

**SELENE(かぐや)画像データを
利用しての月面クレータ自動抽出
GUIツールの研究開発
(2020年度採用)**

**Study and Development of the
automatic crater extraction GUI tool
using SELENE (Kaguya) image data
(FY 2020)**

Junichi Haruyama 春山純一 (JAXA 宇宙航空研究開発機構)

Hirohide Demura 出村裕英 (Aizu University 会津大学)

Seiichi Hara 原誠一 (NTT data CCS)

目次(contents)

- ・背景

- クレータサイズ分布の調査による月面の年代決定
- クレータ抽出の自動化

- ・本研究開発

- クレータ自動抽出のGUIツールへの組み込み

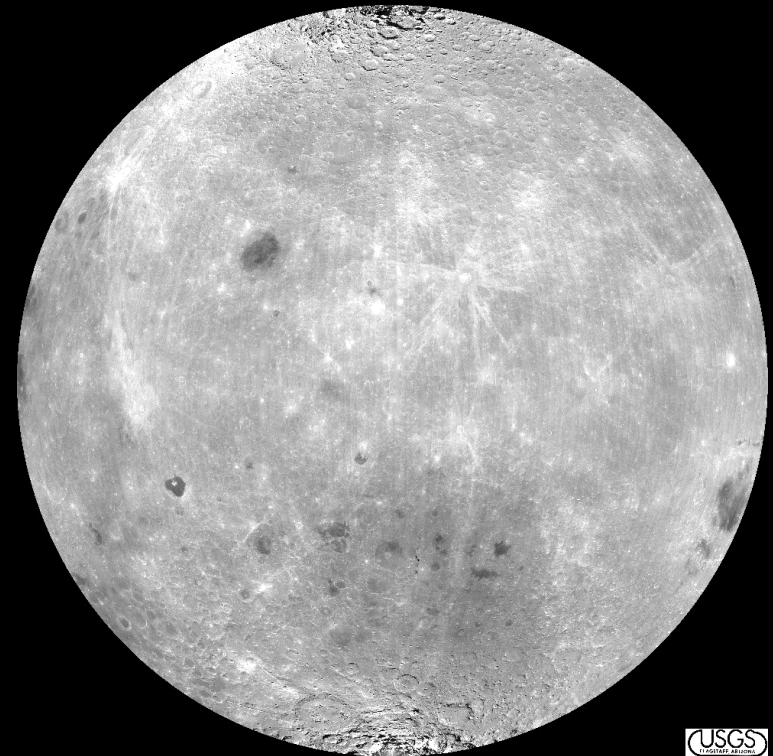
- ・今後の課題

クレータサイズ分布の調査による 月面の年代決定

表側
Nearside



裏側
Farside



主に、黒いところ(海)と白いところ(高地)に大別される
海:主に隕石衝突クレータが玄武岩溶岩に覆われた領域
高地:月形成時に浮き上がったできた斜長岩質領域

これらの地域は、同時にできた訳では無い
できた時期が異なる領域(地質領域)が
存在する

それぞれの地質領域が、いつできたのか、
時間軸を入れることが重要

例えば、各地域の海の各地質領域を調べることは、
月の火成活動の歴史、つまりは
月の熱的進化の歴史を理解する上で必須

月の海はいつできたのか？(1)

層序により
月表面の相対的な新旧を決める

ルナーオービター(I~V)計画: アメリカ (1966~1969)



有人月探査への準備を兼ねて

© NASA

アポロ計画(1969~1972)



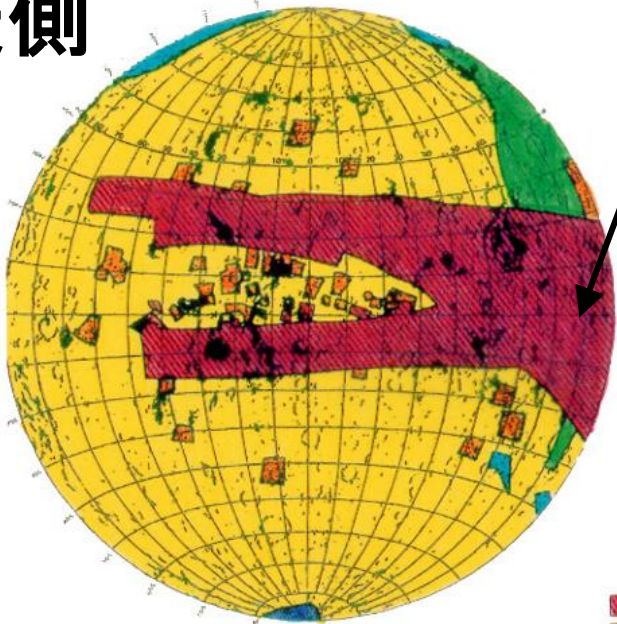
© NASA

サターンロケット(アメリカ)
全長110m 司令船と着陸船合計50t以上

ルナーオービター、アポロ計画での画像データ被覆

ルナーオービター、アポロ計画での画像データ被覆

表側



30-100m resolution

NEARSIDE

10 m resolution



裏側

100-300m resolution

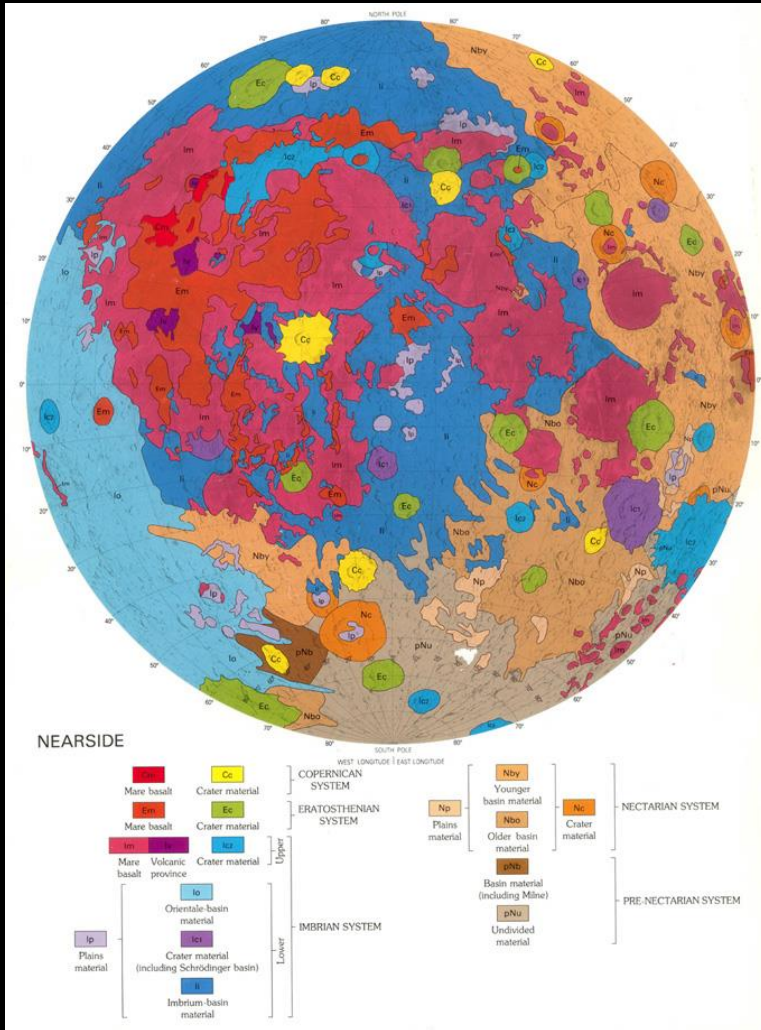
FARSIDE



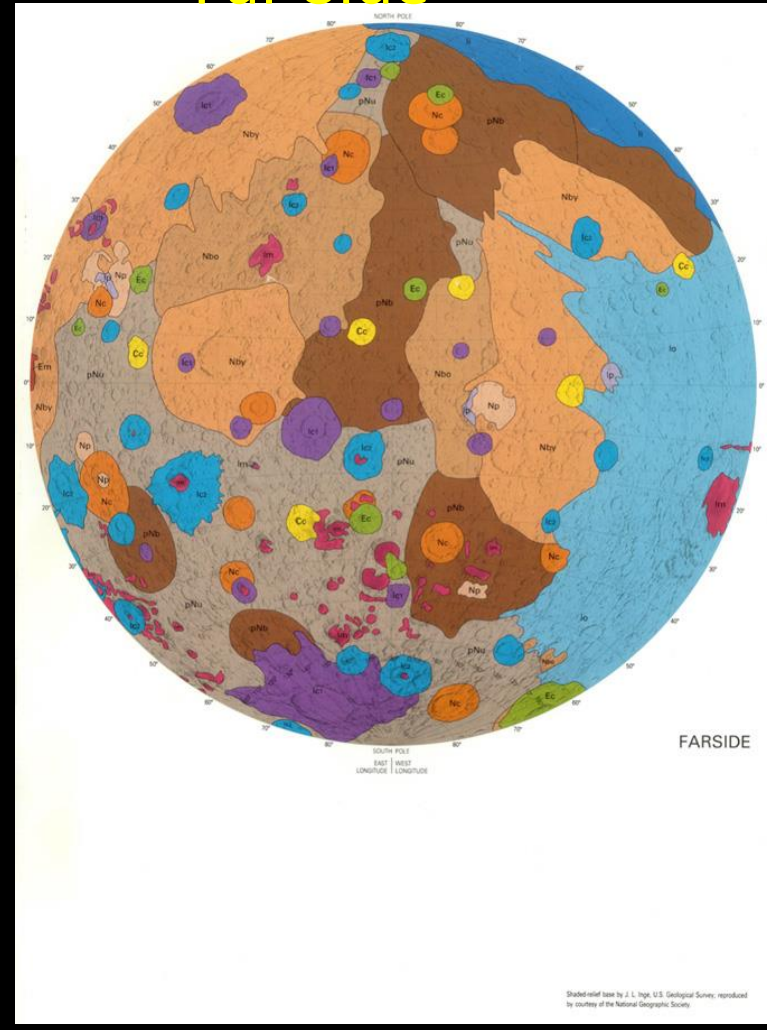
CURRENT IMAGING COVERAGE

ルナーオービター・アポロで得られていた相対年代 [Wilhelms, 1987].

