

課題 1-3 クレーターサイズ頻度分布計測による惑星表面年代の調査

はじめに：

天体表面の年代を調べることで、その天体の形成・進化過程を推測することができる。

主な天体表面の年代決定法は、

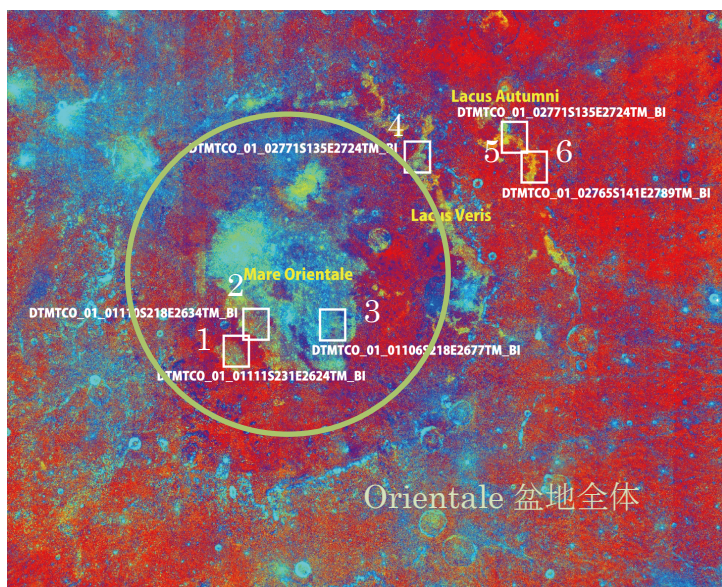
- ・ 天体からのサンプルリターンによって持ち帰られたサンプルを、化学的方法で年代測定する。(例 K-Ar 法)
- ・ 探査機が撮影した画像を用いて天体表面のクレーターを計測し、そのクレーター密度からその場所の形成年代を推測する。→クレーター年代学

今回は、クレーター年代学を用いて、月面上数カ所のクレーター年代を算出し、その場所の形成・進化過程を推測する。

手法：

- ・ かぐやの画像を用いて、SAOimageDS9によるクレーターカウンティング
 - 対象地域のクレーター密度を算出する
- ・ craterstat2による解析
 - クレーター年代モデルを用いて、その地域の年代を決定する。
 - ◇ Chronology function : Neukum (1983)
 - ◇ Production function : Neukum (1983)

対象地域：



- ・ Orientale盆地 (19.4S/92.8W)
- ・ Orientale 盆地全体
- ・ 盆地内の海 6カ所

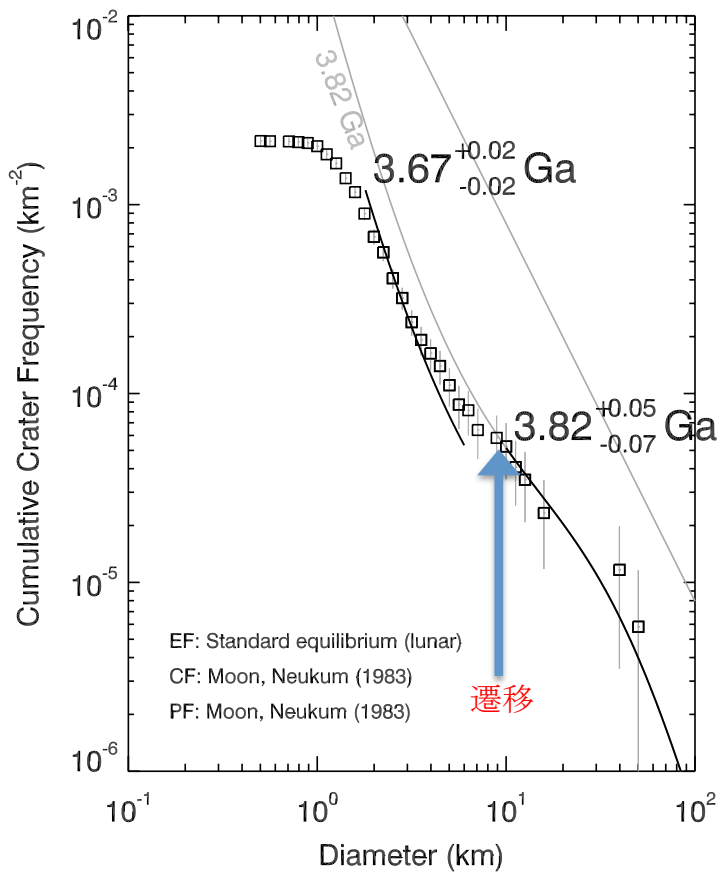
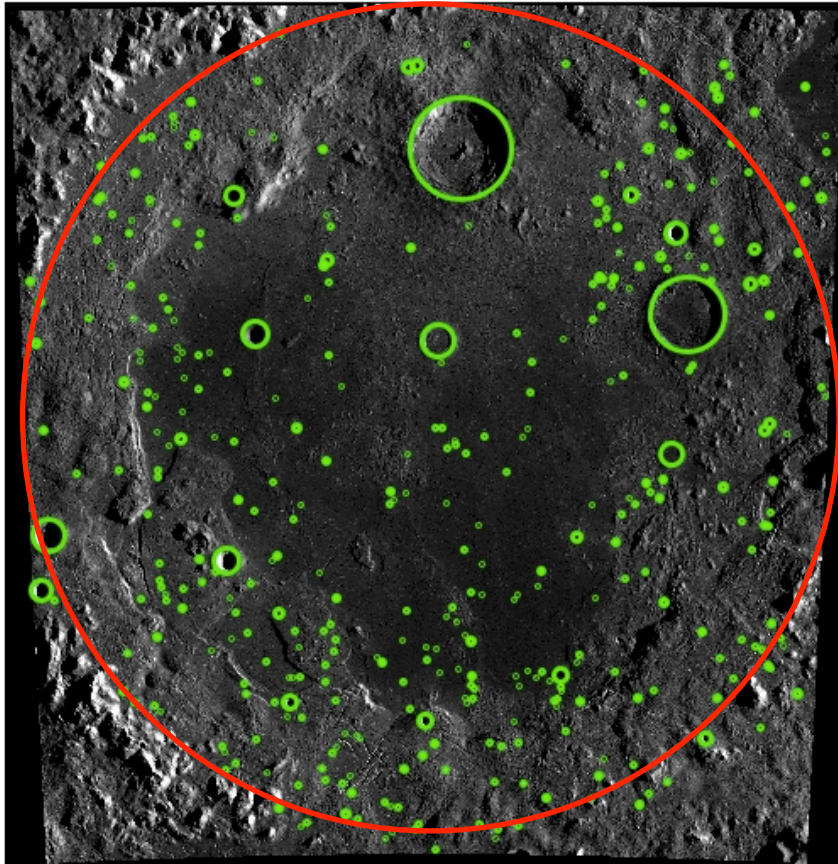
←ClementineのUVVISカメラで撮影した反射率データをRGBに割り当てたもの

赤：宇宙風化が進行、Ilmenite

青：比較的新鮮、Feが少ない

結果：

1. Orientale 盆地全体



大きなクレーター(直径 8km 以上)と、
小さなクレーター(直径 8km 以下)の
領域で年代が異なることが分かる。

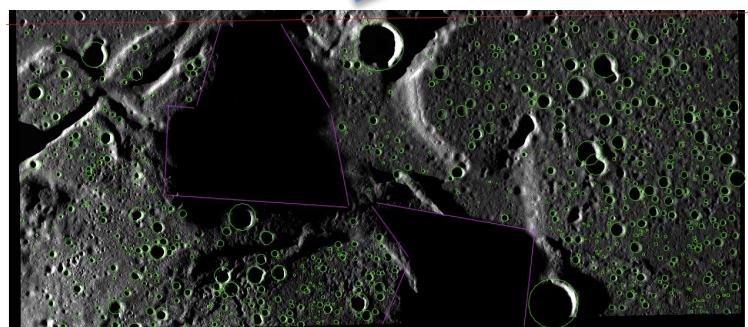
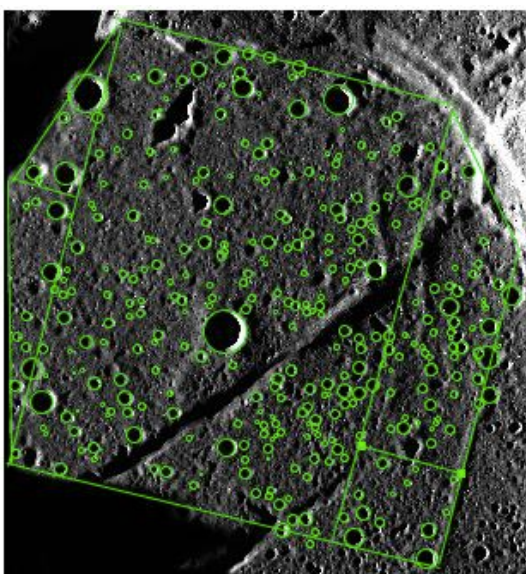
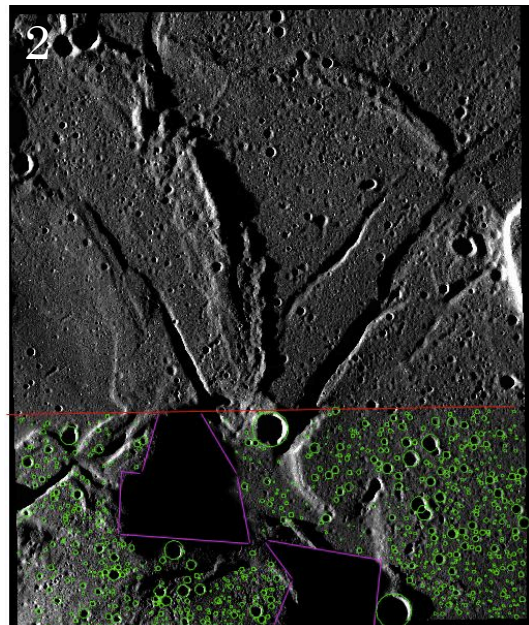
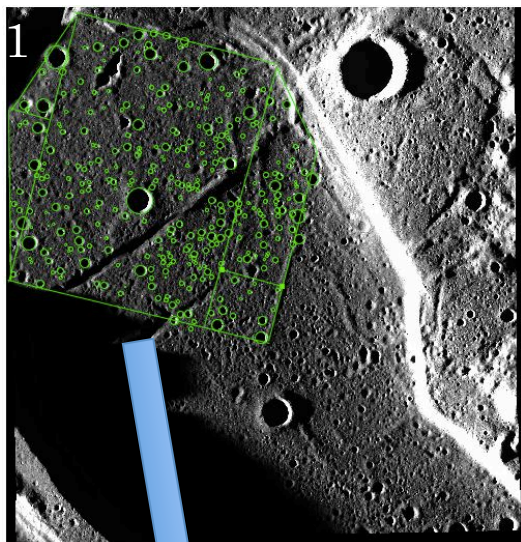
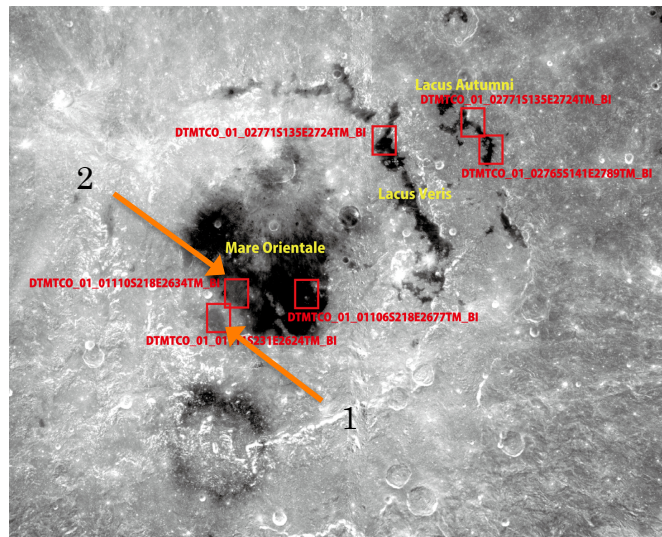
理由：

