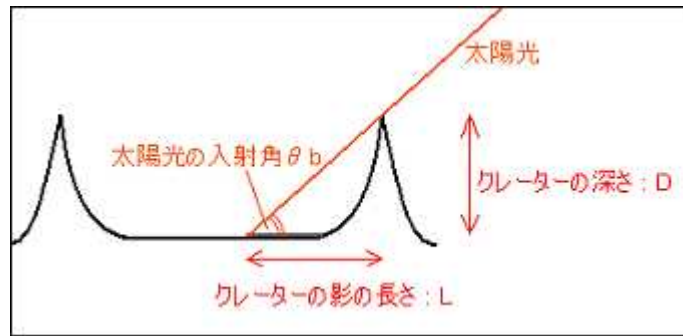
クレーターは38億年前よりも以前にできたとされている。当時はまだ多数の微惑星が存在したため、衝突が何度も起こりクレーターができたと考えられている。これが現在有力視されている衝突説である。それではなぜ同時期には既に存在していた地球に月のようなクレーターがないのかという疑問が出てくるが、地球には大気、水があり、それらによる侵食が起こったり、プレートテクトニクスが起こったりするので、

海洋底のリセットが行われ、痕跡があまり残らないのである。それでも 1960 年頃から地球のクレーターで隕石の衝突を裏付ける高圧で変成された岩石が発見されたり、アポロ計画によって月面で採取された試料の分析が行われたり、より正確な衝突条件下で高速衝突実験が実施できるようになったりして、衝突説を支持する意見が増えてきた。実際に、アポロ計画で採取されたクレーター周辺の石から高圧で変成された岩石が見つかっており、その石には直径 1 mm 以下の小さなクレーターが確認されている。また、大きなクレーターでは月全体に噴出物が散らばっているが、月の質量だけではそのような規模の爆発を起こすことのできる火山は存在できず、外からの力が加わったとされている。さらに、クレーターの直径と深さの間に一定の関係式が成り立ち、衝突によってできたことを示す証拠になっている。また、月のクレーターが円形にもかかわらず、一方向だけに光条が延びており、そのような現象は斜め方向からの高速衝突によって起こるといふ実験結果が出ている。このように衝突説を主張する根拠はたくさん見つかっており、かなり有力な説となっている。(参考文献 7 ~ 9)

4. 観測方法



月の撮影画像（2006年10月31日10時00分26秒に撮影）



クレーターの深さを D、影の長さを L、太陽光の入射角を θ とする直角三角形を考える。太陽光の入射角 θ とクレーターの影の長さ L が分かれば、下の式から深さ D が得られる。

$$\tan \theta = D / L$$

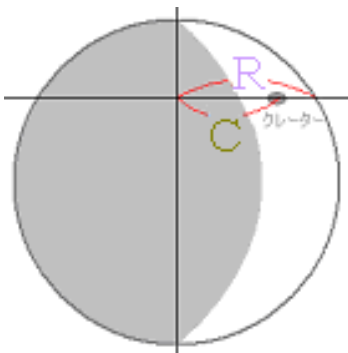
これより、

$$D = \tan \theta \times L \quad ***$$

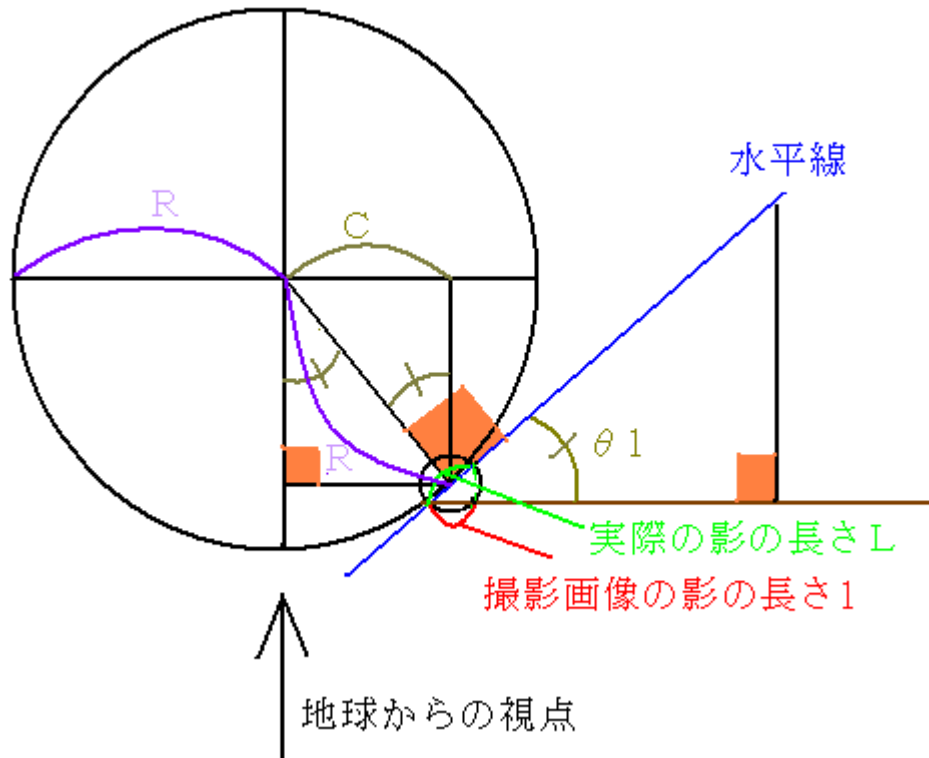
以降、L の計算方法は

- 5.1. 影の長さ L の求め方
 - 5.2. 地球から見た月が半分以上見える時の太陽光の入射角
 - 5.3. 地球から見た月が半分以上欠けて見える時の太陽光の入射角
- の順に説明していく。