Near Side



Far Side



月の海はいつできたのか？(2)

クレータの個数密度から
月表面の年代を決める

クレータ年代学

クレータの個数（数密度）からその地域の年代を決定する

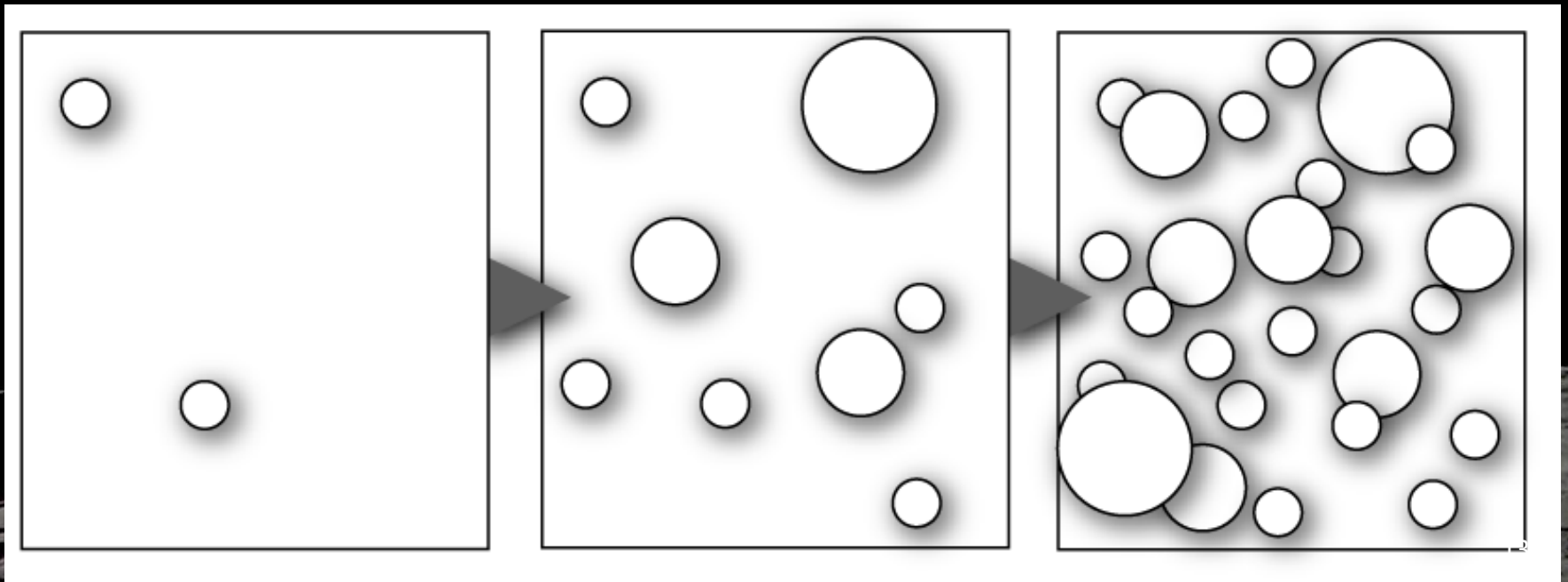
前提：古い地域ほど多くのクレータを保持している

サンプル採取場所のクレータの多寡を比較して年代推定式を導出

利点：岩石サンプルが得られていない地域でも

画像データから年代決定が可能

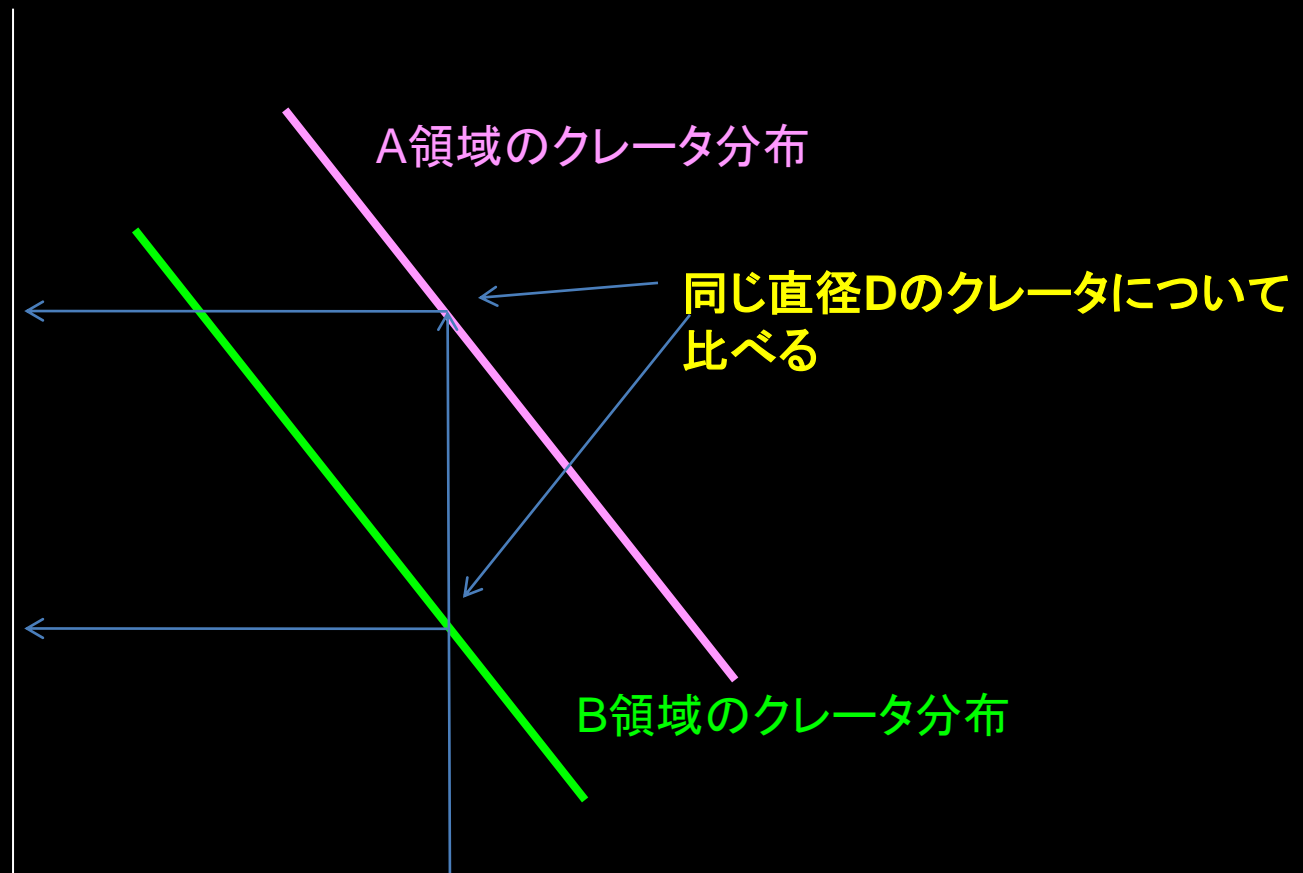
(©諸田)



クレータの直径と年代の関係

クレータの
積算個数密度
(log)