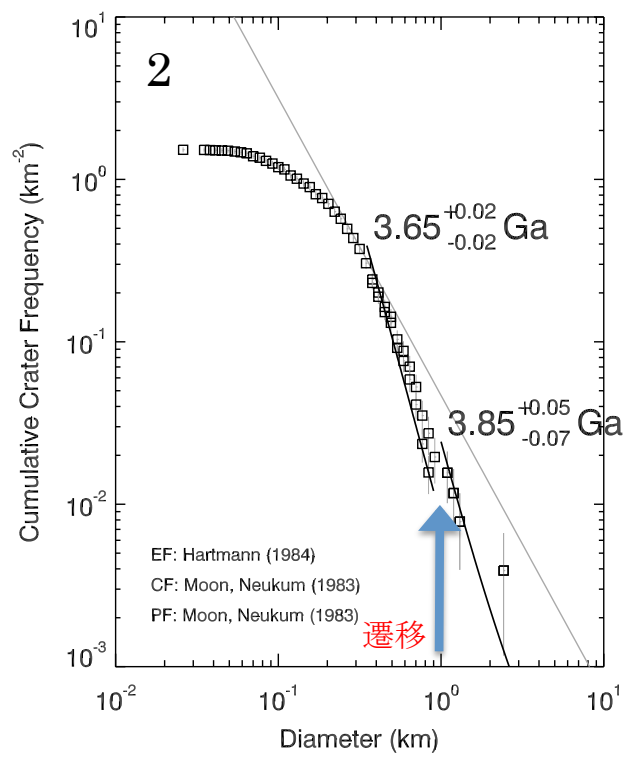
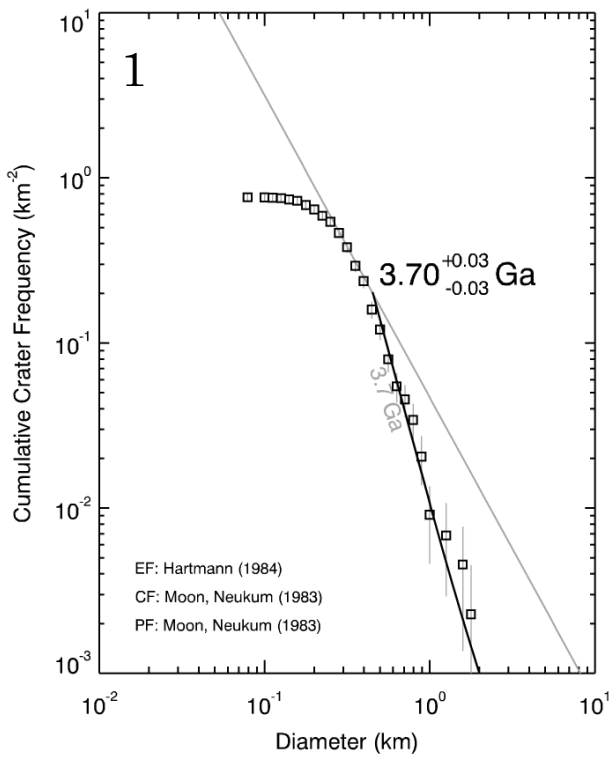
盆地が形成された後、火山活動によるマ
グマが流れて小さなクレーターを消去し、
Mare Orientale(東の海)が形成し表面が
resurfacingされたあと、またその上にク
レーターが形成された。

盆地が形成された時期より、海が形
成された時期の方が新しい。

→遷移直径から、海の厚さを推定可能
(後の Section で)

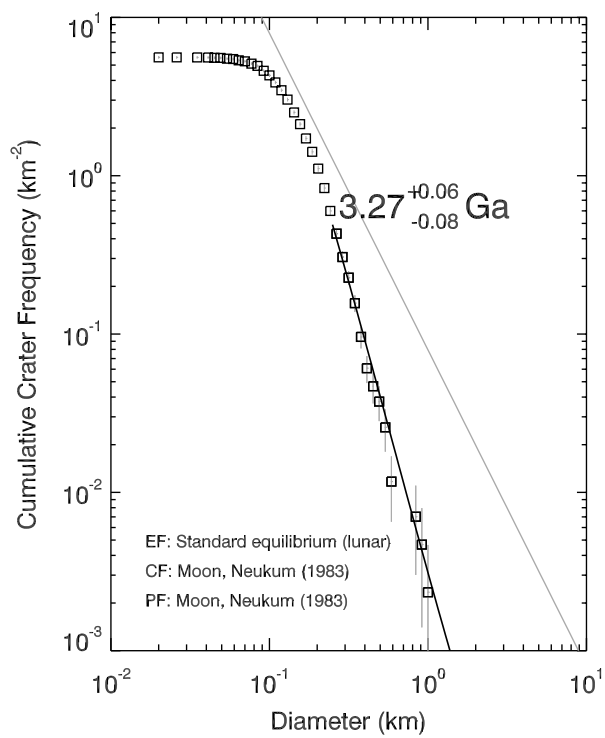
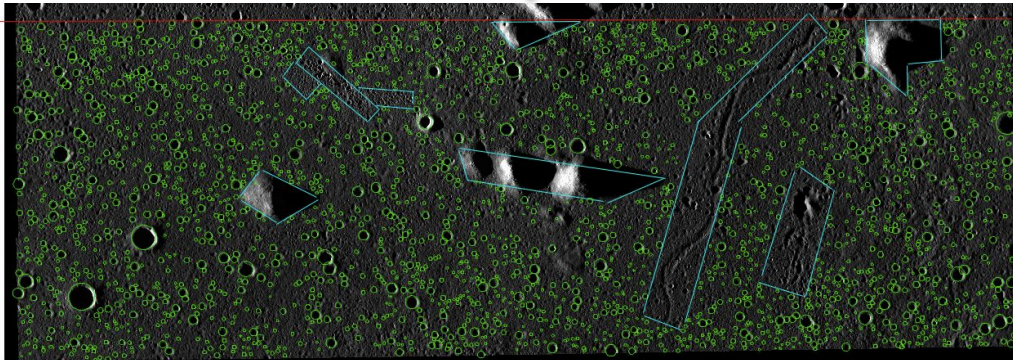
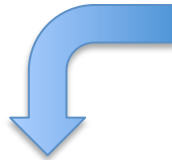
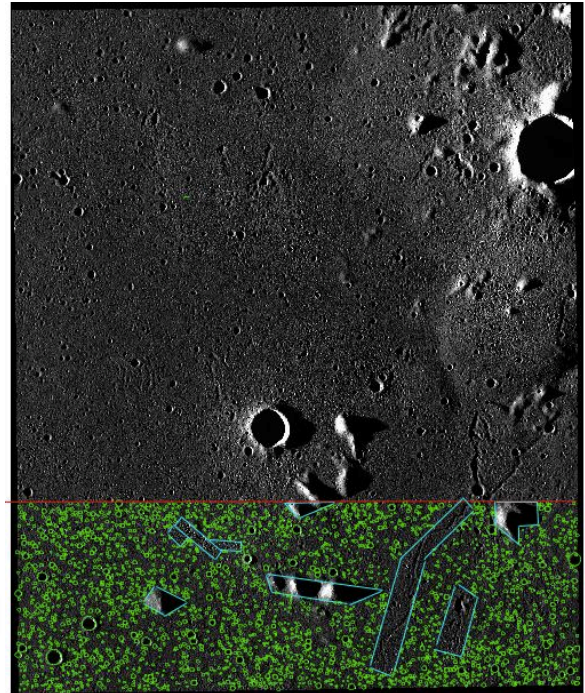
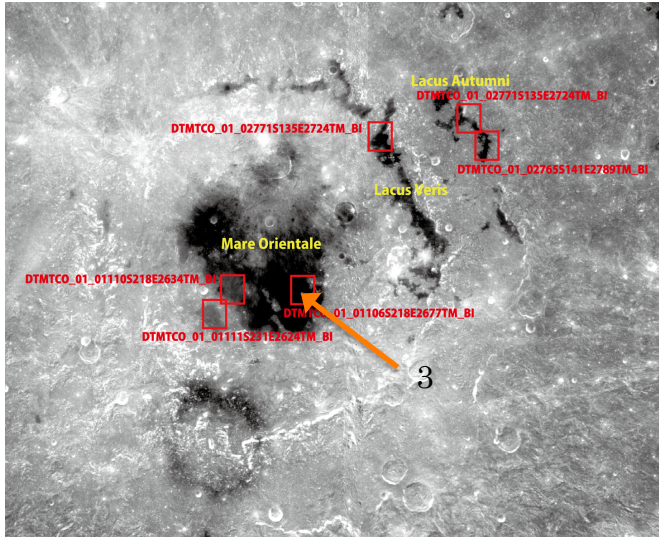
2. Mare 西南部