4.1. 影の長さ L の求め方



撮影画像の模式図（地球の正面から見た月）



月の断面図

画像解析ソフト「マカリ」から C、R の値 (pix) が求められるので、
上図より、

$$l = R \sin(C/R)$$

$$L = l / \cos \theta 1$$

$$L = l / \cos\{R \sin(C/R)\}$$

*図のように、

(撮影画像の影の長さ) = l

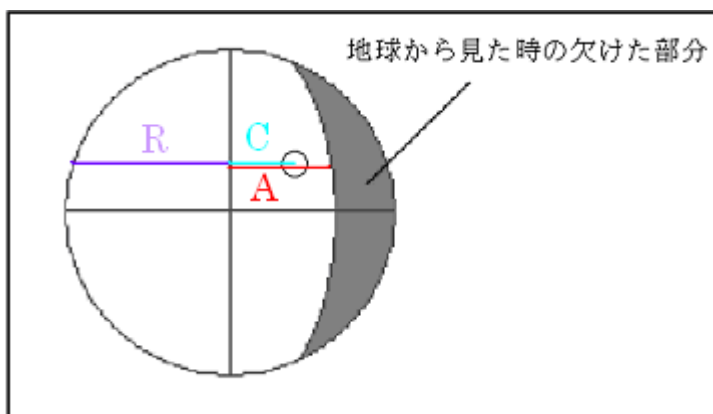
(実際の影の長さ) = L

(クレーターが位置する月の断面円の半径) = R