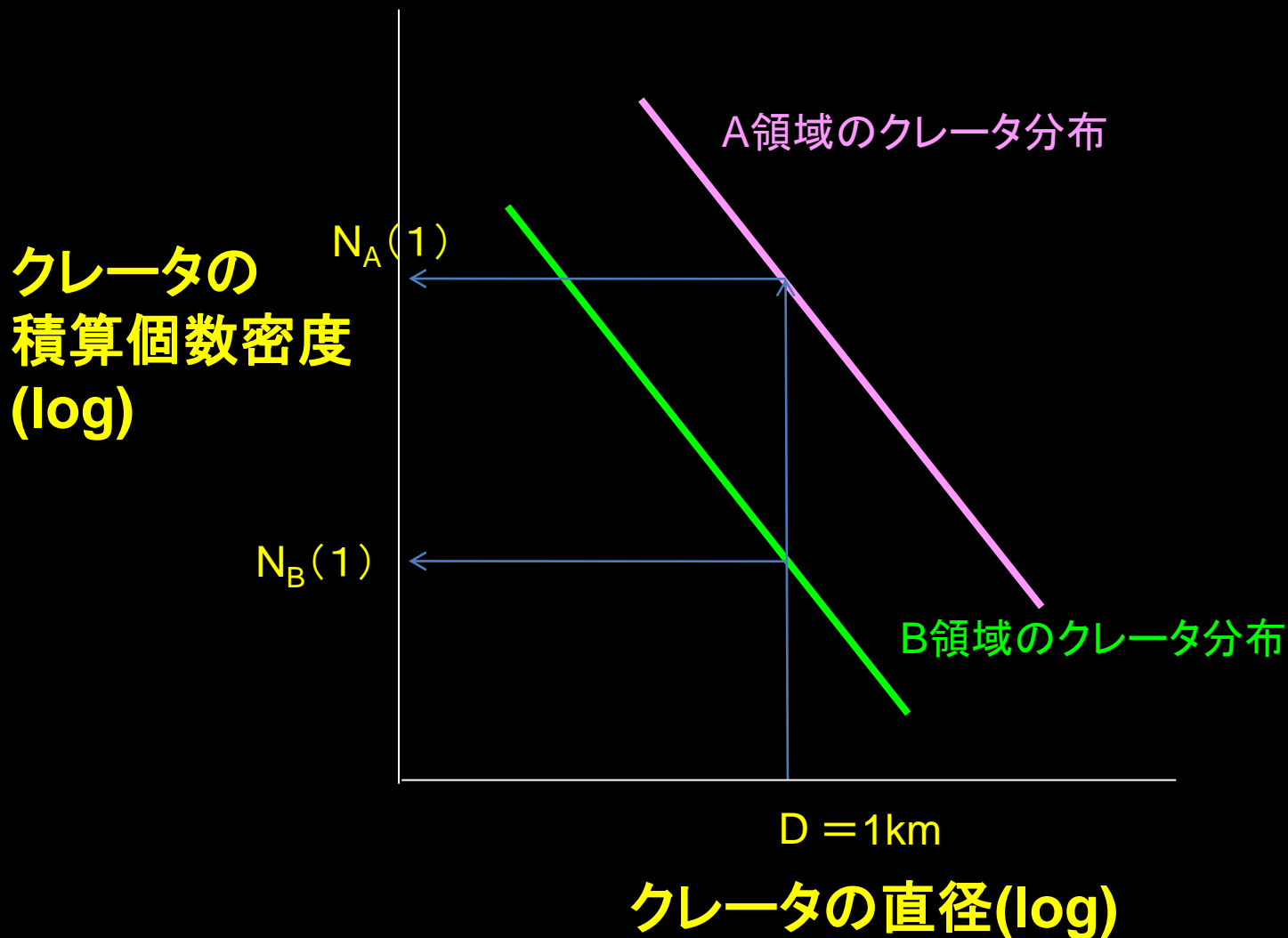
B領域の方が
少ない
= 若い



D

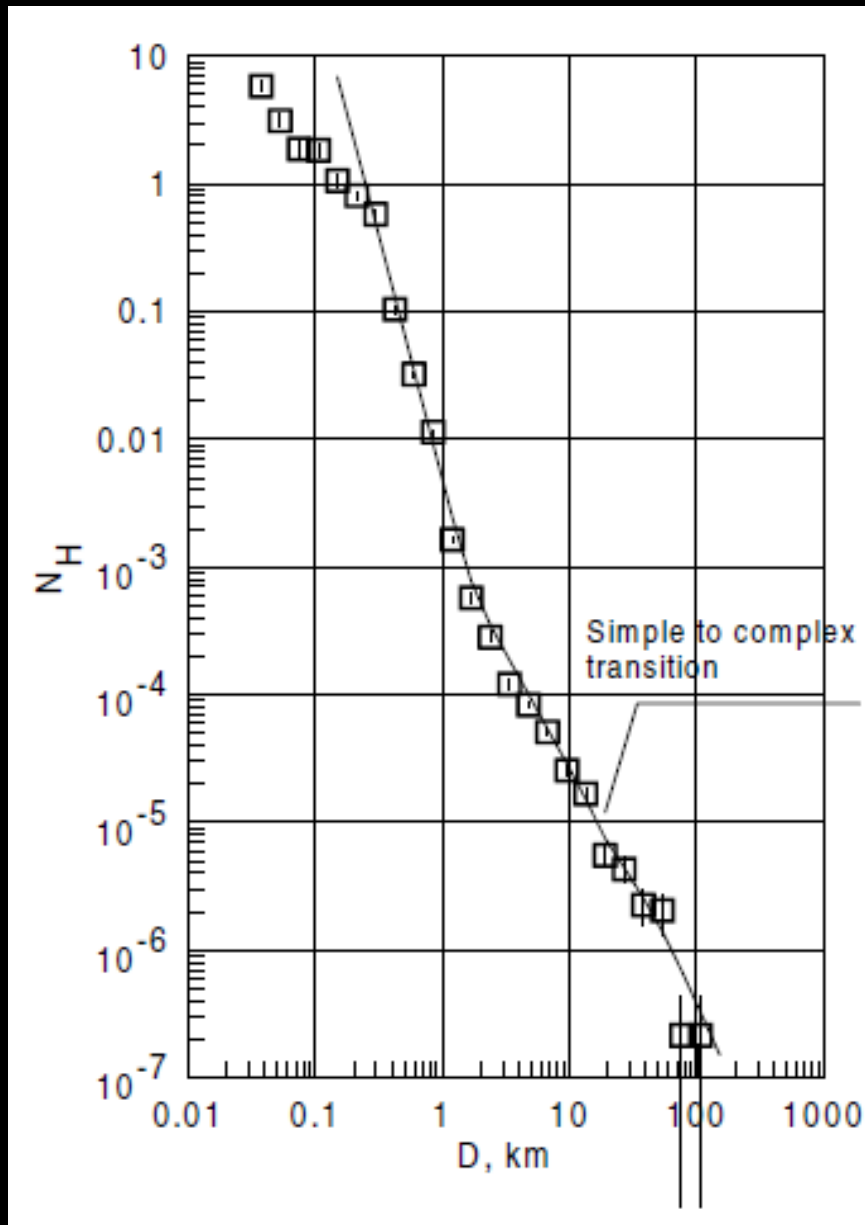
クレータの直径(log)

クレータの直径と年代の関係



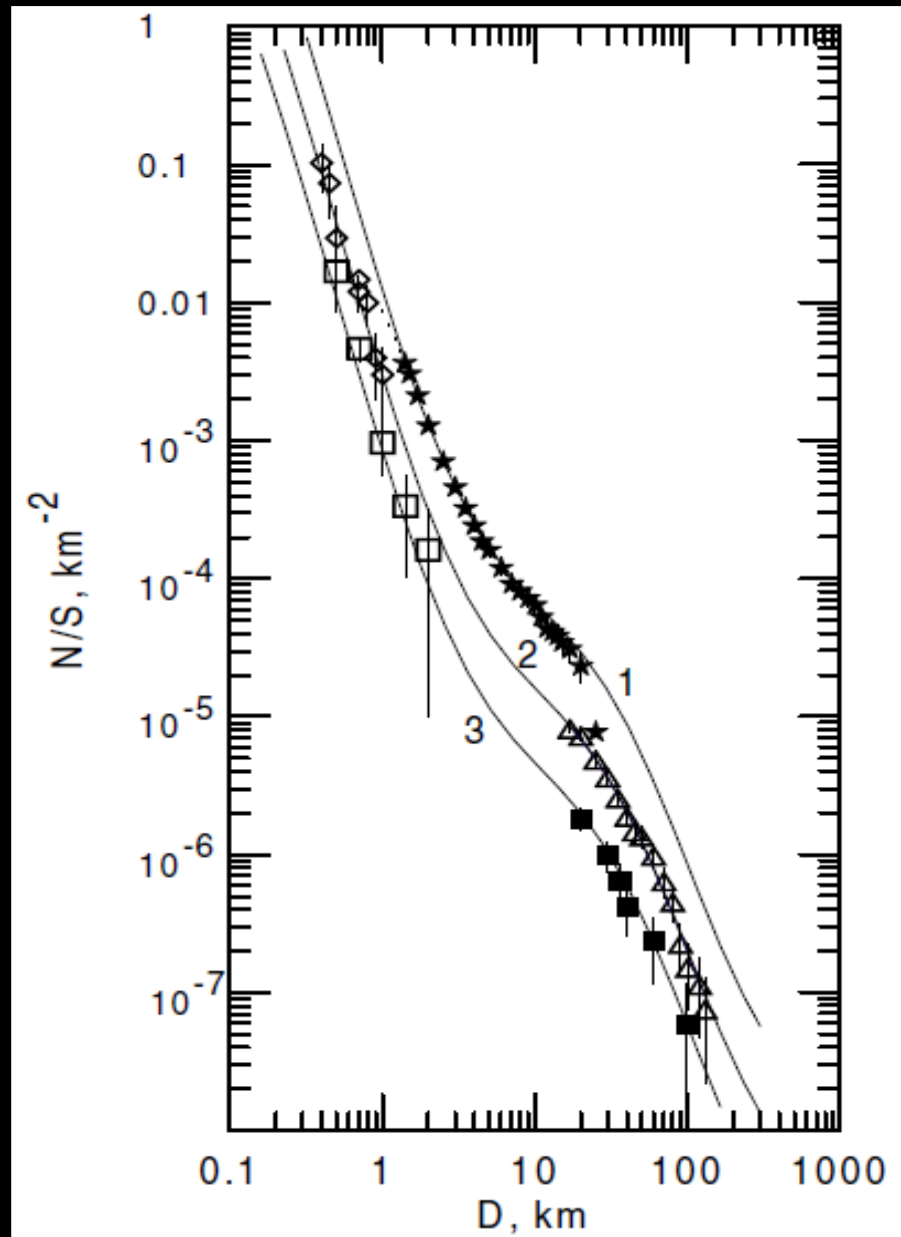
$N_A(1)$ や $N_B(1)$ の領域でサンプルがあれば、その絶対年代を決定できる。こうしてできた $N(1)$ -形成時期の関係をもとに、 $N(1)$ を調べて形成年代を推定することができる(クレータ年代学)

クレータ個数密度測定例



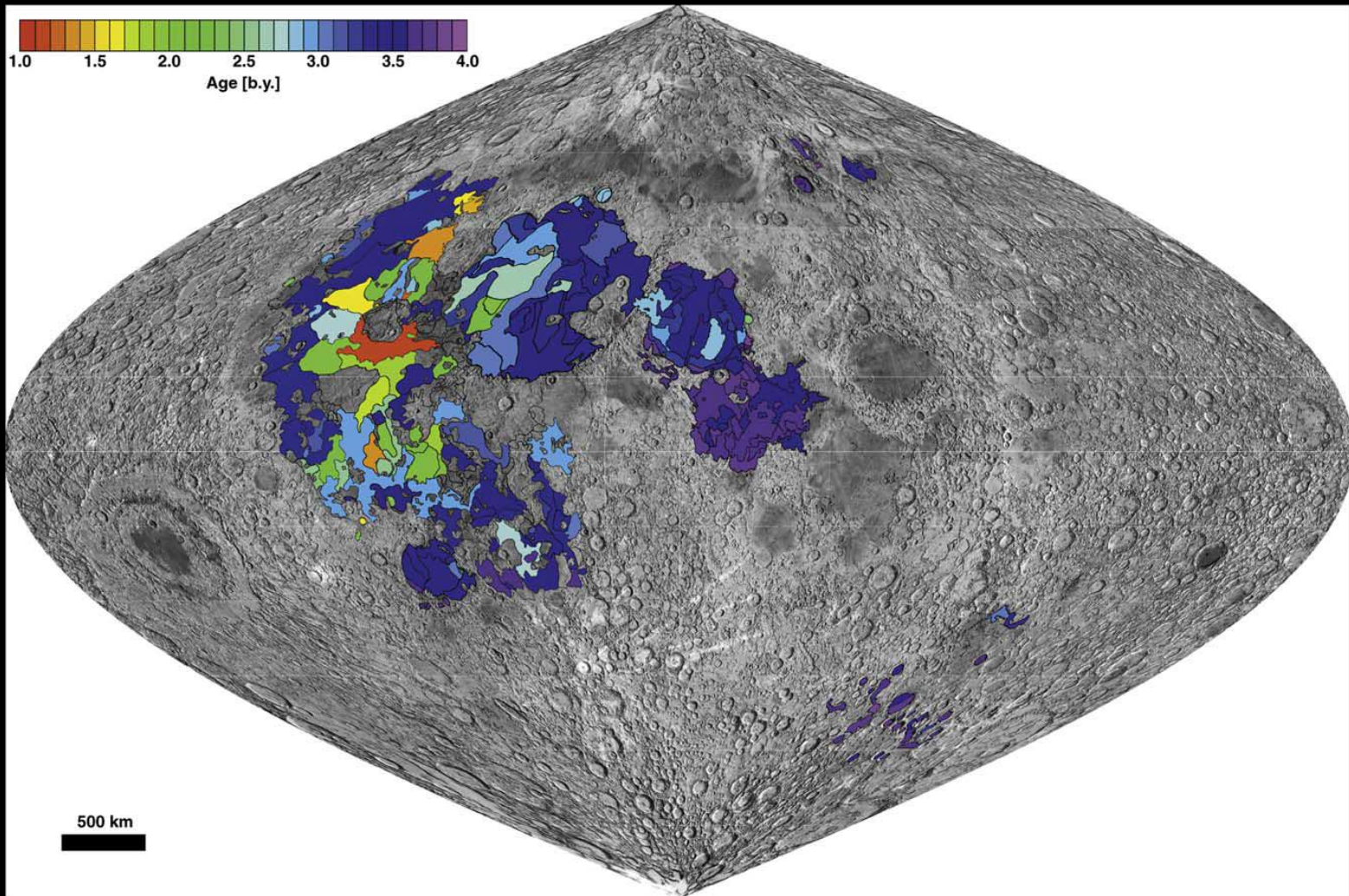
Neukum, Ivanov
and Hartmann
(2001)

クレータ個数密度測定例



Neukum, Ivanov
and Hartmann
(2001)