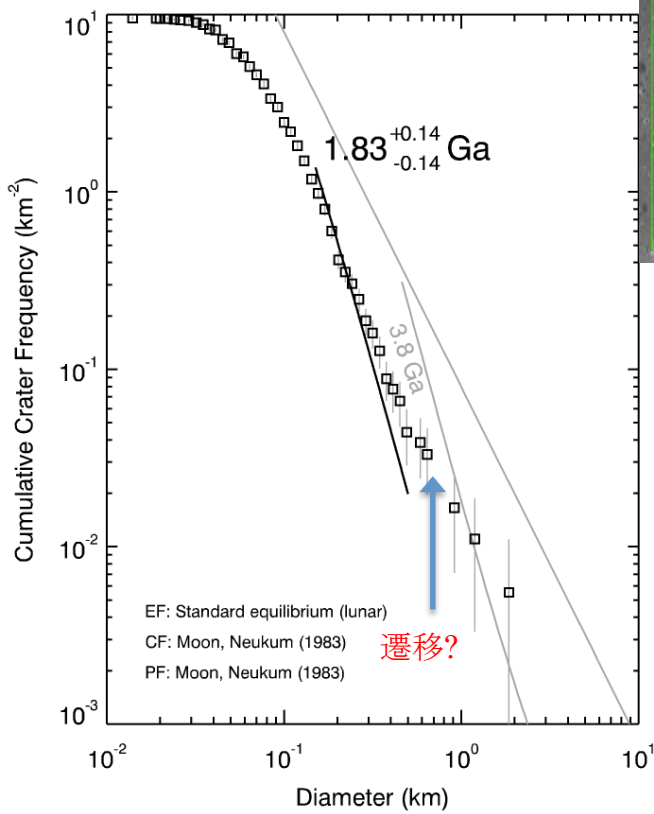
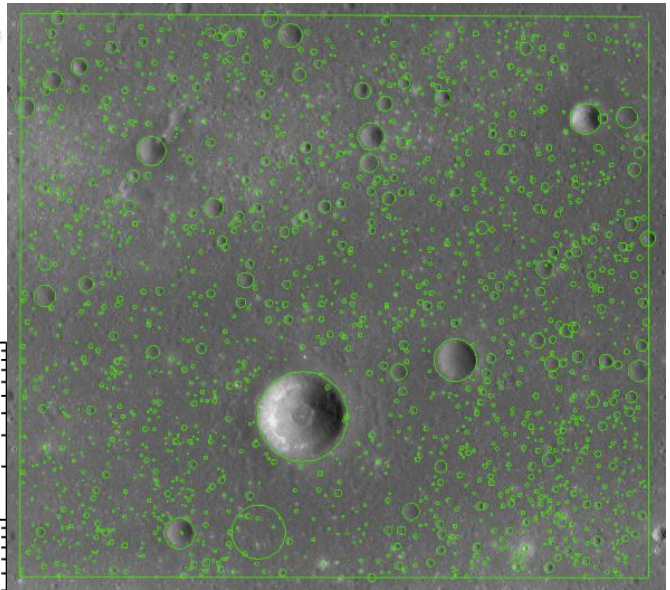
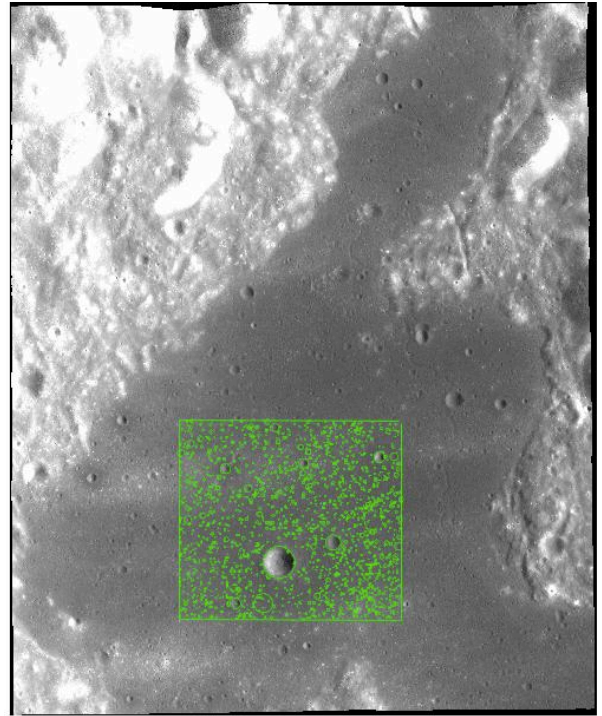
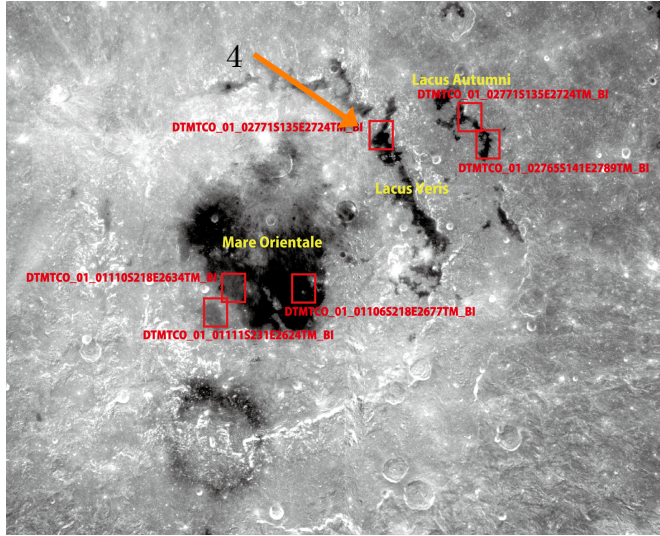
- 2の場合、大きなクレーターの領域（直径 800m 以上）と小さなクレーターの領域（直径 800m 以下）で年代が異なる。
→Orientale 盆地全体と同じ傾向を示す。マグマが流れたことで、大きなクレーターは残ったが、小さなクレーターが消されたため。
- 2 の大きなクレーターの領域の年代は、Orientale 盆地の大きなクレーターの領域と一致し、1 と 2 の小さなクレーターの領域の年代は Orientale 盆地全体の小さなクレーターの領域と一致する。
→2 の大きなクレーターの領域 = Orientale 盆地形成時期
1 と 2 の小さなクレーターの領域 = 海の形成時期

3. Mare 中央部 (3)



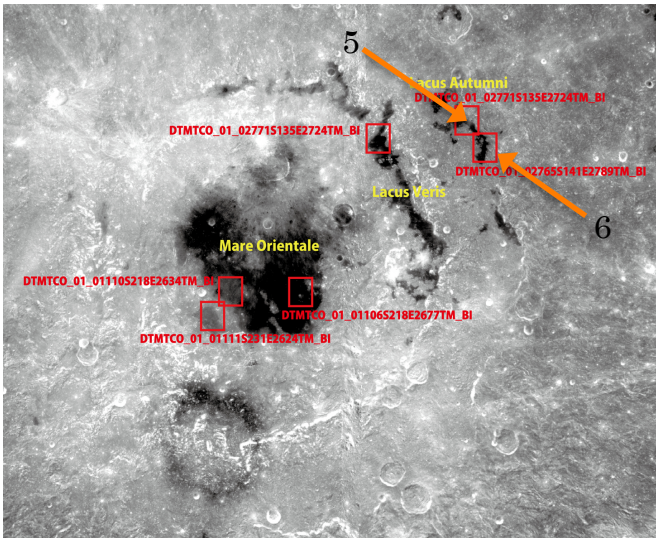
- Orientale 盆地全体、または 1, 2 よりもさらに若い。
- 同じ Mare でも形成年代が異なる領域がある。

4. Lacus Veris (4) : 多重リング内側

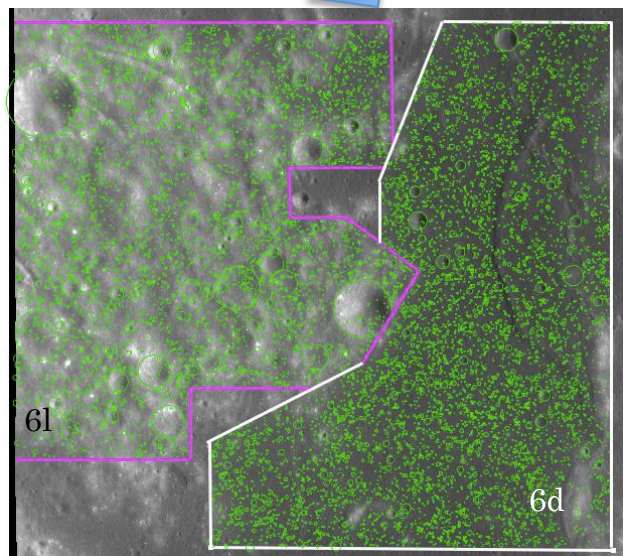
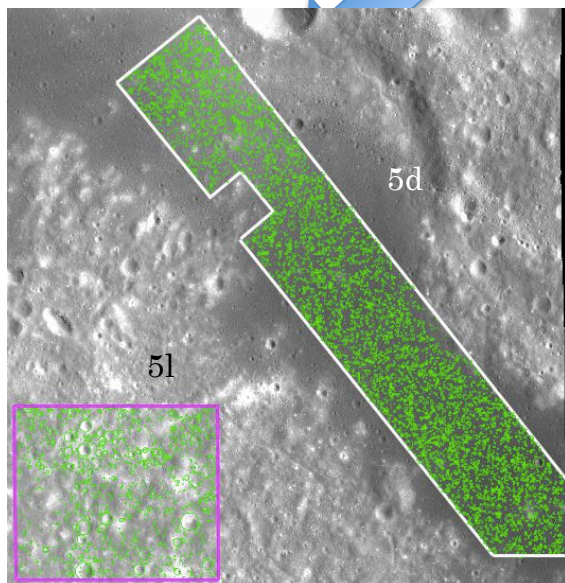
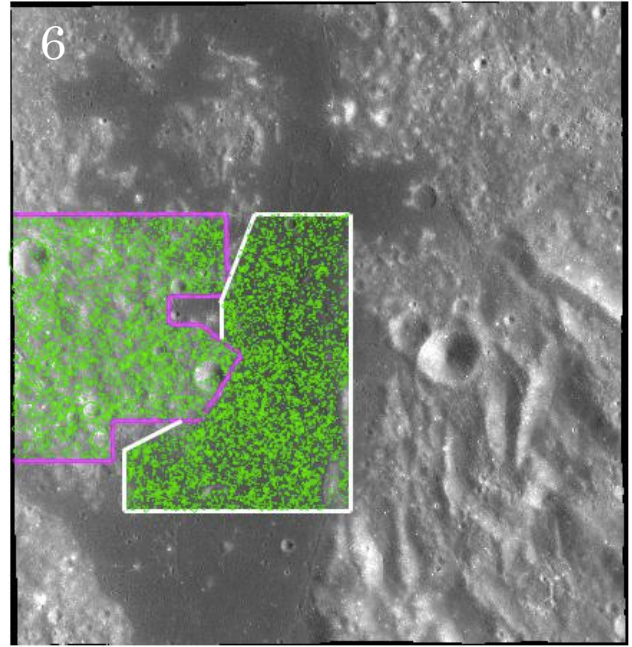
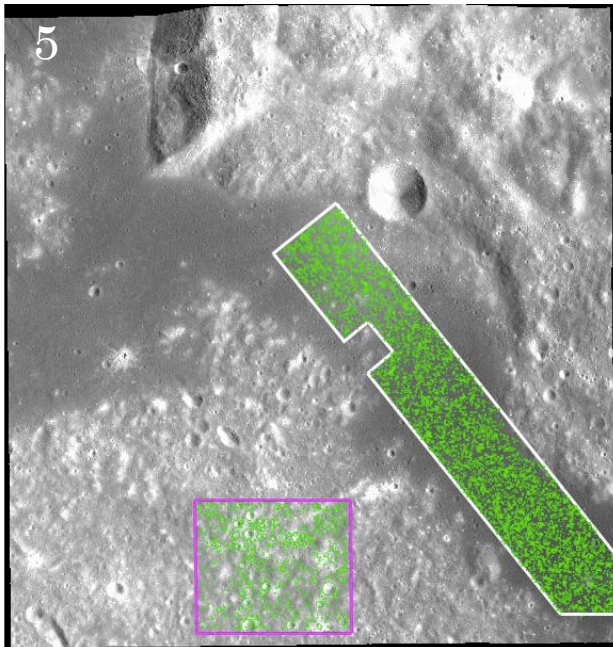