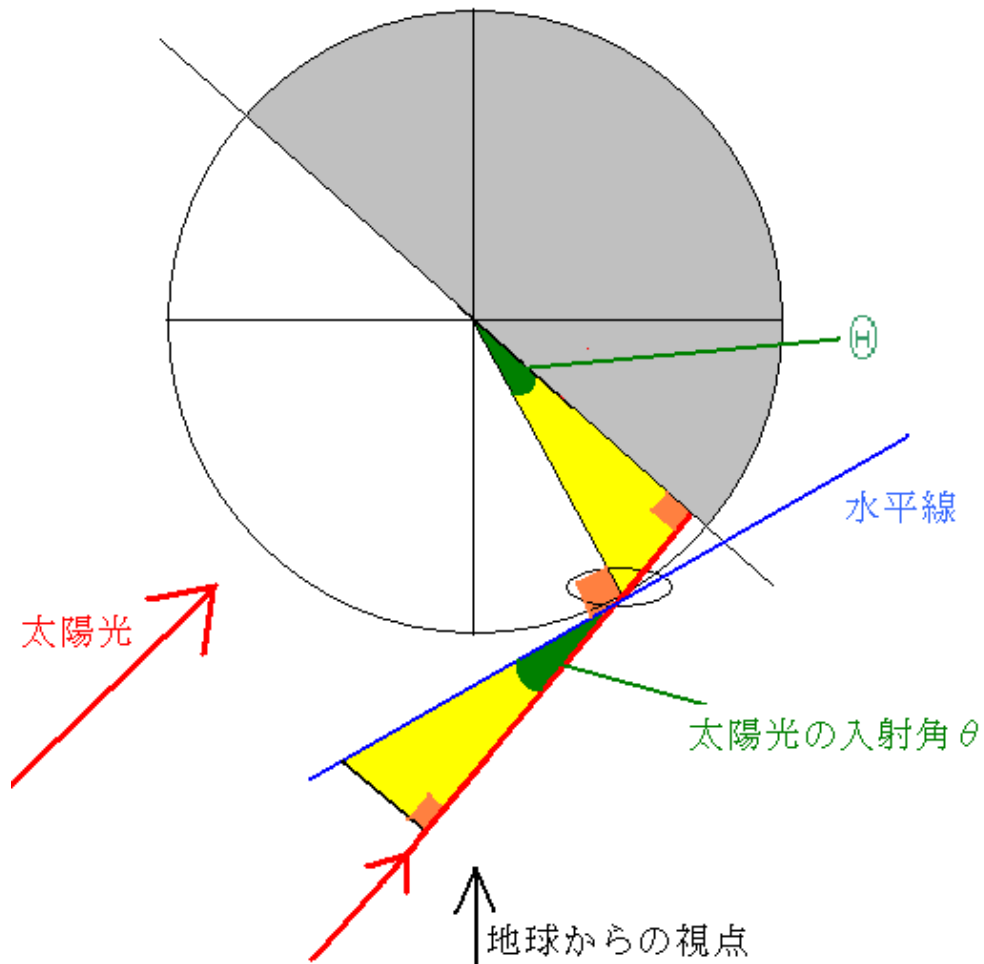
(撮影画像のクレーターから縦軸までの距離) = C

とおく

4.2. 地球から見た月が半分以上見える時の太陽光の入射角



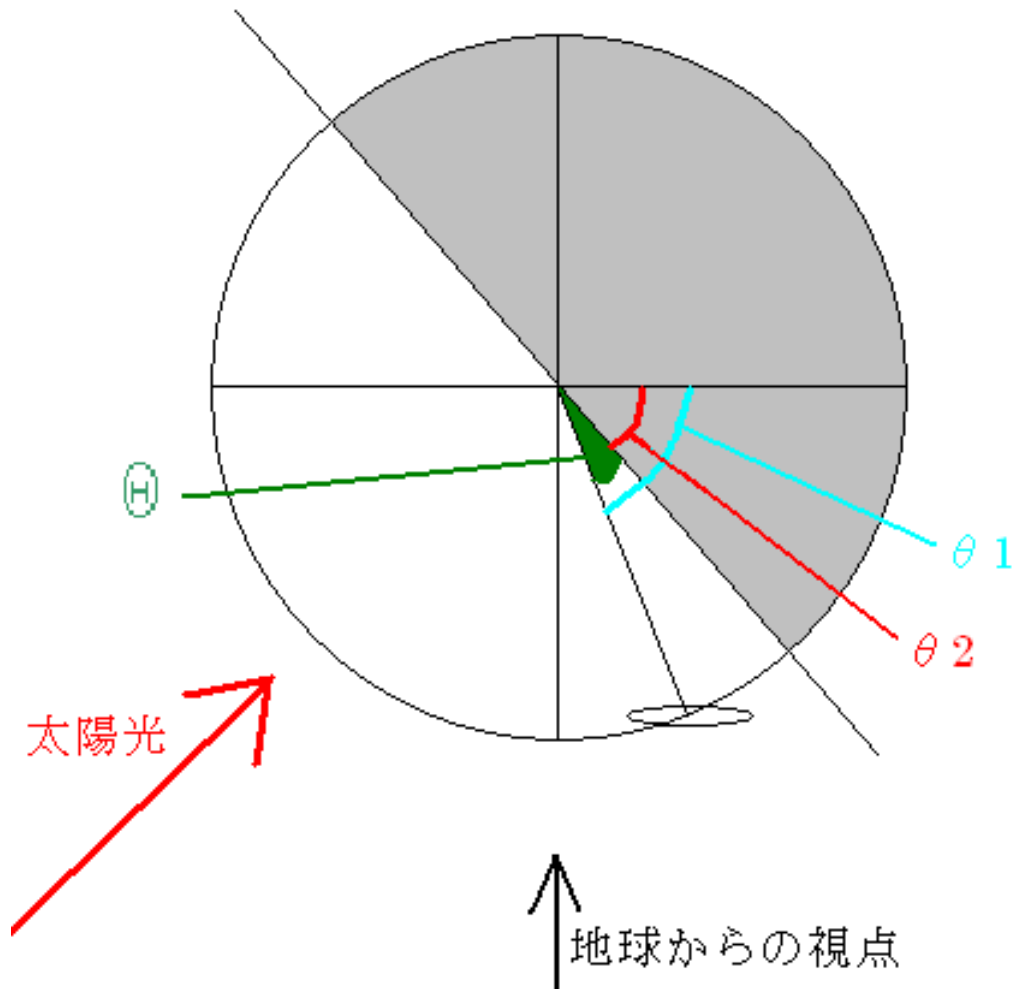
正面から見た月



真上から見た、クレーターが位置する部分の月の断面図
クレーターに対する太陽光の入射角を考える。太陽光の入射角は、観測画像の月の満ち欠けより計算できる。
上図より、黄色で塗られている2つの三角形は(2角がそれぞれ等しい三角形の)相似であることが分かるから、