先行研究 Crater Chronology: Model Age of the Near-side

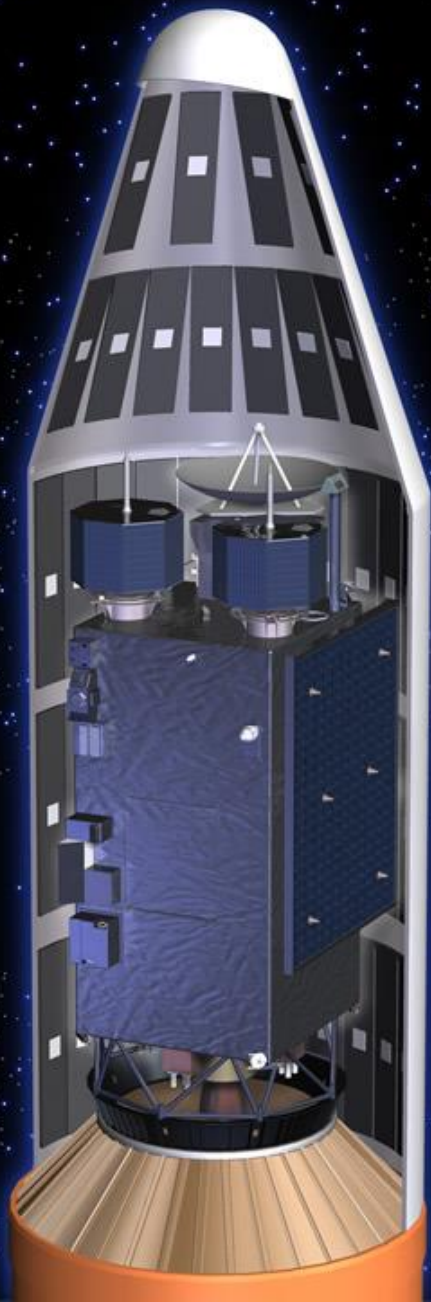


Hiesinger et al. 2003

月に2トン(最大で7~8トン)の
探査機を送り込めるH-2



1994年 2月 4日



Kaguya かぐや

正式の名を **SELENE (セレーネ)**
ギリシャ神話に登場する月の女神の名
「かぐや」は、ニックネーム

SELenological and ENgineering Explorer

月の理学と工学の探査機

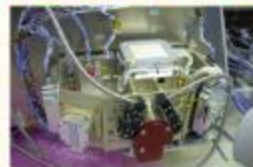
元素・鉱物分布を調べる



ガンマ線分光計(GRS)



蛍光X線分光計(XRS)



スペクトルプロファイラ(SP)



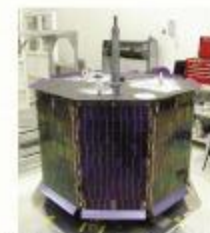
地形カメラ(TC)
マルチバンドイメージャ(MI)



月レーザーサウンダー(LRS)



レーザー高度計(LALT)

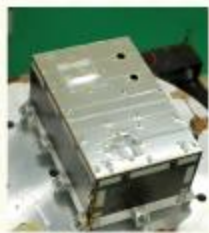


リレー衛星(RSAT)
VLBI電波源(VRAD)
電波科学(RS)

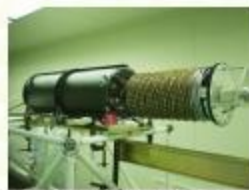
地形・表層構造を調べる

重力を調べる

月環境を調べる



粒子線計測器(CPS)

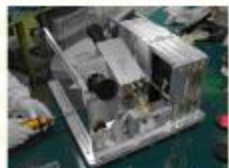


月磁場観測器(LMAG)



プラズマ観測装置(PACE)

精細画像



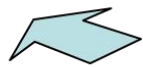
ハイビジョンカメラ(HDTV)

地球を調べる

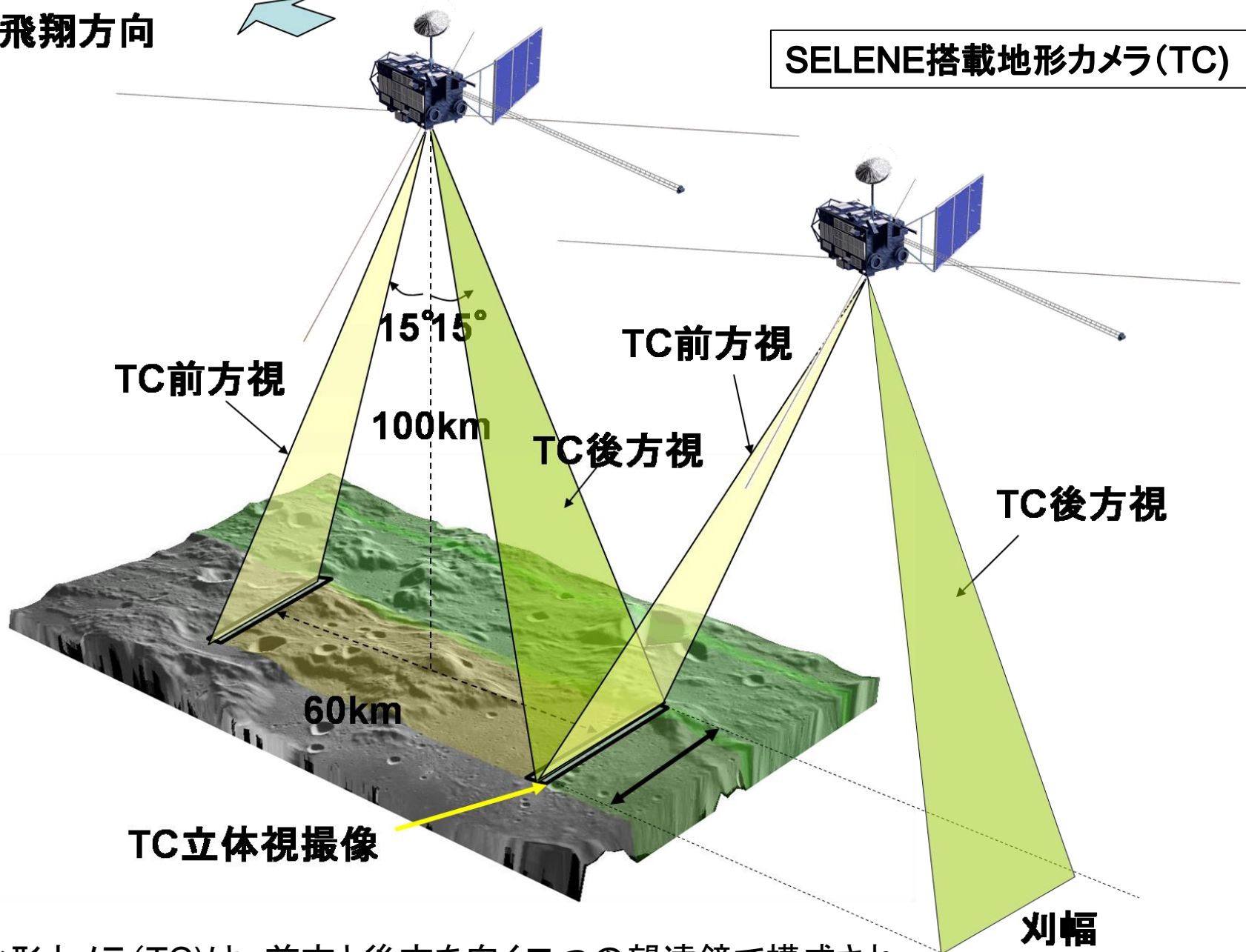


プラズマイメージャ(UPI)

衛星飛行方向



SELENE搭載地形カメラ(TC)

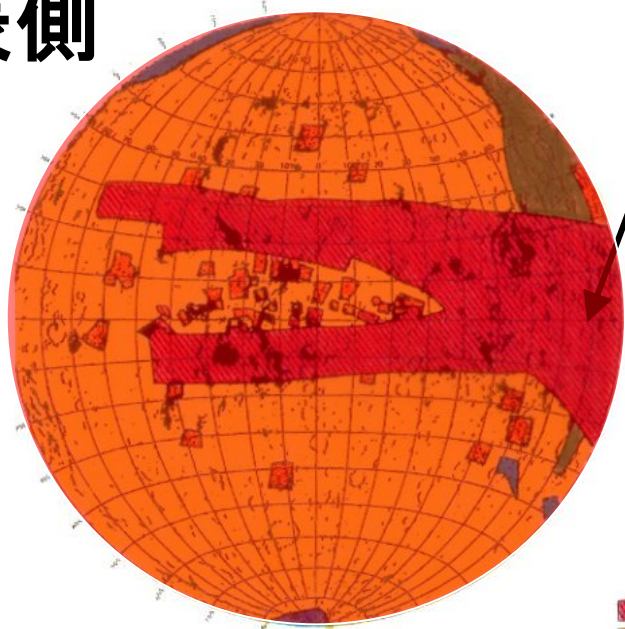


地形カメラ(TC)は、前方と後方を向く二つの望遠鏡で構成され、
10mの解像度で月面の立体視データを取得する

刈幅
40km~16km
(モードによる)