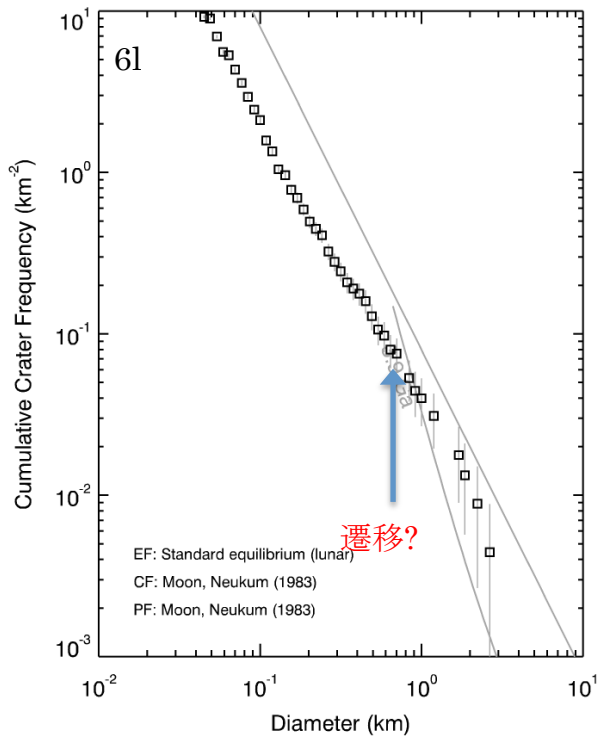
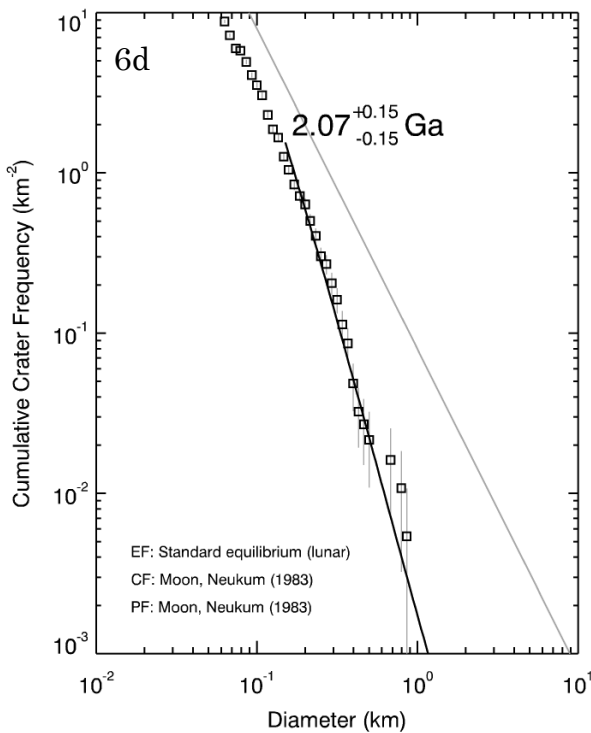
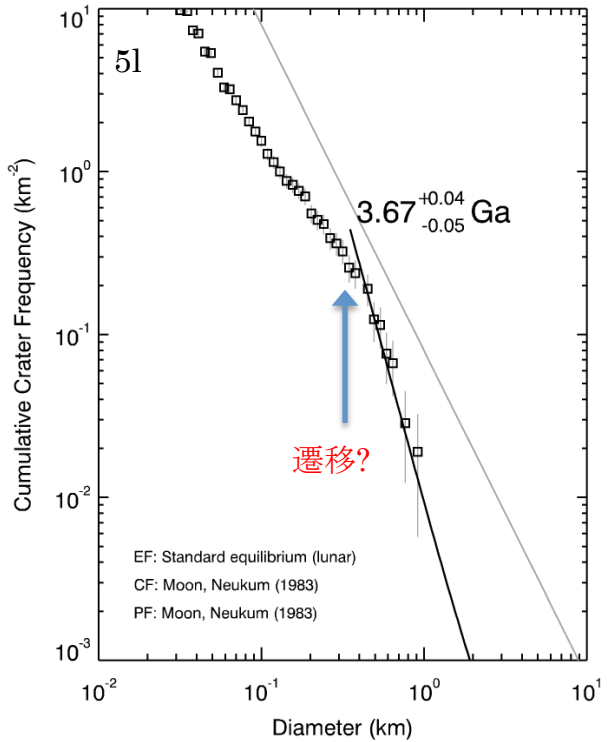
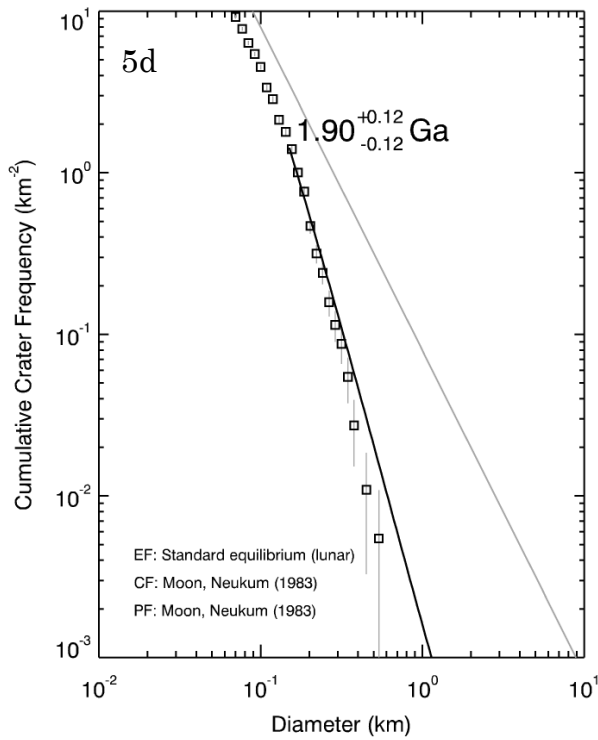
- 大きなクレーターが少ないので、比較的小さなクレーターだけで fitting
→大きなクレーターは古い? 3.8Ga を挟むように分布する。
- 全ての Mare より若い。
- クレーターの遷移 (約 800m) が見られる。

5. Lacus Autumni (5, 6) : 多重リング外側



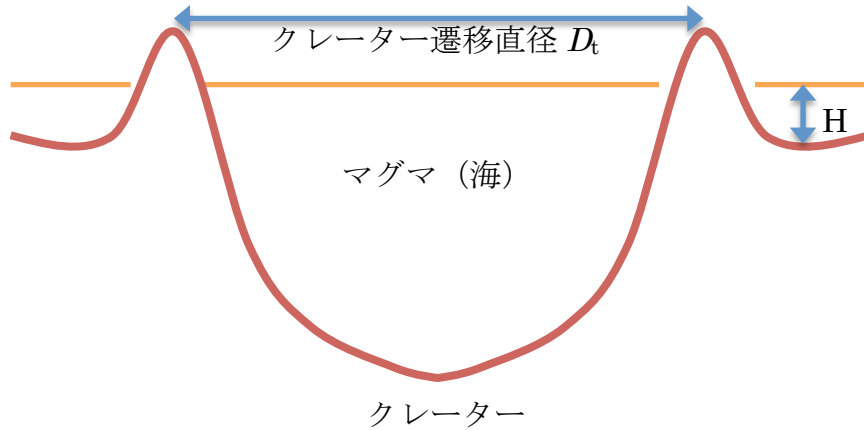
両方の領域共に、暗い部分（d）と明るい部分（l）で分けて解析した。





- 両方共に、暗い領域（5d, 6d）は Lacus Veris と同じ年代を示す。
- 東側の明るい領域（6l）はうまく fitting できなかったが、3.9Ga を挟んでいるので、古いことは確かである。
- 西側の明るい領域（5l）は 2 の小さいクレーターの領域（海）とほぼ一致するようだが、海で覆われているように見えないから、6l と同程度の年代と考えてもよい？
- 両方の明るい領域で、クレーター遷移（5l は約 500m、6l は約 600m）で見られる。