$$= \quad * * *$$

であることが分かる。
次に、 を求めていく。



上図から、
とおける。

$$= 1 - 2 \quad * * *$$

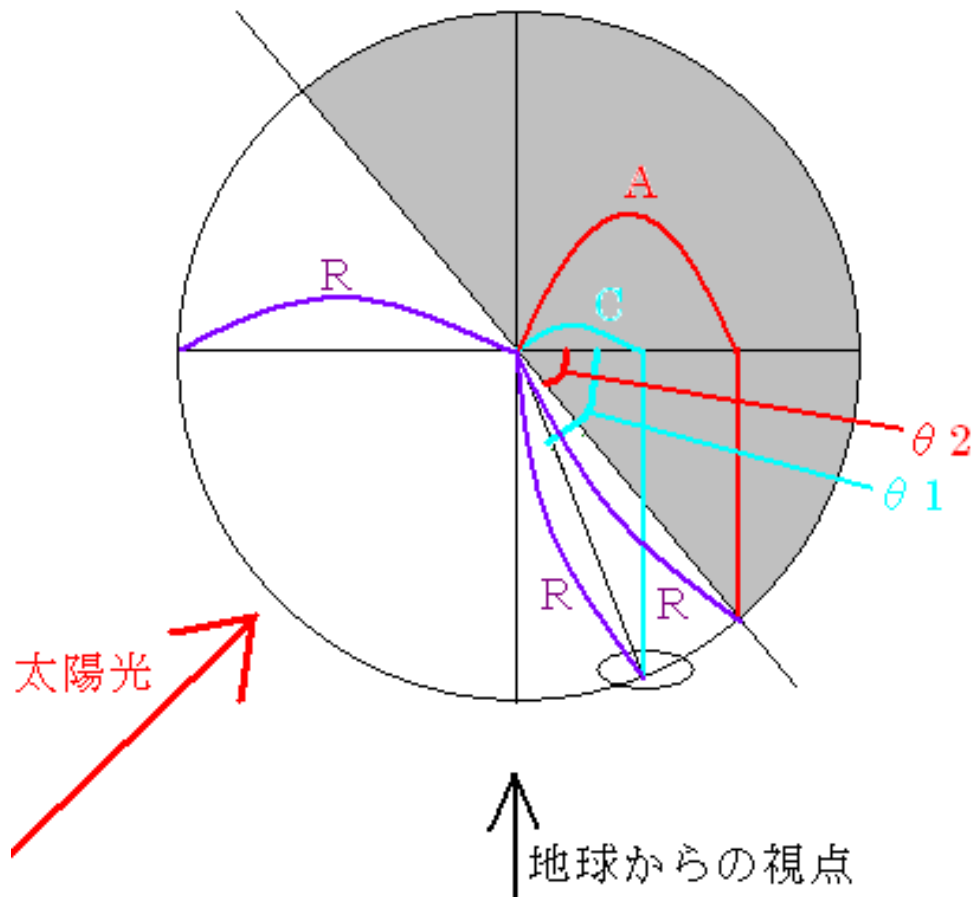
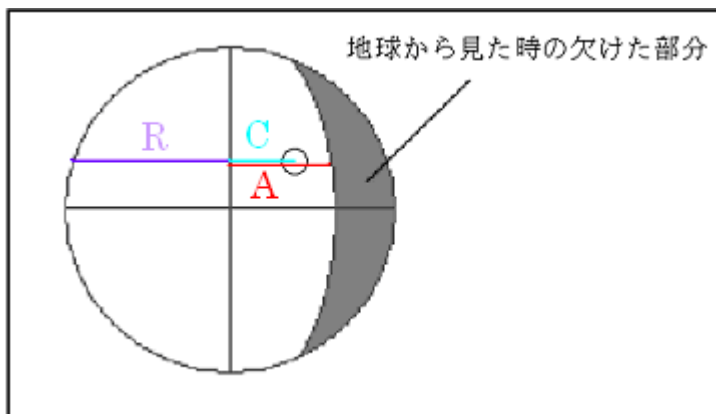


図 x



正面から見た月

マカリより、A、C、R の値 (pix) がわかるので、
 図 x より、月の半径と距離 A を用いて、

$$\cos \theta_2 = A/R$$

$$\theta_2 = \arccos(A/R) \quad * * *$$

同様にして、

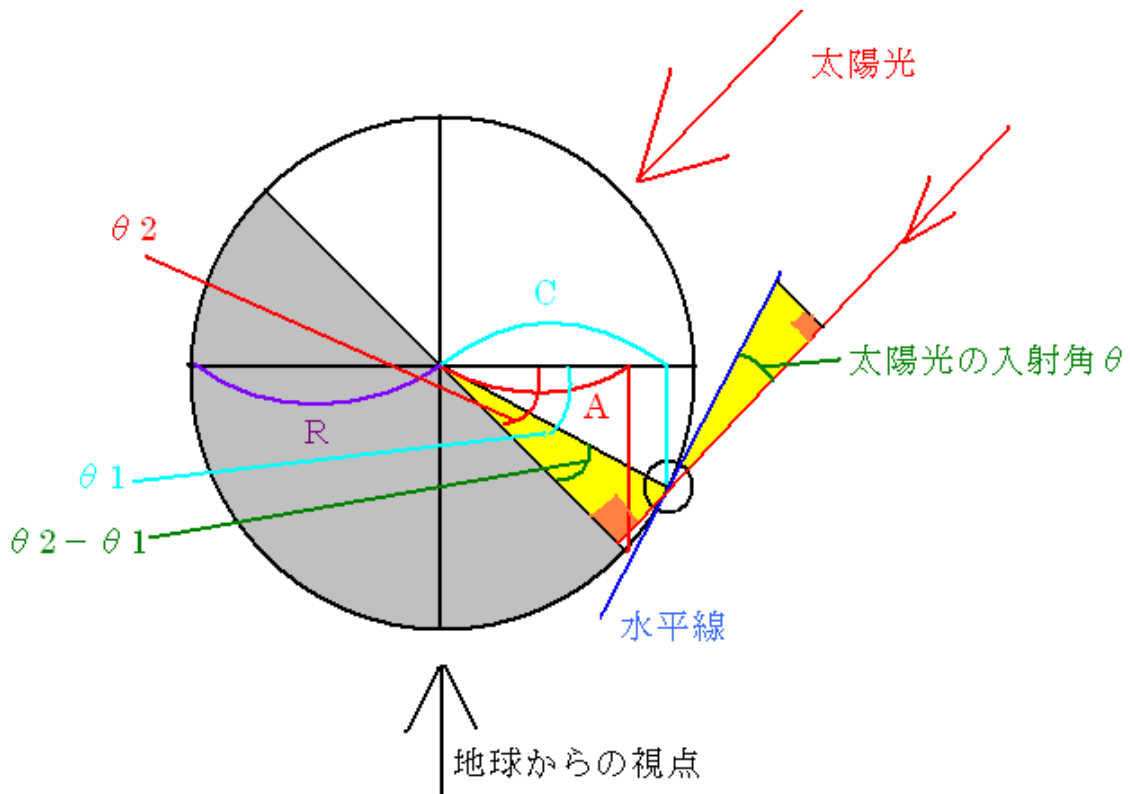
$$\theta_1 = \arccos(C/R) \quad * * *$$

、 、 、 より、

$$\text{太陽光の入射角} = \theta_1 - \theta_2 = \arccos(C/R) - \arccos(A/R) \quad * * *$$