SELENE後の画像データ被覆

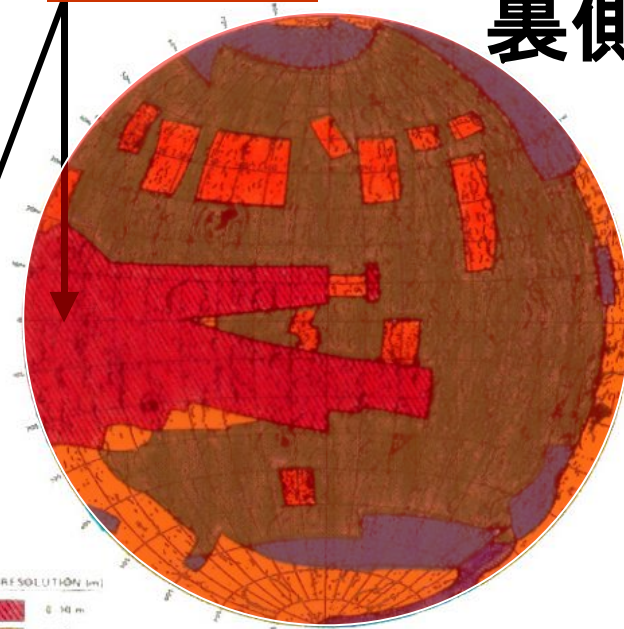
表側



NEARSIDE

10 m resolution

裏側



FARSIDE



CURRENT IMAGING COVERAGE



2007 9 14



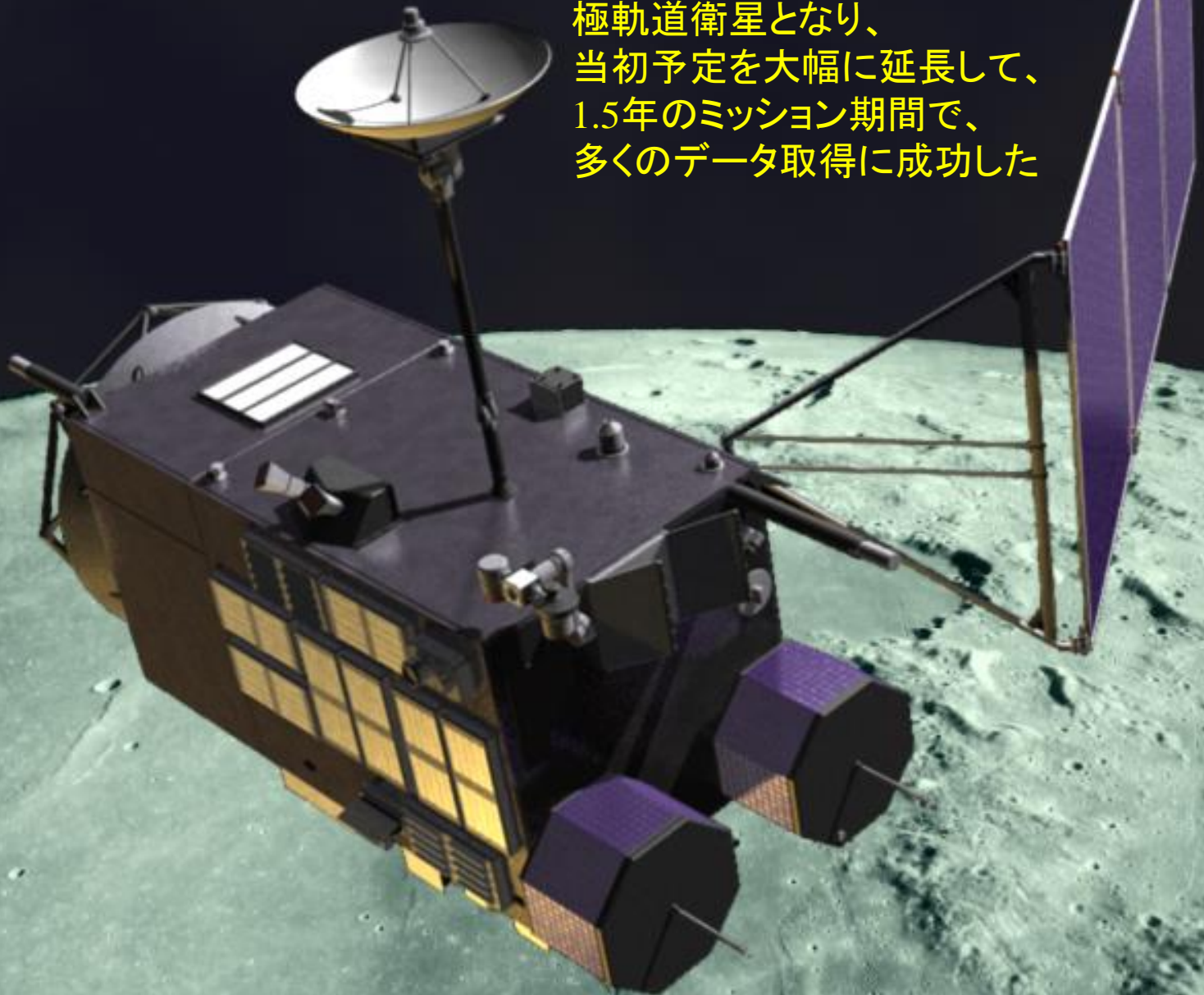
2007 9 14
10:31 (JST)



10年以上の長きにわたる開発期間を経て、SELENEは月へと飛び立っていった

SELENE

SELENEは予定通り
極軌道衛星となり、
当初予定を大幅に延長して、
1.5年のミッション期間で、
多くのデータ取得に成功した



月の裏側

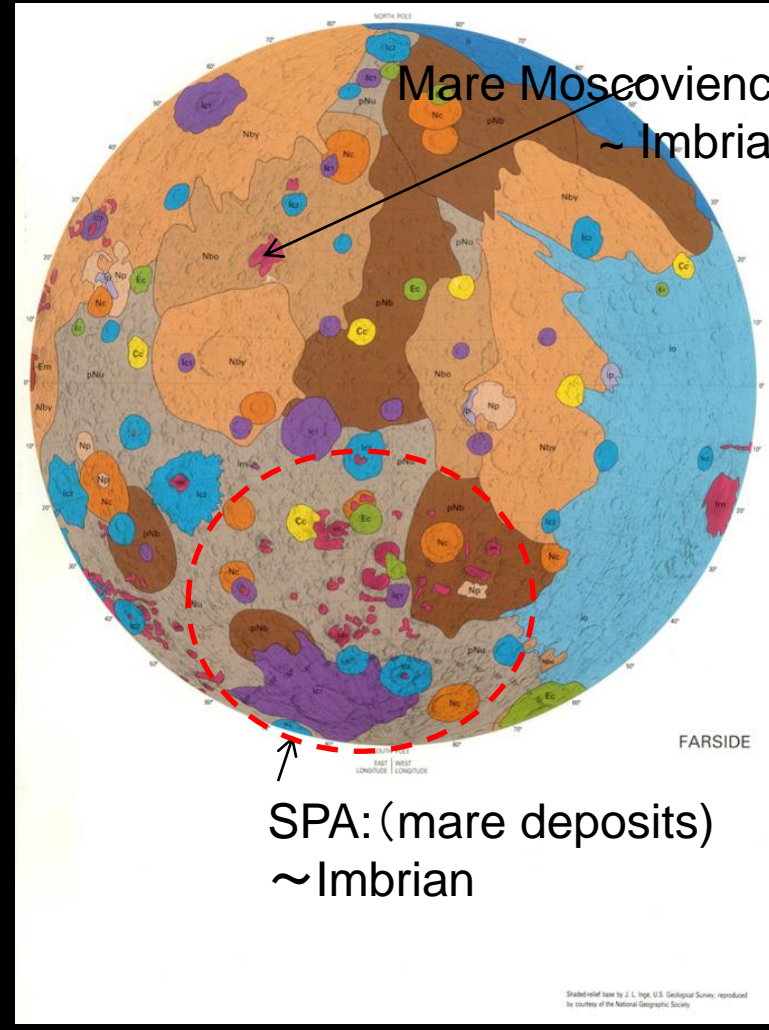
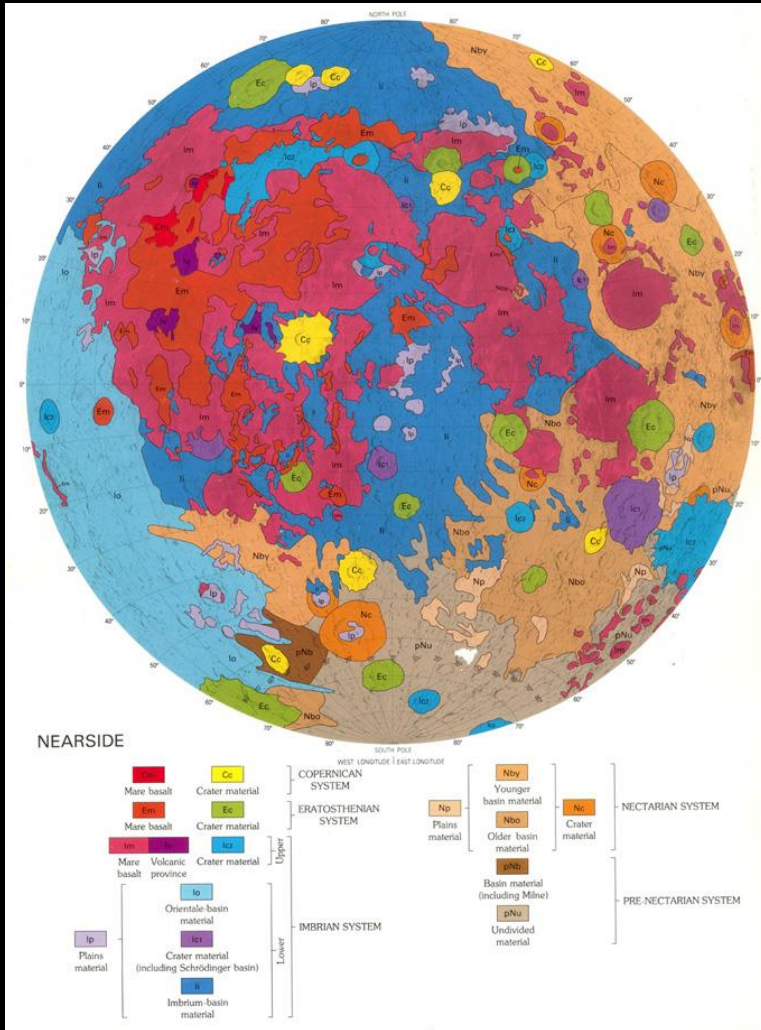
Image Coverage before SELENE

[Wilhelms, 1987].

Not including data from Clementine, Smart-1

Near Side

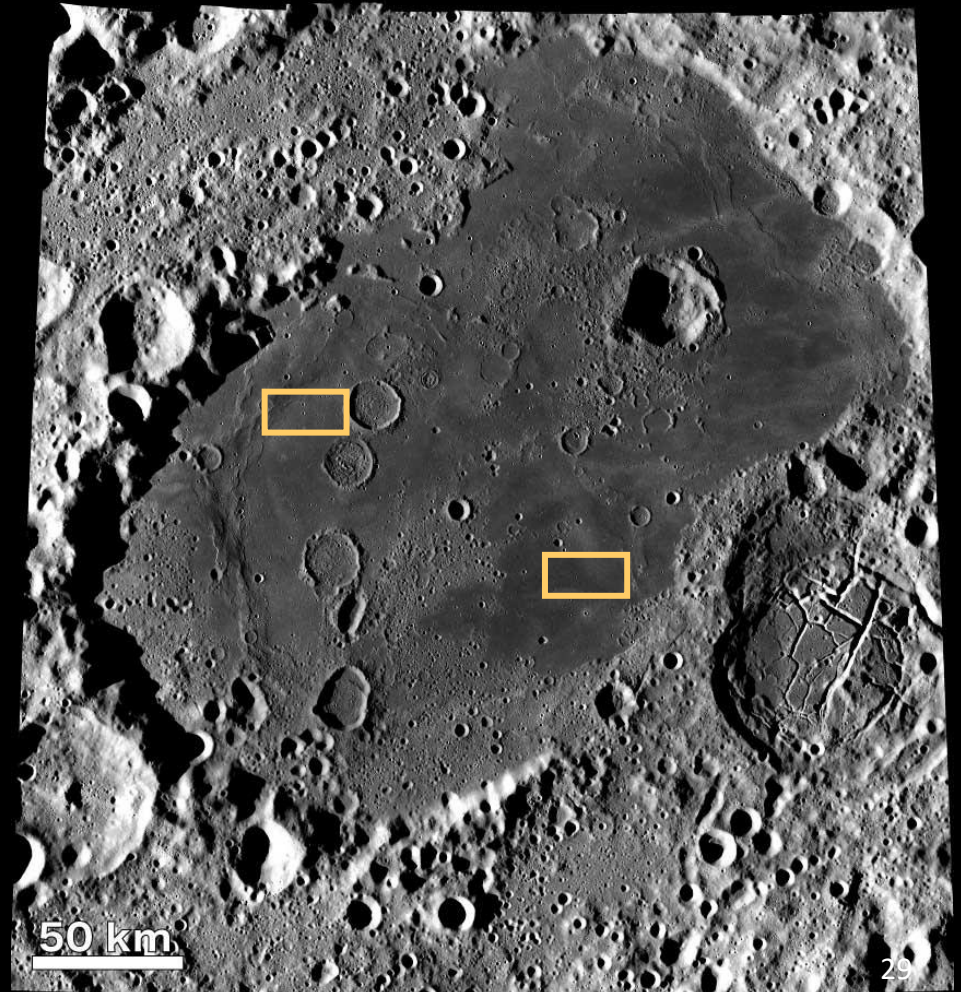
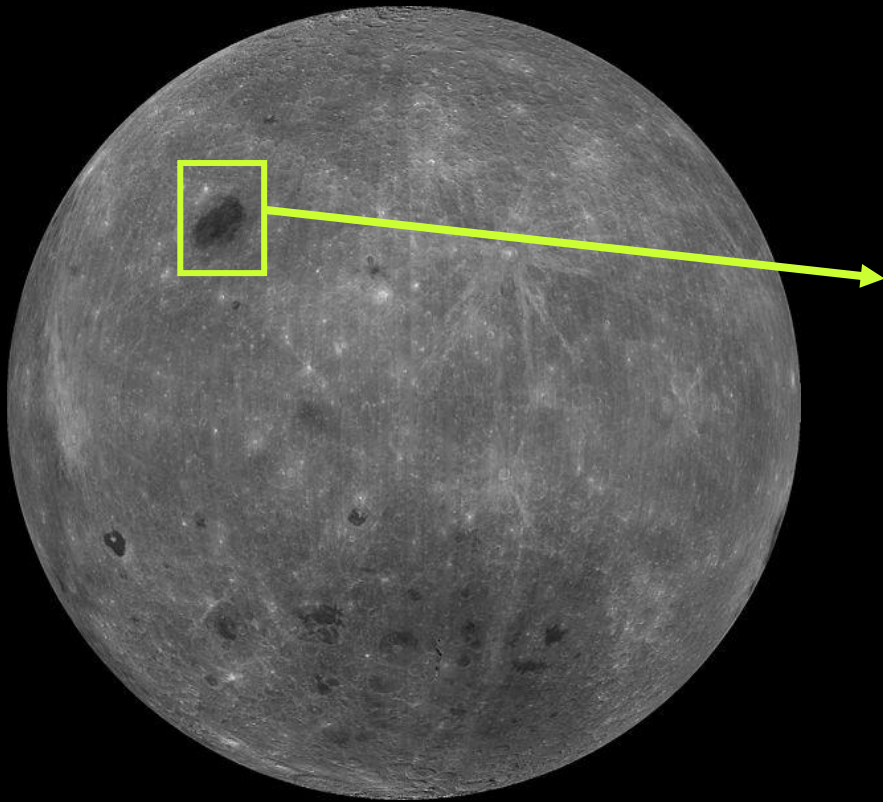
Far Side