マグマ（海）の厚さの推定：

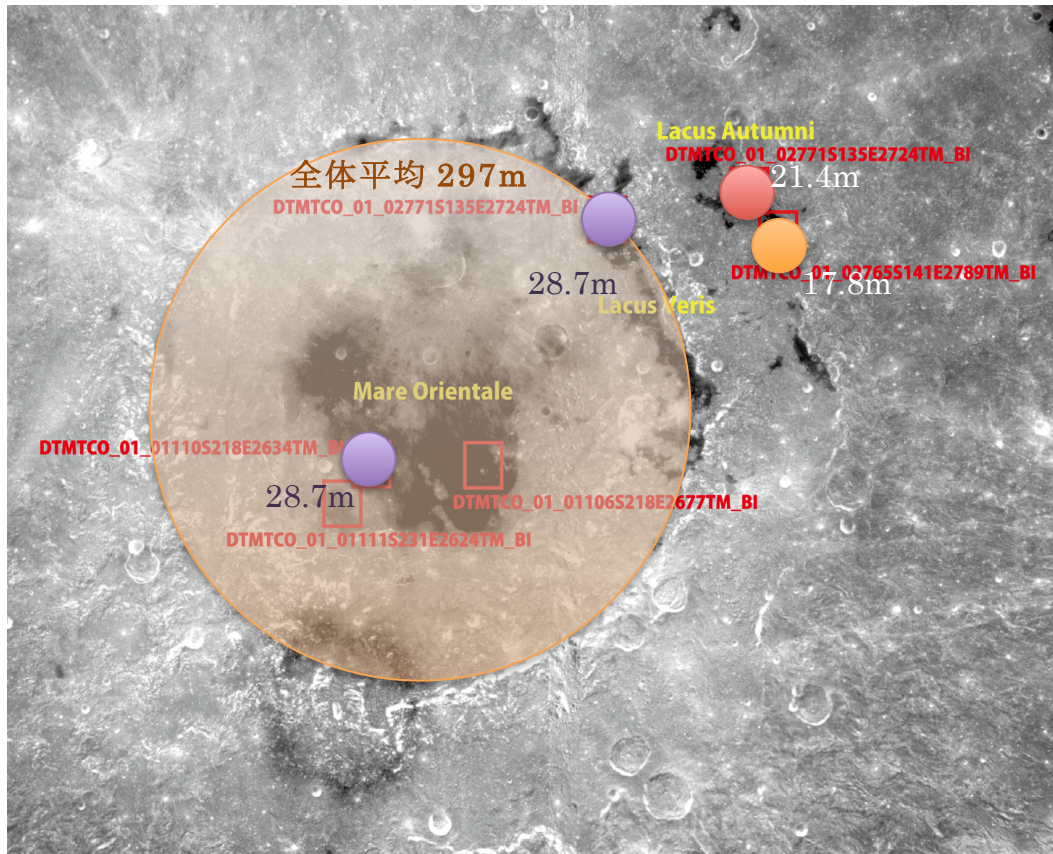


月のクレーターリム高さ R と直径 D の関係は先行研究から分かっている (Pike, 1980)

$$R = 0.036D^{1.014} \quad (D < 15\text{km})$$

Oriente 盆地全体、2、4~6 の海で見られたクレーター遷移が示しているのは、埋まらずにすむギリギリのクレーター直径である。

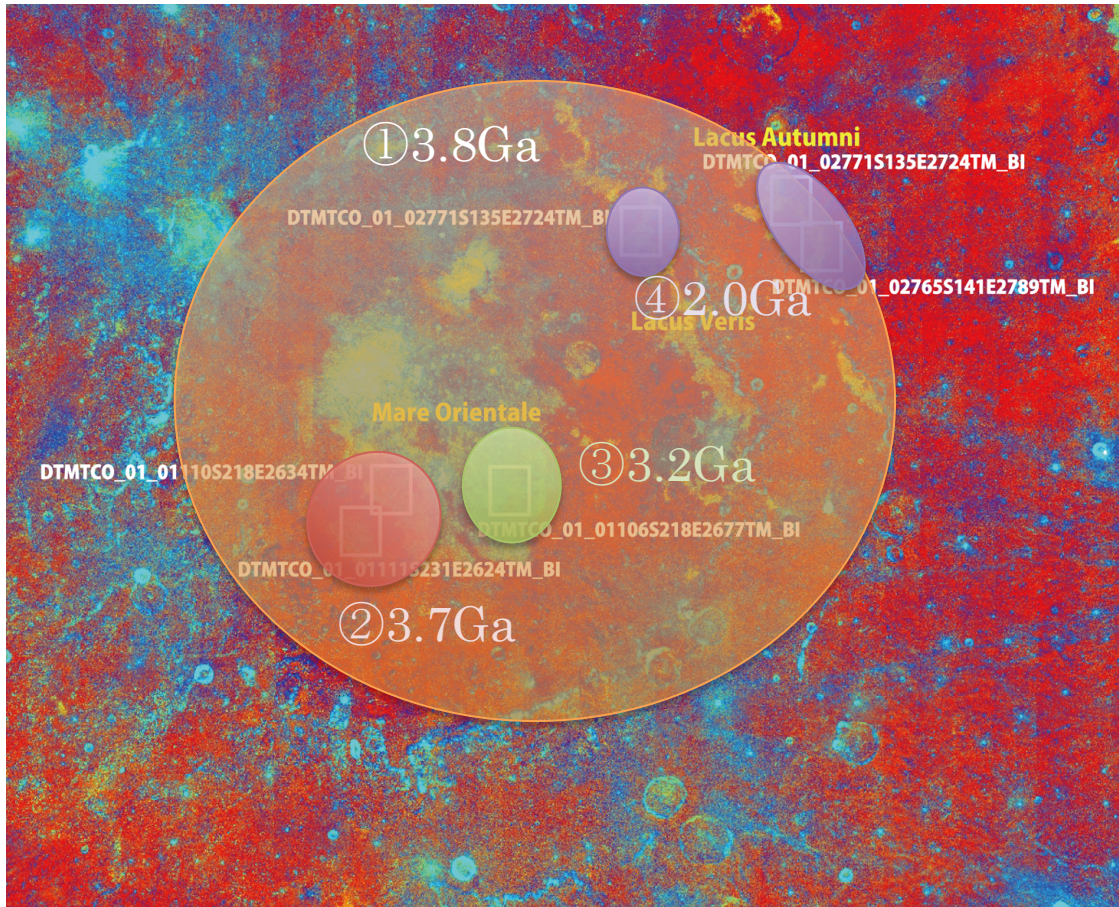
＝クレーター遷移の直径を式に代入すれば、マグマの厚さ (H) が計算できる。



- 盆地全体の平均は約 300m だが、Mare のみでは約 30m である。
→盆地のどこかに極端に深い部分があると考えられる。2 の領域はたまたま浅かった？
- 多重リング外側は約 20m で、中側の Mare より若干浅い。
→多重リングは内側と外側で約 10m ほど深さが異なることがわかる。

Orientele 盆地の形成・進化過程の推測：

以上の結果から、**Orientele 盆地の形成の時系列をまとめる。**



- ① 38 億年前：LHB（約 4.1-3.8Ga）の末期に **Orientele 盆地** 形成。
- ② 1 億年後（37 億年前）：月の火山活動期（約 4.5-3.0Ga）の中期に **Orientele 盆地** 南西部で **Mare** が形成。
- ③ 6 億年後（32 億年前）：火山活動期末期に **Orientele 盆地** 中央部で **Mare** が形成。反射率マップから、この時期に **Mare Orientale**（東の海）の大部分が形成されたと予測される？
- ④ 18 億年後（20 億年前）：**Orientele 盆地** の外側で **Mare** が形成。火山活動期は終了したと考えられているが、このことからもっと若い時代にも火山活動があったのではないかと推測される。これが、従来の火山活動期が継続していたのか、それとも第 2 の火山活動期があったのかは不明。

第四回惑星探査データ実習レポート: Orientale basinのクレーター年代

長 勇一郎

東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 修士二年

1. Introduction

Orientale盆地は、月の表と裏の境界付近に位置しており、そこでの火成活動を理解することは重要である。Orientale盆地の形成年代は木星探査機Galileoが取得した画像から、Greeley et al. (1993)によってTable 1のように見積もられている。本研究では、月探査機「かぐや」の地形カメラ(TC)によって取得された画像から、Orientale盆地とその内部の各mareの年代を独立に算出し、溶岩流の厚さを推定することによって火成活動の変遷と継続時間および規模を推定することを目的とする。

Table 1 Orientale盆地およびその内部の各地質ユニットのクレーター年代(Greeley et al., 1993)

Feature name	Model age [Ga]	+ error; - error [Ga]
Orientale Basin	3.84	+0.04;-0.05
Mare Orientale West	3.70	+0.03;-0.04
Mare Orientale Southeast	3.45	+0.05;-0.11
Mare Orientale South-central	3.70	+0.04;-0.06
Lacus Autumni	2.85	+0.37;-0.67
Lacus Veris	3.50	+0.05;-0.08

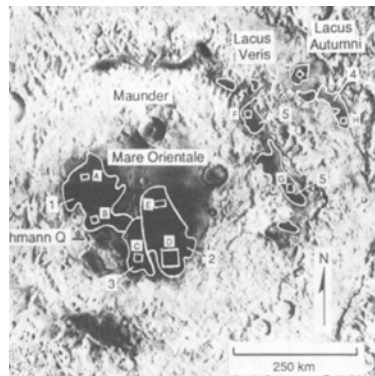


Fig. 1 Greeley et al. (1993)で解析が行われた領域

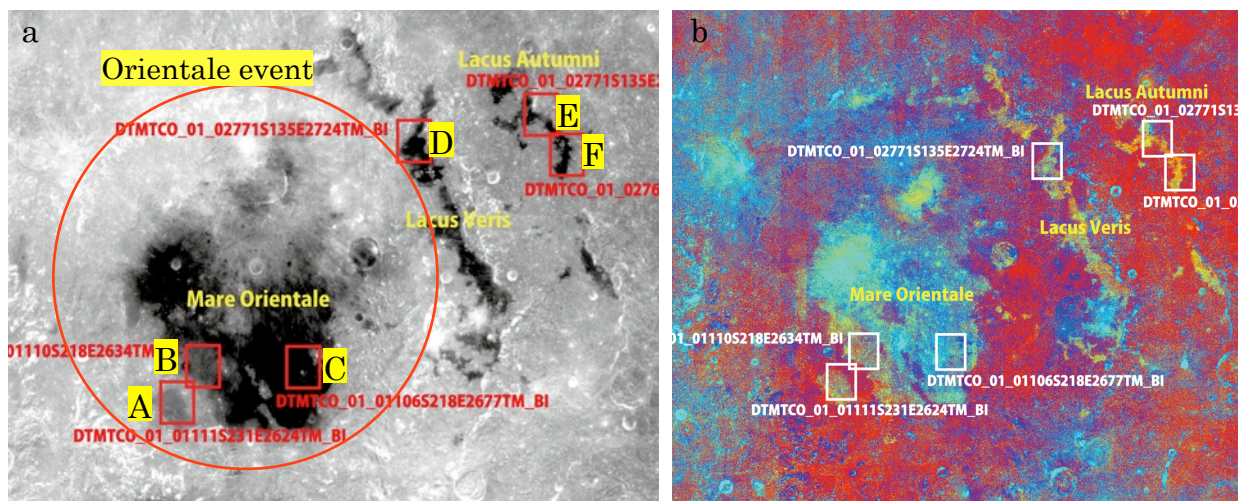


Fig. 2 本研究によるクレーターカウンティングの対象領域. TC画像(a), Clementineバンド比疑似カラー画像(b).