であることが言える。

4.3. 地球から見た月が半分以上欠けて見える時の太陽光の入射角



5.2.と同様にして、

$$1 = \text{acos}(C/R)$$

$$2 = \text{acos}(A/R)$$

$$= 2 - 1 = \text{acos}(A/R) - \text{acos}(C/R) \quad ***$$

ここで、式から、

$$= | \text{acos}(C/R) - \text{acos}(A/R) |$$

とおける。

以上、() () より、Lが求まる。

この、Lを式に代入すればクレーターの深さDが求まる。

まとめると、

$$D = 1 / \cos\{\text{asin}(C/R)\} \times \tan | \text{acos}(C/R) - \text{acos}(A/R) |$$

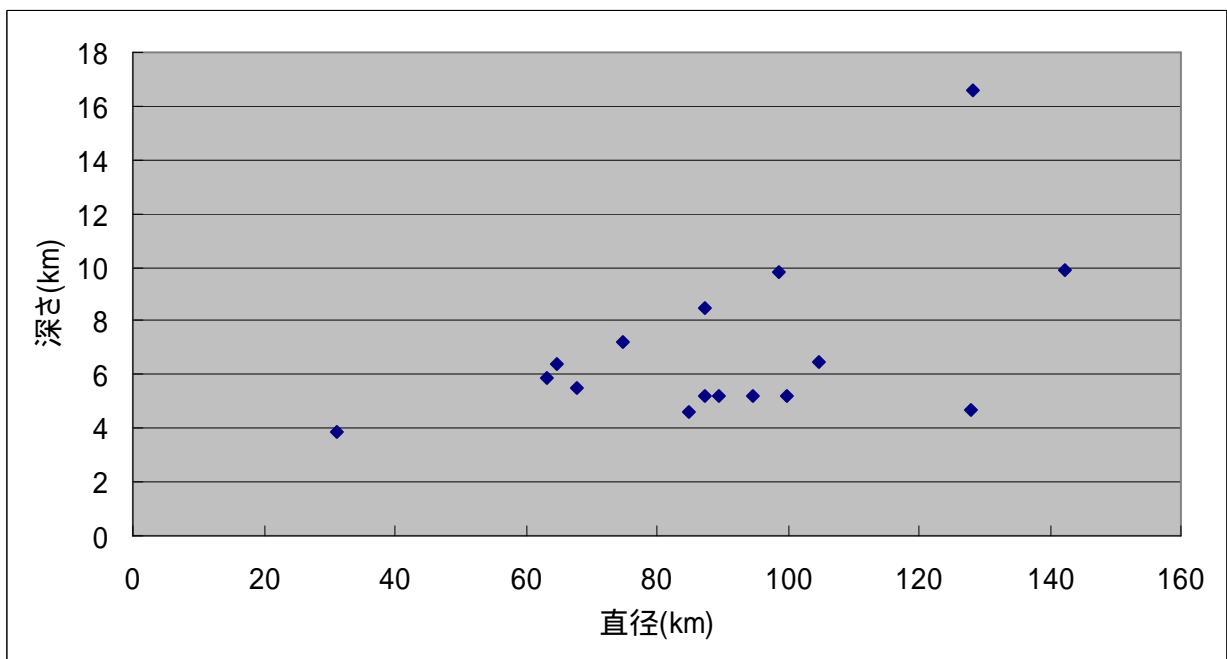
この式を用いてクレーターの深さを求めていく。

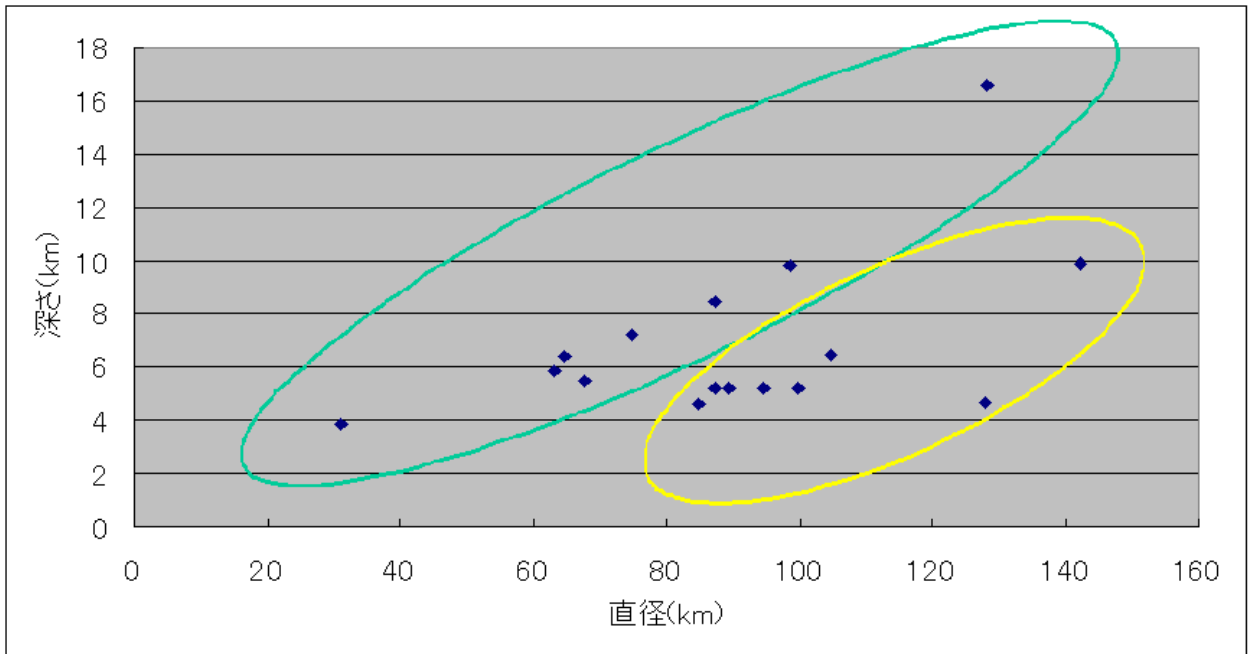