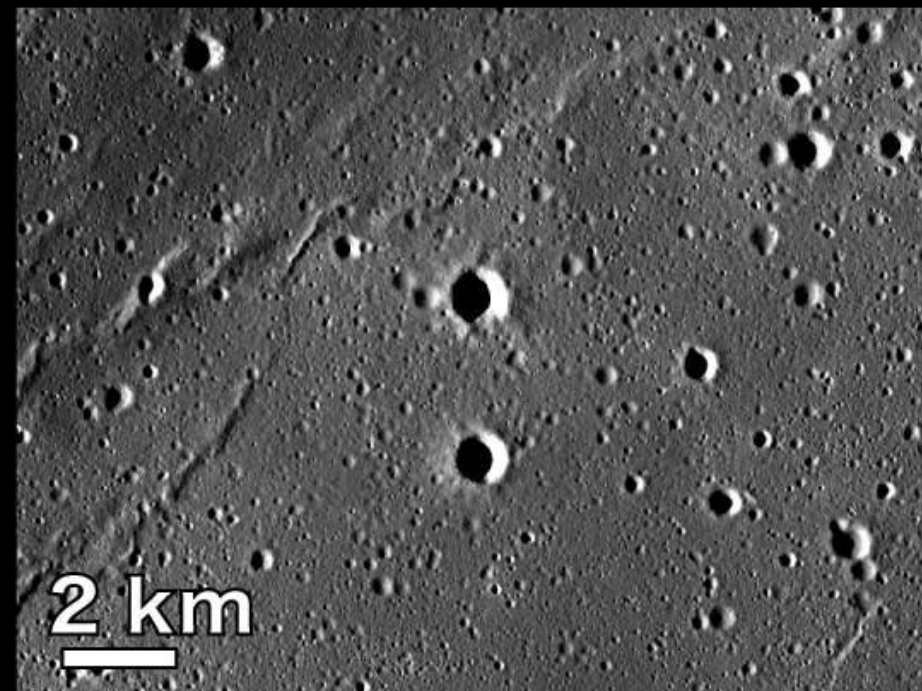
Shaded-relief base by J. L. Igoe, U.S. Geological Survey; reproduced by courtesy of the National Geographic Society.