2. Methods

今回解析した地点は次の地域である(Fig. 2a): 盆地の第一のリム内側領域全体, Mare Orientale南西の海(A), Mare Orientale西部(B), Mare Orientale東部(C), Lacus Veris (D), Lacus Autumni (E,F). 領域B, Cは同じMare Orientaleに属しているが, Clementineによるスペクトル観測(Fig. 2b)から, 海を構成する溶岩の組成が異なることが示唆されている(領域BはFeに富み, 領域CはFeが少なくTiが多い). このため, 噴出時期に違いがある可能性を想定し, 二箇所を調べた. またLacus Autumniは, Table 1に示されるように他のmareと比較して有意に若く, またモデル年代の不定性も大きいため, 二つの領域をとって調べた.

解析の手順は以下の通りである. まず, .fits形式に変換された月面画像ファイルをDS9と呼ばれる画像解析ソフトに読み込んだ. これらの画像は, 月探査機「かぐや」の地形カメラ(TC)によって得られたものである. このソフト上でクレーターと考えられる円形の窪地を目視で探し, リムに沿って円を描くことによってクレーターをカウントした(Fig. 3). それぞれの円の半径はテキスト情報として書き出すことができるので(.regファイル), それを予め提供されていたperlスクリプトに通して処理し, クレーター年代

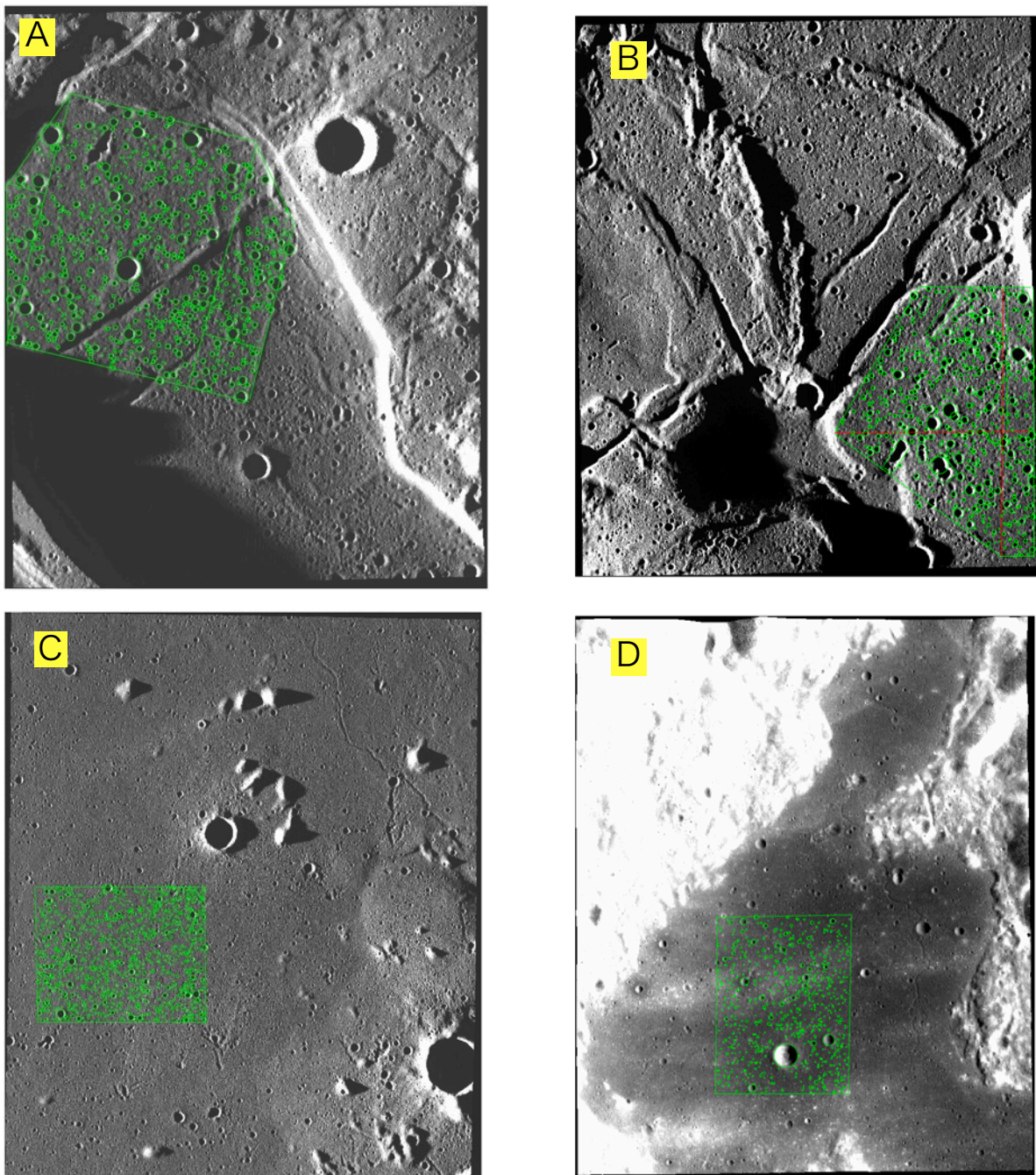


Fig. 3 クレーターカウンティングの対象領域. 緑色の多角形がカウント領域, 円がクレーターである.

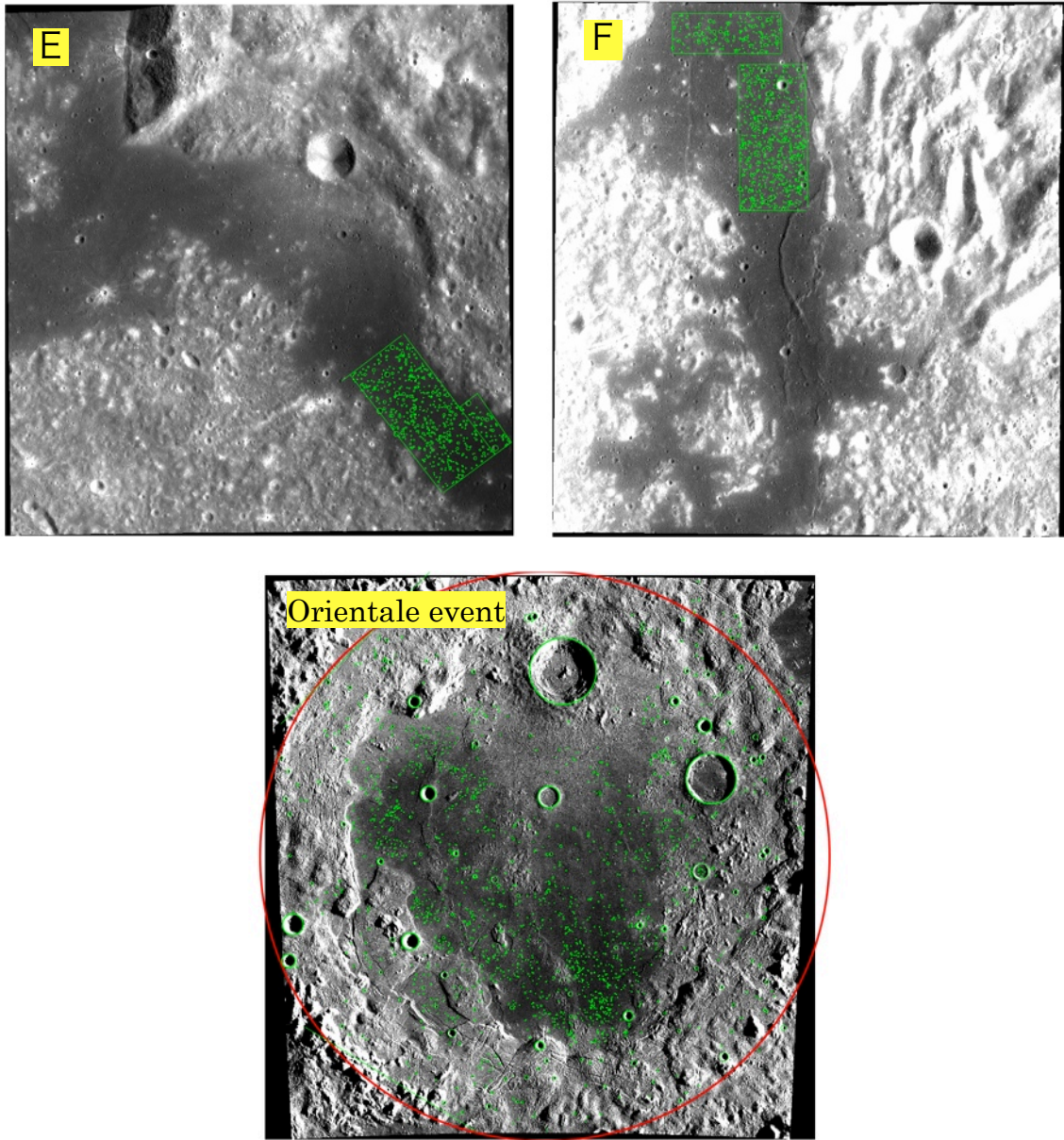


Fig. 3 クレーターカウンティングの対象領域(continued).

解析アプリケーションに対応する.stat形式のファイルを得た. このとき, 画像の1 pixelが10 mに相当することをを用いて, カウンティング領域のピクセル数から同領域の面積を求めた. なお, 明らかな二次クレーターの特徴を示すクレーターはカウンティングから除いてある.

次にこれらの.statファイルをcraterstat2と呼ばれるソフトに読み込み解析を行う. craterstat2とはIDL Virtual Machine上で動作するアプリケーションであり, カウントしたクレーターのサイズ頻度分布関数を生成したうえで, 各種production function, cratering functionに応じたアイソクロンにフィッティングすることができる. この方法を用いて対象地域のクレーター年代を求めた. なお, クレーター年代のモデルにはNeukum (1983)によって提案されているproduction functionおよびcrater functionを用いた.