5. 解析

10月30日から11月1日の間に撮影した月の画像を用いてクレーターの深さ、直径を測定した。測定結果は以下のようになった、

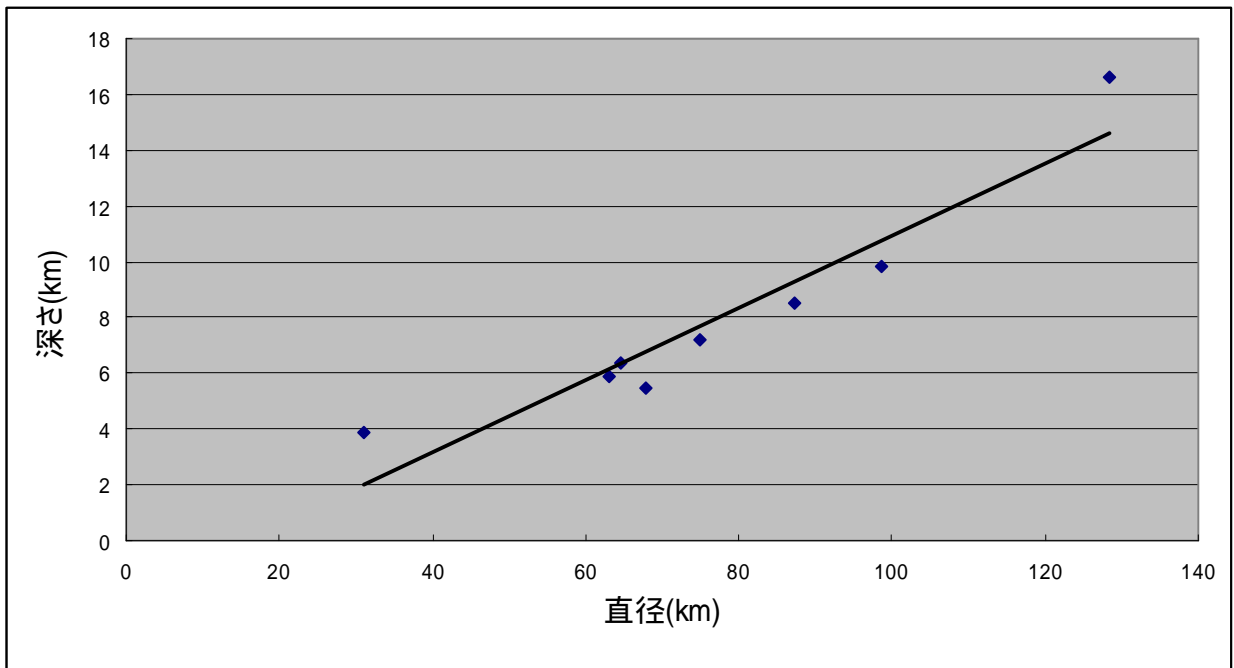
	直径 (km)	深さ (km)
アリストテレス	89.4	5.2
アルキメデス	87.4	5.2
ビュルク	31.0	3.9
ユードクソス	64.6	6.4
ティコ	127.8	4.7
マギヌス	74.8	7.2
プラトー	94.7	5.2
コペルニクス	99.7	5.2
エラステネス	67.8	5.5
デランドル	84.8	4.6
クラビウス	104.7	6.5
アルフォンسس	128.3	16.6
アルバテグニウス	87.4	8.5
プトレマイオス	98.6	9.8
カッシーニ	63.1	5.9
ヒッパルコス	142.3	9.9

これを散布図で表すと下図のようになった。縦軸をクレーターの深さ(km)、横軸をクレーターの直径(km)とする。(以下、散布図全て同様)