地形カメラによる月の裏側の年代測定

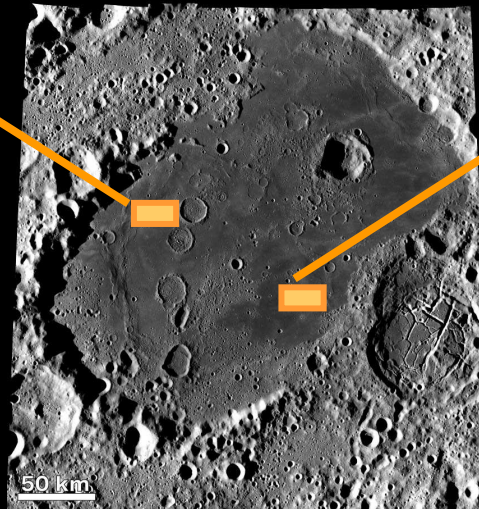
月の裏側



モスクワの海 の場所ごとの年代



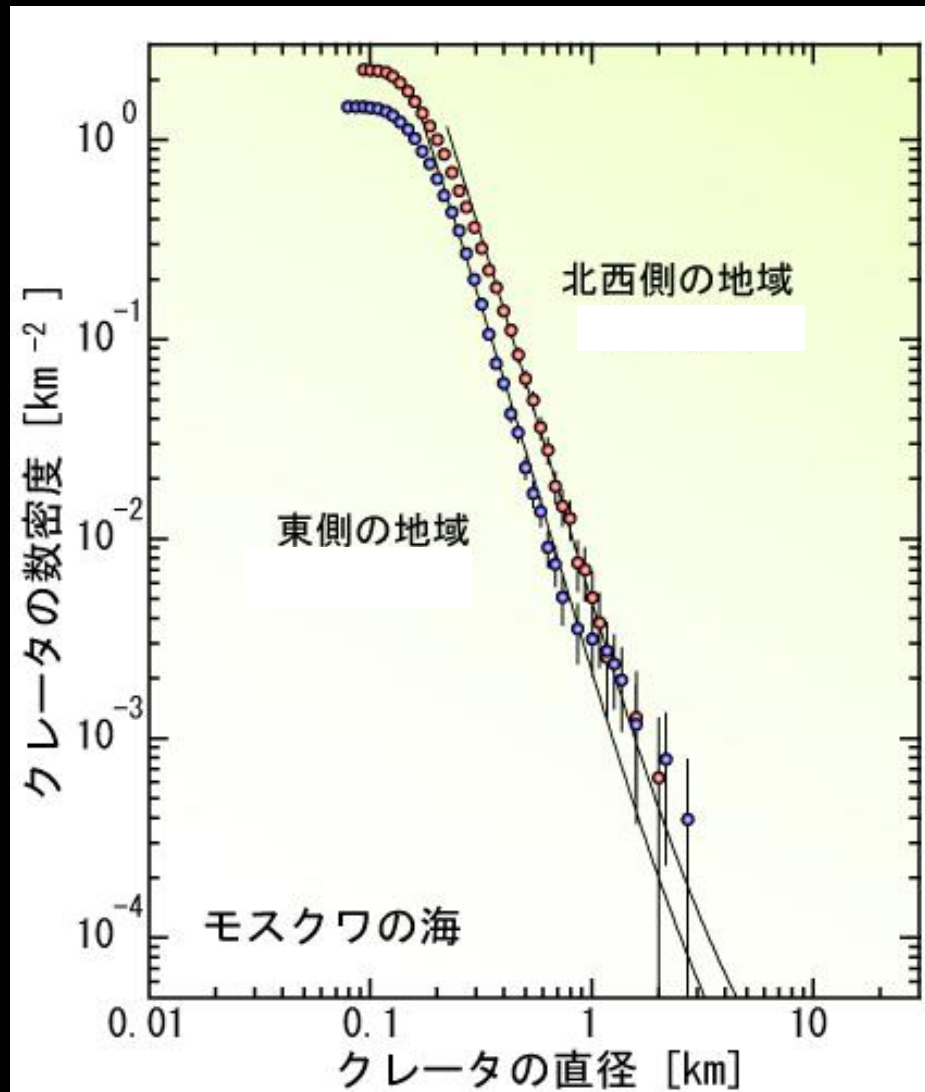
モスクワの海の
北西側



モスクワの海の
東側

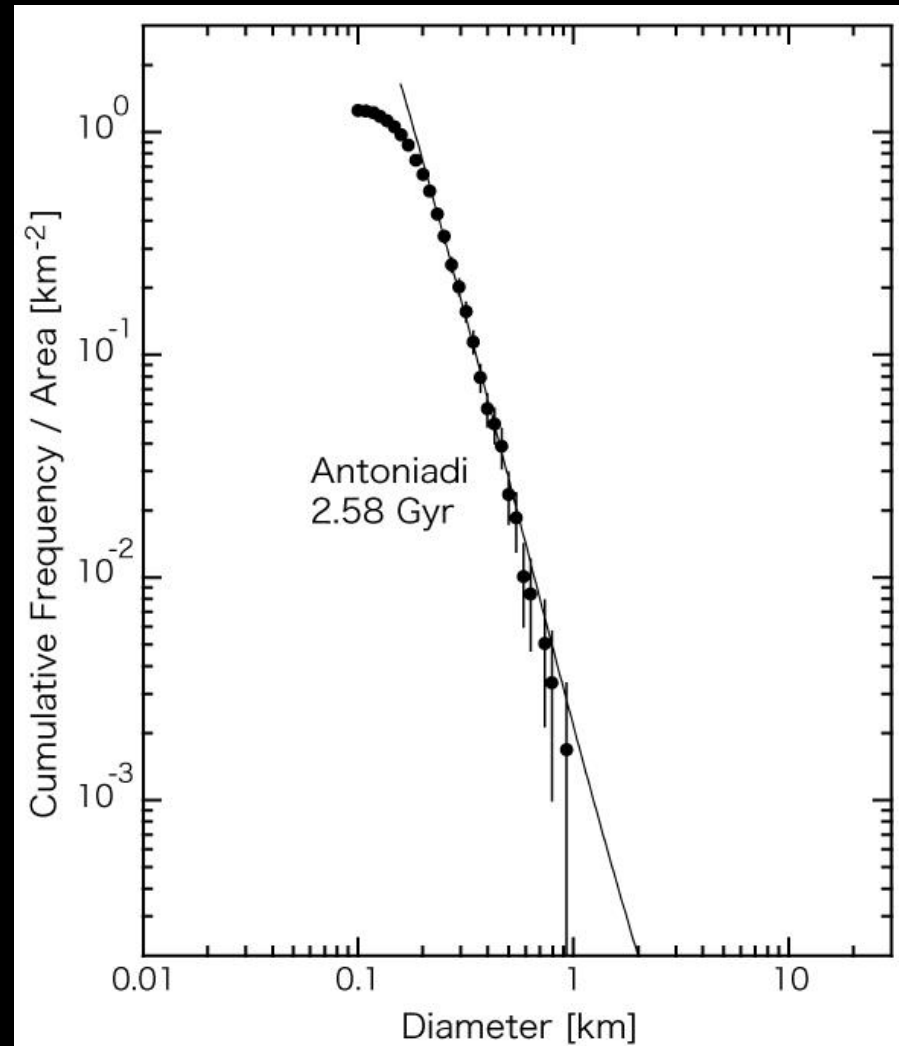
今回のクレータ個数密度計測結果 ーモスクワの海ー

今回のクレータ個数密度計測結果 —モスクワの海—



アントニアデー クレータ内

アントニアデーは月の裏側、南緯70° 付近にあるクレータで、
SELENE以前は高解像度データはなかった



アポロN クレータ内

二つの傾向。二回噴出が起きた。25億年前の溶岩流出では、1kmより小さなクレータは消されたが、1kmより大きなクレータは消されなかった。

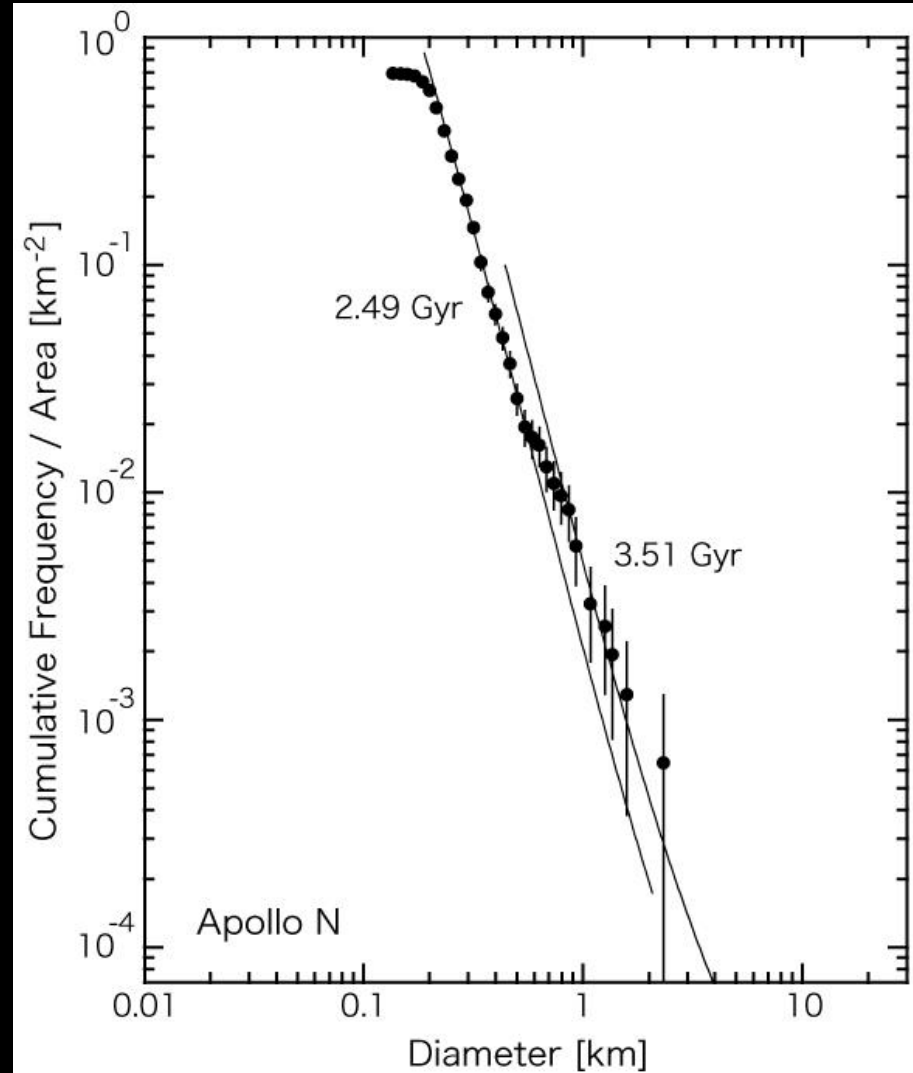
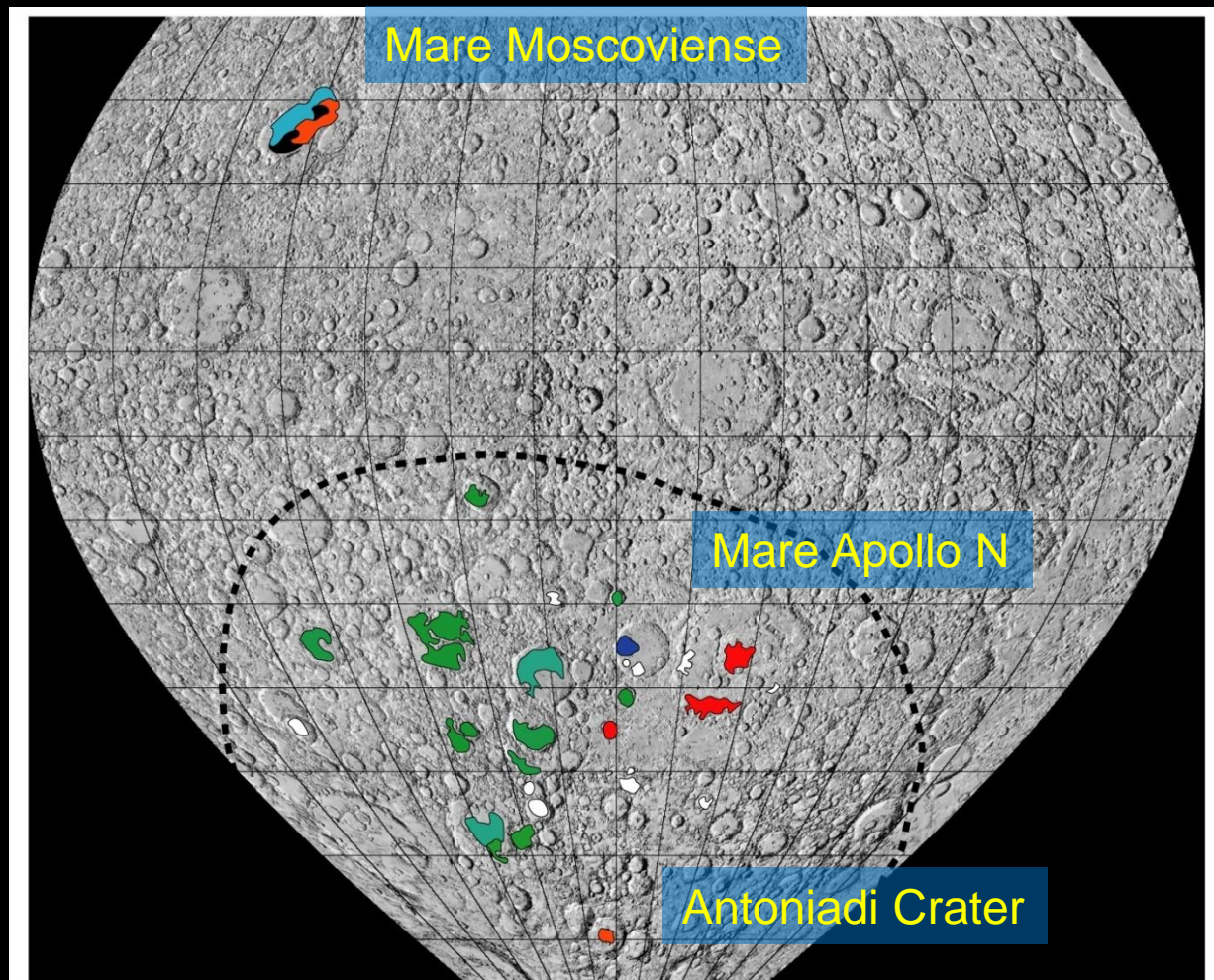


Table 1. Model ages for maria on the lunar farside.

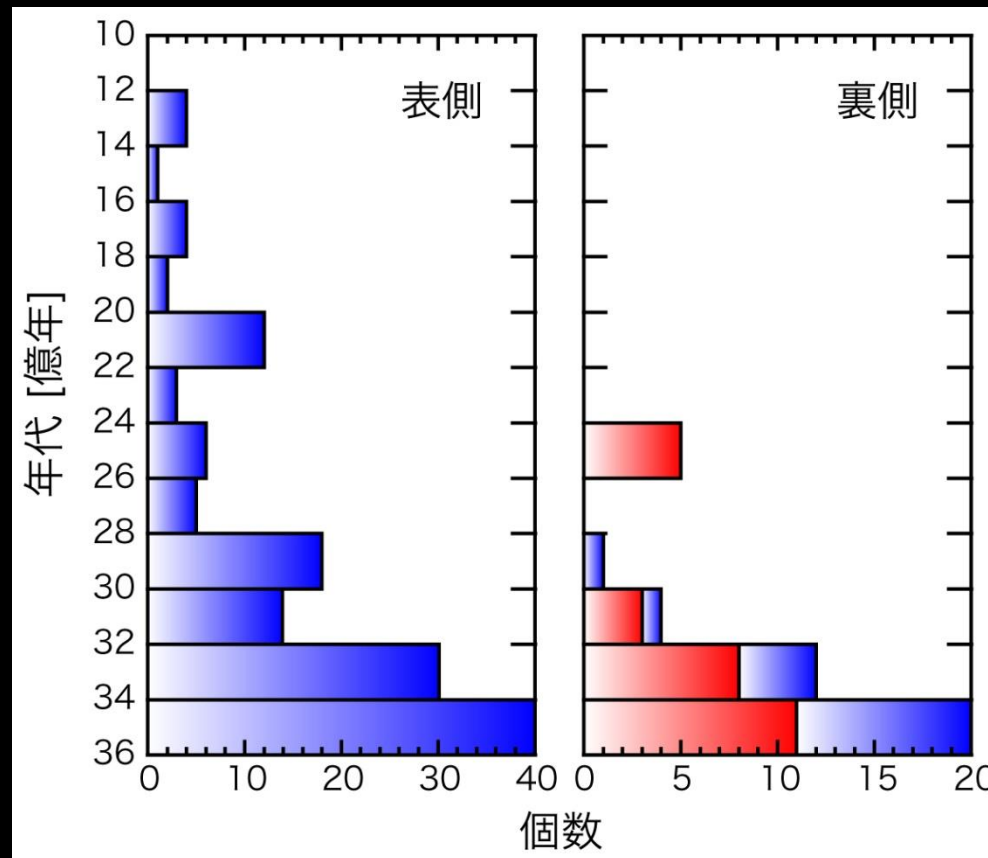
Mare		Area [km ²]	SEA ^a [degree]	N(1) ^b [km ⁻²]	Age [Ga]	Previous studies ^c
Poincare	S	734.0	2.1	0.00284	3.17	Im (5)
	NW	490.6	2.0	0.00433	3.46	Im (5)
	E	1067.2	2.5	0.00277	3.13	Im (5)
				0.00504	3.52	
Ingenii		1291.8	9.9	0.00292	3.20	Im (5, 21)
				0.00489	3.51	
Antoniadi		592.7	2.8	0.00217	2.58	Im (5); EIm (22)
Chretien		1183.1	2.3	0.00315	3.28	Im (5, 21)
				0.00427	3.46	
Jules Verne		815.2	11.1	0.00343	3.34	Im (5, 21)
Aitken		1257.1	10.9	0.00315	3.28	Im (5, 21); 3.8Ga (4)
				0.00469	3.49	
Apollo N		1541.5	5.5	0.00209	2.49	Im (5, 21), 3.63Ga (7)
				0.00491	3.51	
Apollo S		778.4	5.1	0.00205	2.44	Im (5, 21), 3.63Ga (7)
Von Karman		1628.6	3.0	0.00349	3.35	Im (5, 21)
Von Karman M		1220.6	2.9	0.00364	3.38	Im (5, 21)
Leibnitz		926.0	3.6	0.00410	3.44	Im (5, 21)
				0.00473	3.50	
Rumford		239.0	4.5	0.00346	3.35	Im (5, 21)
Maksutov		615.3	4.3	0.00311	3.27	Im (5, 21)
				0.00451	3.48	
Nishina		596.7	4.1	0.00207	2.47	Im (5)
				0.00282	3.16	
				0.02406	3.85	
Moscoviense	NW	1576.1	11	0.00481	3.50	Im (5, 21)
	E	2543.5	11	0.00216	2.57	Im (5, 21)
				0.00562	3.55	