3. Results

各領域に対して得られたクレーターカウンティングの結果を, クレーターの累積サイズ頻度分布としてFig. 4に示す. 図中の実線はフィッティングを行ったクレーター直径の範囲を示し, その結果得られたモデル年代が誤差と共に記されている. クレーターの生成数はポアソン分布に従うと仮定し, エラー

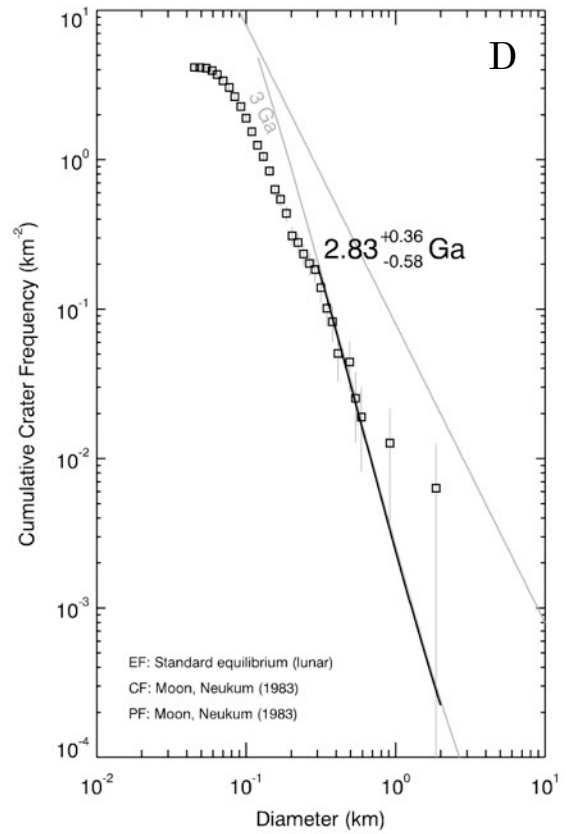
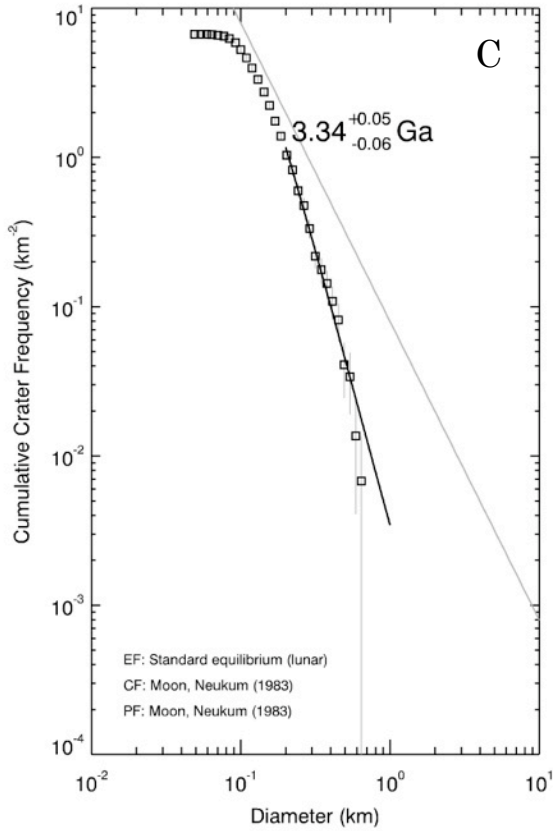
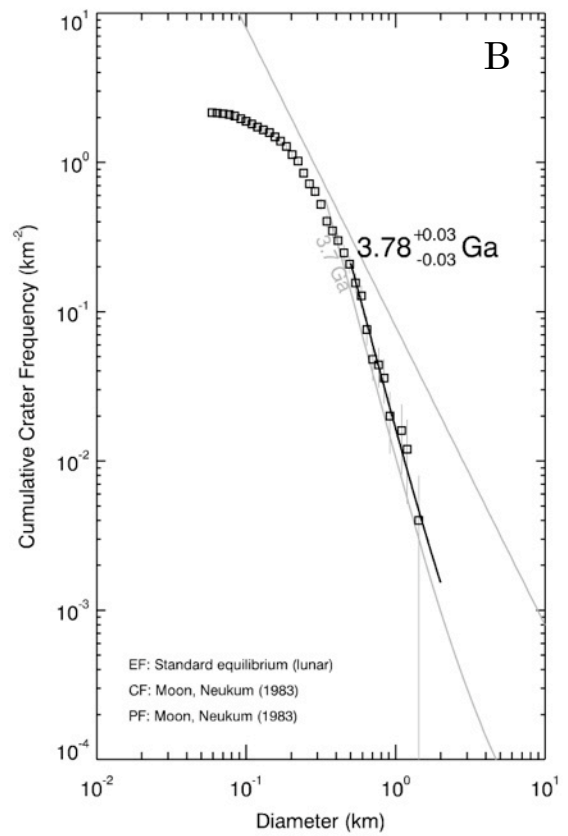
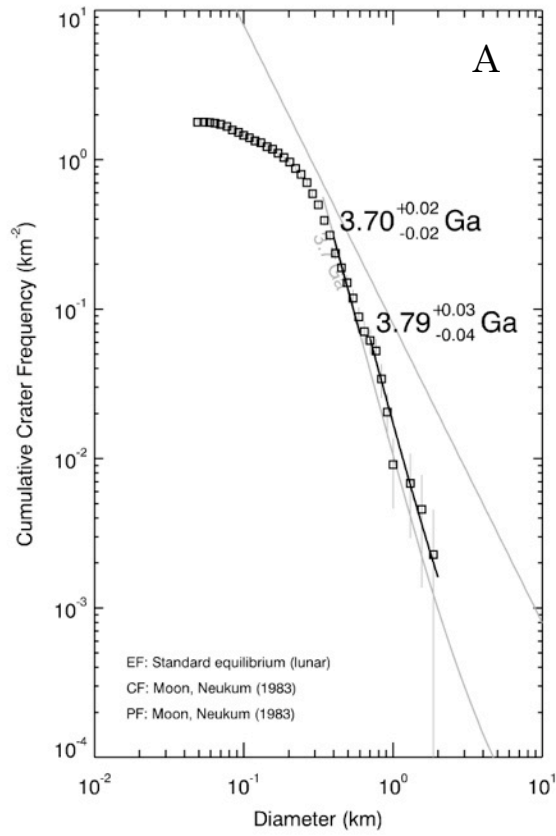


Fig. 4 各領域でのクレーターサイズ頻度分布. 黒い実線はフィッティングを行った部分を示し、数字はその結果得られた年代を誤差つきで表す. 右上の灰色実線はクレーターの生成が飽和した場合を表す.

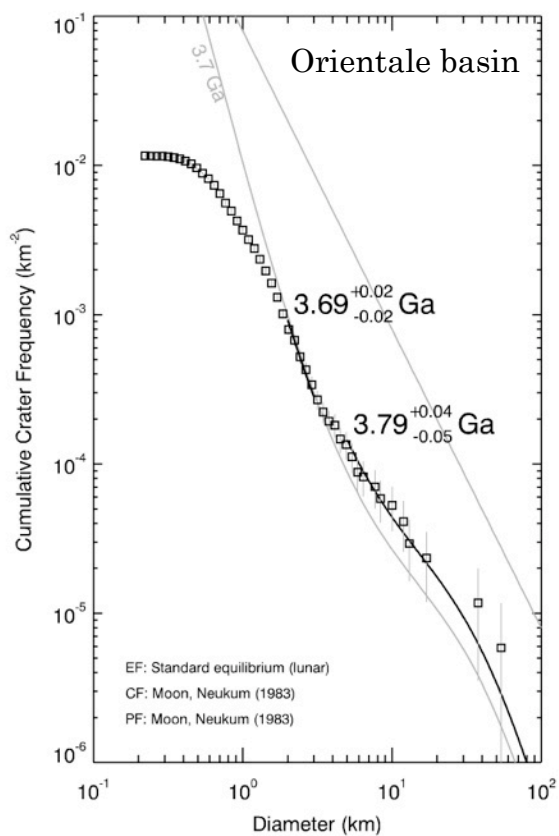
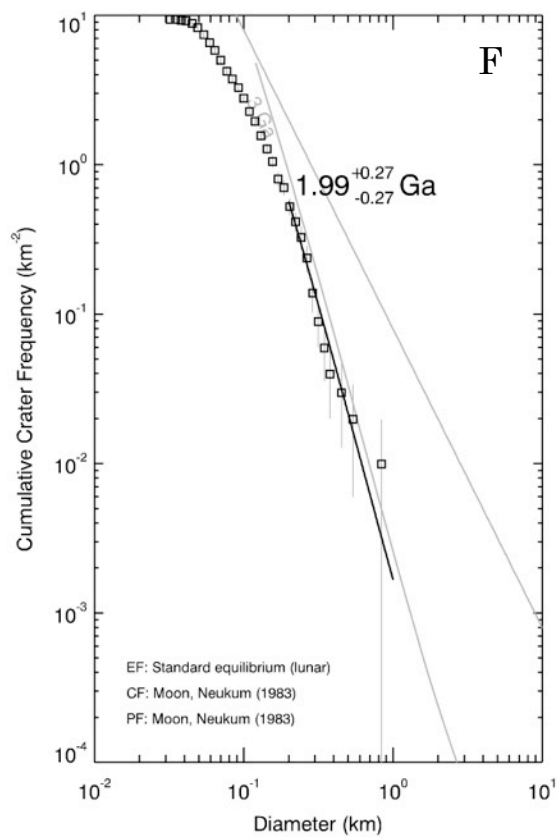
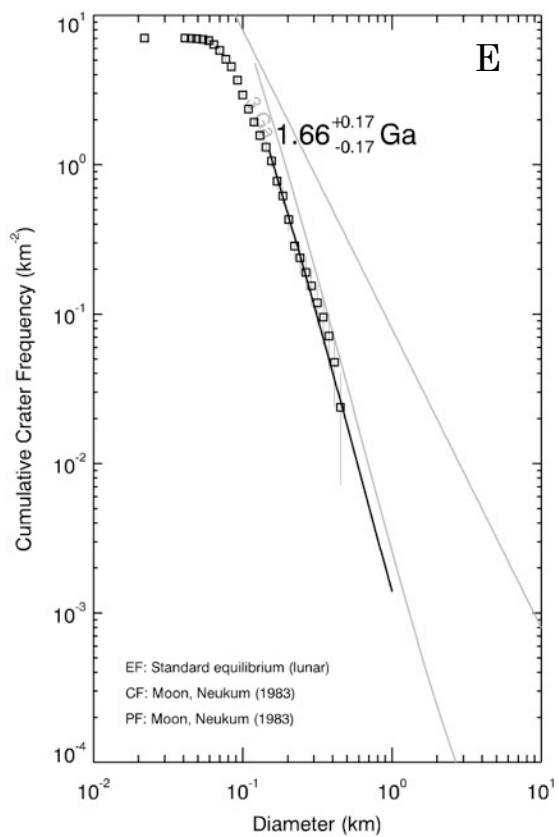


Fig. 4 各領域でのクレーターサイズ頻度分布(continued).