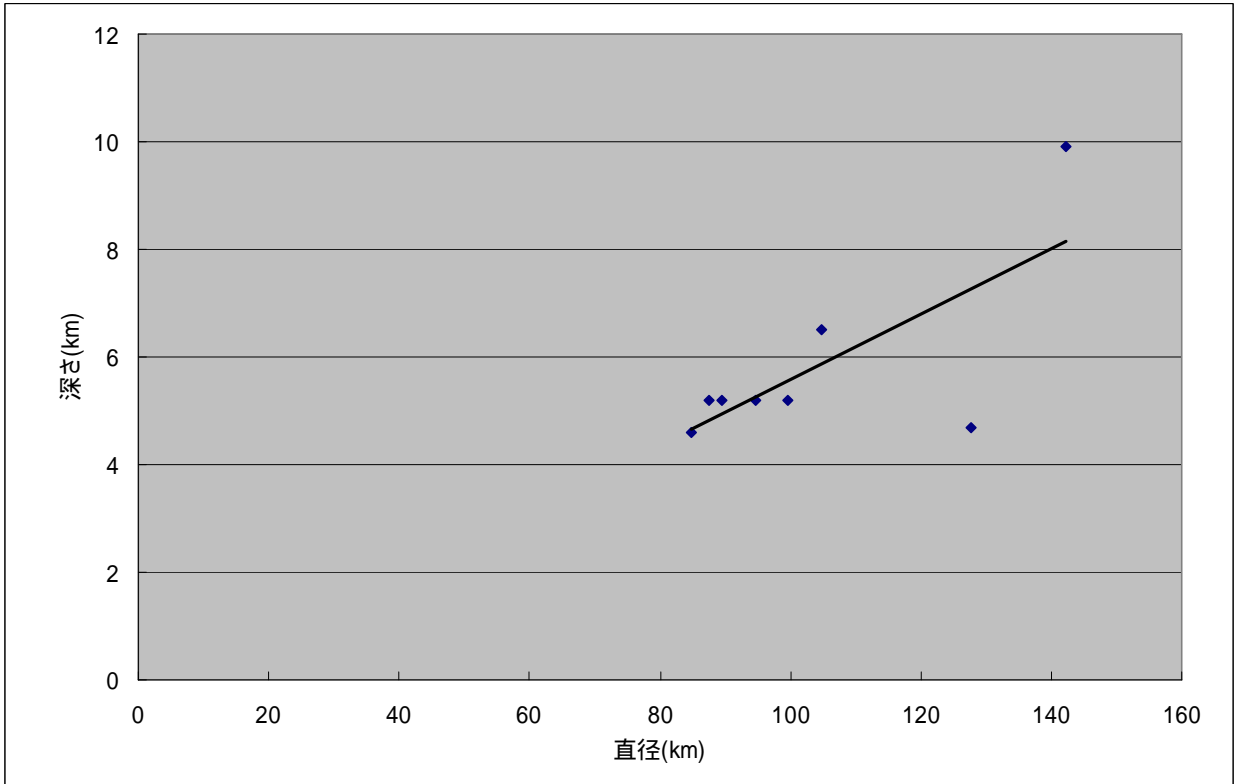


上図のようにクレーターを緑の枠内と黄色の枠内に分ける。まず、緑の枠内の点に着目してみる。

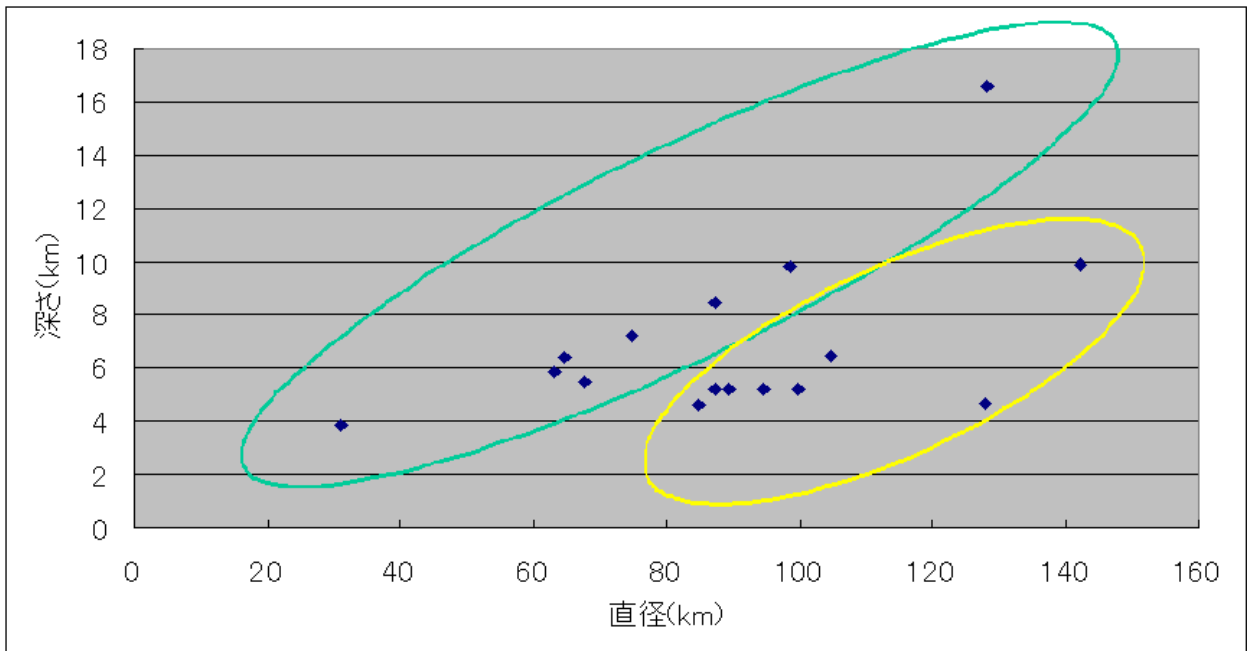


緑の枠内だけで相関係数を計算すると 0.95 となった。このことから、緑の枠内のクレーターの深さと直径に相関関係があるといえる。

次に、黄色の枠内に着目してみる。



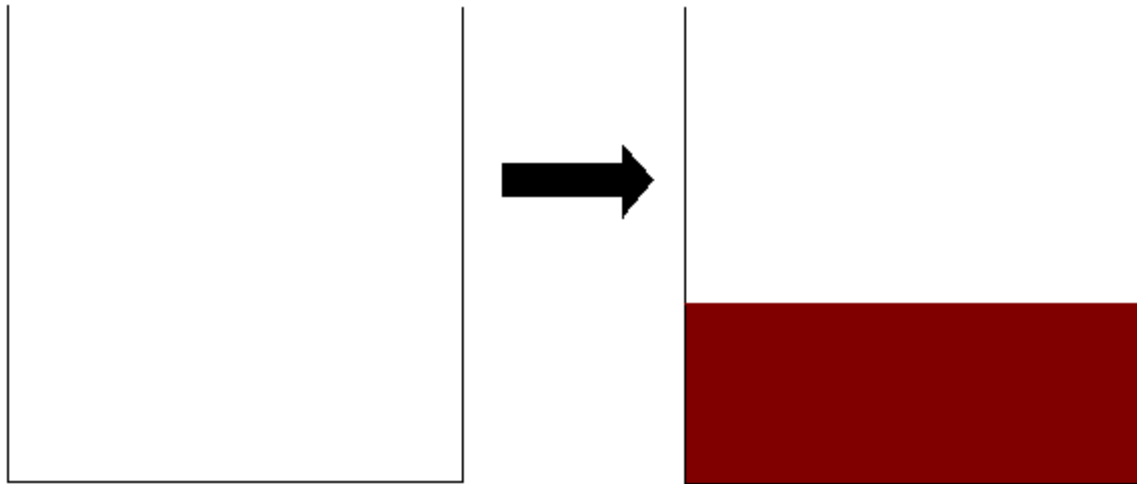
黄色の枠内だけで相関関係を計算しても 0.72 と相関関係があるとは考えにくい。



黄色の枠内のクレーターは緑の枠内のクレーターと比べると浅い。これは、クレーターの底になにかが積もったと考えられる。積もった物質はマグマと考えられる。その理由をこれから説明していく。クレーターが形成された後、月内部で放射性元素の崩壊熱が蓄積したことにより、溶融しやすい物質（玄武石質の成分）が溶融し、マグマを生成した。そのマグマは深さ数 km あるクレーターから噴出した。（大量のマグマを噴出したクレーターは月の海を生成したとされる。）（参考文献 10）

この時、マグマが噴出した一部のクレーターはマグマが底に溜まったまま固まり、底

が浅くなったと考えられる。黄色の枠内のクレーターも深さが数 km あり、マグマが噴出した可能性があると言える。



クレーターにマグマが溜まる前 クレーターにマグマが溜まった後
このようにして、黄色の枠内のクレーターは浅くなってしまったため、直径との相関関係がなくなってしまったと考えられる。
(緑の枠内のクレーターも多少なりともマグマが噴出した可能性はある。)

6. 結論

月のクレーターの深さと直径の長さの関係はあるが、その相関は強くない。これは、クレーターの底面から噴出したマグマによって深さが浅くなってしまっているためだと考えることができる。

7. 参考文献

- 1)天文学入門 星・銀河と私たち 岩波ジュニア新書 嶺重慎・有森淳一 / 編著
- 2)http://neo_luna.cside.ne.jp/moon/ml01-2.htm (2006年12月26日現在アクセス可)
- 3)<http://www.astroarts.co.jp/news/2000/02/23moonimpact/index-j.shtml> (2006年12月26日現在アクセス可)
- 4)<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%91%E3%82%AF%E3%83%88%E8%AA%AC> (2006年12月26日現在アクセス可)
- 5)<http://moon.jaxa.jp/ja/qanda/faq/faq3/how.html> (2006年12月26日現在アクセス可)
- 6)<http://www6.plala.or.jp/f-rhythm/column/C5.html> (2006年12月26日現在アクセス可)
- 7)<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%83%BC> (2006年12月26日現在アクセス可)
- 8)<http://www12.plala.or.jp/m-light/Crater.htm> (2006年12月26日現在アクセス可)

9) <http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/moon/moon03.html> (2006年12月26日現在アクセス可)

10) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%88%E3%81%AE%E6%B5%B7> (2006年1月21日現在アクセス可能)