バーは $\log(N \pm N^{1/2})/A$ (N : クレーター累積個数, A : カウント領域面積)によって与えられる. 図中の最も右上にある灰色の実線は, クレーターの生成が飽和に達した際に到達するサイズ頻度分布を表す.

各領域について見ると, 先ずMare Orientaleの南西に位置する領域Aでは, 直径700 m付近にアイソクロンの遷移があるように見える. 700 mより大きなクレーターによってフィッティングした年代は3.79 Gaを示し, 350 m~600 mでフィッティングした年代は3.70 Gaを示す. 300 m付近でクレーター生成が飽和に達している恐れもあるため, 後者の年代値の信頼性については議論の余地があるものの, 衝突盆地の形成直後~1億年程度の間はこの海が出来た可能性が高い.

Mare Orientale西部である領域Bは, 直径約1.5 kmのクレーターから500 mのものまで比較的明瞭にアイソクロンに乗り, そのモデル年代は 3.78 ± 0.03 Gaである. 一方で500 mより小さいクレーターは飽和に達している可能性が高い. A, B両領域は Greeley et al. (1993)で年代を算出したMare Orientale Westとは位置的には比較的近いものの, スペクトルマッピングからは両者を構成する溶岩は異質であると考えられるため, 地質ユニットとしては異なっている可能性が高い.

Mare Orientale東部に位置する領域Cは, 200~600 mのクレーターで比較的良く3.34 Gaのアイソクロンに乗っている. これよりも大きなクレーターに関しては, 個数が少なく統計的な揺らぎが大きいためにフィッティング曲線からは逸脱しているが, これら数個のクレーターが算出された年代値に与える影響は小さいと考えられる.

領域DはLacus Verisの一部であるが, 顕著に巨大なクレーターがカウント領域内に入ったため, 直径1 kmより大きい範囲ではフィッティング曲線からはずれている. 150 m~500 mの範囲で求めた年代は, $2.83(+0.36/-0.58)$ と不定性の大きな値となった. 今後更に広い領域でクレーターカウントを行うことを検討している. 同時に, 150 m付近にサイズ頻度分布曲線の変曲点があるが, 150mより小さいクレーターの分布に良くフィットするアイソクロンを見つけることは出来なかった.

領域E, FはLacus Autumniに位置する二つのmareである. それぞれ約1.7, 2.0 Gaと若い年代を示した. この値はGreeley et al. (1993)と比べて非常に若いので, 月の火成活動を理解する上でより詳細に調査する価値があるものと思われる.

Oriente盆地の第一リング内側領域全体では, 5 km以上のクレーターは3.79 Gaのモデル年代を, それより小さいクレーターは3.69 Gaの年代を示した. 5 km以上の巨大クレーターの示す年代は, 盆地内での溶岩流の噴出によっても埋め立てられることの無かった, Oriente盆地それ自体のもつ年代であると解

Table 2 本研究の結果のまとめおよびGreeley et al.(1993)との比較

Feature name	Cumulative crater number	Area [km ²]	Model age [Ga]	
			This study/Greeley et al. (1993)	+ error; - error [Ga] This study/Greeley et al. (1993)
Oriente Basin	19757	1.7×10^5	3.79 /3.84	+0.04; -0.05 /+0.04; -0.05
Mare Orientale West (A)	784	4.4×10^2	3.70 /-	+0.02; -0.02 /-
Mare Orientale West (B)	539	2.5×10^2	3.45 /3.70	+0.05; -0.11 /+0.03; -0.04
Mare Orientale Southeast (C)	983	1.5×10^2	3.34 /3.45	+0.05; -0.06 /+0.05; -0.11
Mare Orientale South-central	-	-	-/3.70	-/+0.04; -0.06
Lacus Veris (D)	656	1.6×10^2	2.83 /3.50	+0.36; -0.58 /+0.05; -0.08
Lacus Autumni (E)	592	8.4×10^1	1.66 /2.85	+0.17; -0.17 /+0.37; -0.67
Lacus Autumni (F)	948	1.0×10^2	1.99 /2.85	+0.27; -0.27 /+0.37; -0.67

積できる。一方小さい方の3.69 Gaという値は、次のように解釈できる。盆地内のクレーターをカウントしてみると、比較的大きなクレーターの周囲では、そのエジェクタによって小さなクレーターが消されていたり、またリム付近では地形の凹凸の影響によってクレーターの存在が判別できない箇所も多かった。このような状況は年代を若くする作用があるので、3.69 GaはMare Orientaleのもつ年代の上限値と考えることができる。

以上の結果をTable 2にまとめて示す。比較のために、Greeley et al. (1993)による値を併記する。ここで、本研究とGreeley et al. (1993)では同じ溶岩流の中でもカウンティングを行っている場所が異なりうることに注意する必要がある。

4. Discussion

1. Orientaleの火成活動

今回得られた結果から、Orientale盆地および内部の海は、次のような時系列で形成されたと考えられる。まず、3.8 Ga前の衝突によってOrientale盆地が形成した。その後、Mare Orientaleの西方にある海(領域A, B)が数千万年の後に形成した。Mare Orientale (C)は衝突盆地の形成から1~3億年後に形成した。更に、衝突から数億~10億年ほどして、リングの外側の断層から溶岩が噴出しLacus Veris (D)が出来た。そこからさらに約10億年後の、現在より15~20億年ほど前に、更に外側にあるLacus Autumni (E, F)が形成された。この結果が正しいならば、Lacus VerisやLacus Autumni等に於いては、月の火成史からすると比較的最近まで溶岩の噴出が続いていたということになる。また、反射スペクトルからは、Mare OrientaleはTiに富むが両LacusはFeに富むという観察がなされている。そのため、これらの海を作った溶岩は時期的にも組成的にもかなり違ったものである可能性が高い。また、Mare Orientaleよりも先に西方の海が形成した理由としては、衝突点直下であるMare Orientaleでは火山活動が長期間に渡って活発であったのに対して、中央からやや外れた海では比較的噴出量が少なく、短時間で火成活動が終了したために古い年代を示すと解釈することができる。

2. 溶岩流の厚み

更に、これらの溶岩の厚みを推定することで火成活動の規模に対して考察を加える。Pike et al. (1970)によると、クレーターリムの地表面からの高さ R と直径 D との間には、

$$R = 0.036D^{1.014} \quad (D < 15 \text{ km})$$

という関係が成り立つ。溶岩流が地表に噴出すると、溶岩流の厚み t よりも浅いリムを持つクレーターは、リムの高い大直径のクレーターと比較して選択的に埋め立てられる。そのため大直径のクレーターは溶岩下の初期地表のモデル年代を呈すが、小直径のクレーターは溶岩流の年代を示し、アイソクロンの遷移が生ずることがある。つまり、クレーターサイズ頻度分布曲線においてアイソクロンの乗り変わる点でのクレーター径 D_{trans} を用いると、対象地域に広がる溶岩流の厚み t は、

$$t = 0.036D_{\text{trans}}^{1.014}$$

として推定することができる。Fig. 4からは、地域Dにおいて明らかなアイソクロンの遷移が見られる。このとき $D_{\text{trans}} = 250 \text{ m}$ と読み取ると、 $t = 9 \text{ m}$ となる。また、地域Aにおいて $D_{\text{trans}} = 700 \text{ m}$ と読み取れば、溶岩流の厚さは25 mとなる。一方でOrientale盆地全体でのアイソクロンの遷移は $D_{\text{trans}} = 4 \text{ km}$ の箇所で生じている。これは $t = 140 \text{ m}$ に相当する。Fig. 3を見ると、盆地内の大クレーター形成時のエジェクタによる小クレーターの消去効果や、地形の起伏が激しいリム部分周辺での小クレーター発見の難しさに伴うバイアスが影響してこの変曲点を作っている可能性も考えられるが、Mare Orientaleが大きな面積を占めていることや、この海がOrientale盆地を作った巨大衝突直下の掘削が顕著な場所に来ていることなどから考えて、Lacus Verisの約10倍に当たる140mという溶岩流の厚さは妥当であるように考えられる。Orientaleに関

する火成活動は、Mare Orientaleにおいて大規模で大量の溶岩が噴出し、その後断層に沿って、比較的少量のマグマが噴出したという描像を描くことが出来る。また、その他の海のクレーターサイズ頻度分布からは、有意と言うべき変曲点は見つけられなかった。これは、溶岩が噴出する以前に存在していたクレーターは火成活動によって全て消されてしまったか、カウンティング面積が小さいために、統計的に有意な数の大クレーターが存在していないためであると解釈できる。

5. Conclusions

本研究では月の火成活動のタイミングと規模について調べるために、Orientale盆地内のいくつかの海(Mare Orientale, Lacus Veris, Lacus Autumni, Mare Orientaleの西にある海)に対して、クレーターカウンティングによる年代推定を行った。その結果、Orientale盆地とそこに含まれる海の形成順序と火成活動の規模について、次のような描像が得られた。まずOrientale盆地が3.8 Ga前に巨大衝突によって形成された後、盆地中心からやや外れた西方の海から形成していき(衝突後数千万年~1億年)、1~3億年掛けて中央部のMare Orientaleが、100 m以上の厚さの溶岩を噴出して形成した。衝突から数億~10億年ほどして、リムの外側の断層に沿って10 m程度の溶岩が噴出してLacus Verisを形成した。そこから更に10億年ほど後の、今から約20億年前に、更に外側にLacus Autumniが形成した。これらのLacusは、Feに富んだ組成を持つと考えられるため、Tiに富むMare Orientaleとは時期も組成もかなり異なった火成活動の結果生じたものであると考えられる。

Acknowledgments

本実習会においては、講師の諸田智克氏、平田成氏、荒川政彦氏、中村昭子氏、小林直樹氏、神戸大学CPSの皆様には大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

References

- [1] Greeley, R. et al., 1993. Galileo imaging observations of lunar maria and related deposits., *J. Geophys. Res.* **98**, 17183-17205.
- [2] Pike, R. J., 1977. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon., *Impact and Explosion Cratering*. Pergamon Press, New York, 489-510.