月の裏側の年代の決め直し



地形カメラで明らかにされた 月の裏側の噴出領域の時代毎の数

～25億年ほど前まで、裏側で海を作るようなマグマ噴出活動が存在していた～



月の表側と裏側の海の中の各領域の形成時期の頻度分布。
青はこれまでの研究、赤は今回の研究結果。

＜地形カメラが得た成果＞

月の裏側でも、マグマの噴出活動は長く続いていた。

月はもっと早くに固まってもおかしくない。
我々は、何かを見落としているのかもしれない。



13 February 2009 | \$10

Science

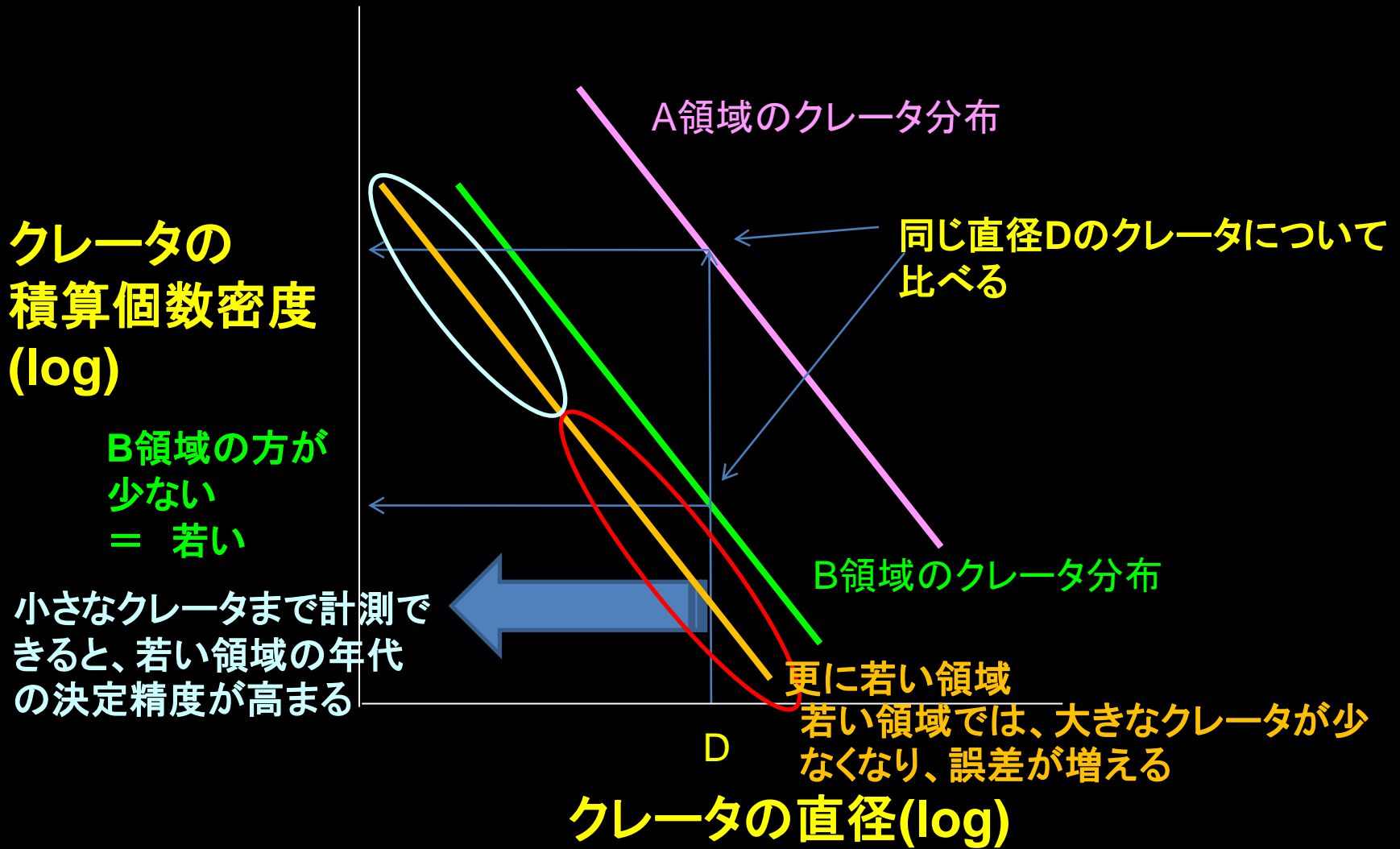
SELENE
and the Lunar Farside

AAAS

SELENEの地形カメラの詳細データは、
クレータ年代学での年代決定精度を非常にあげるもの

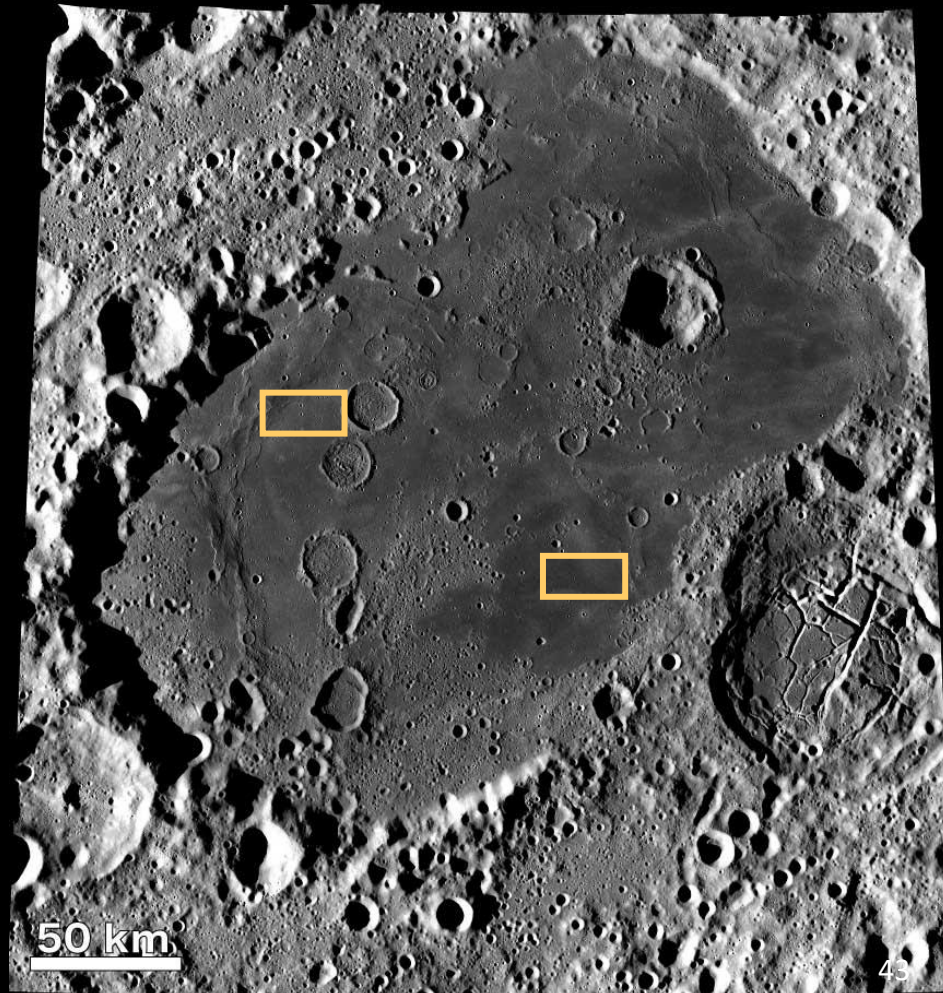
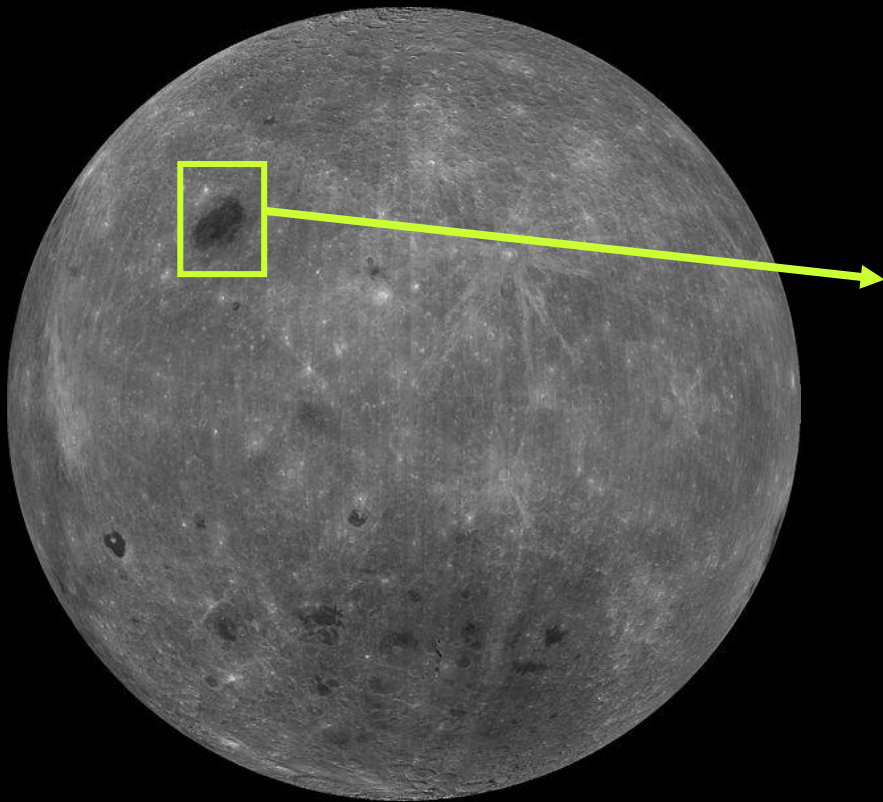
過去のデータの限界

クレータの直径と年代の関係



クレータはどれくらいあるのか？ クレータ個数密度計測結果 —モスクワの海—

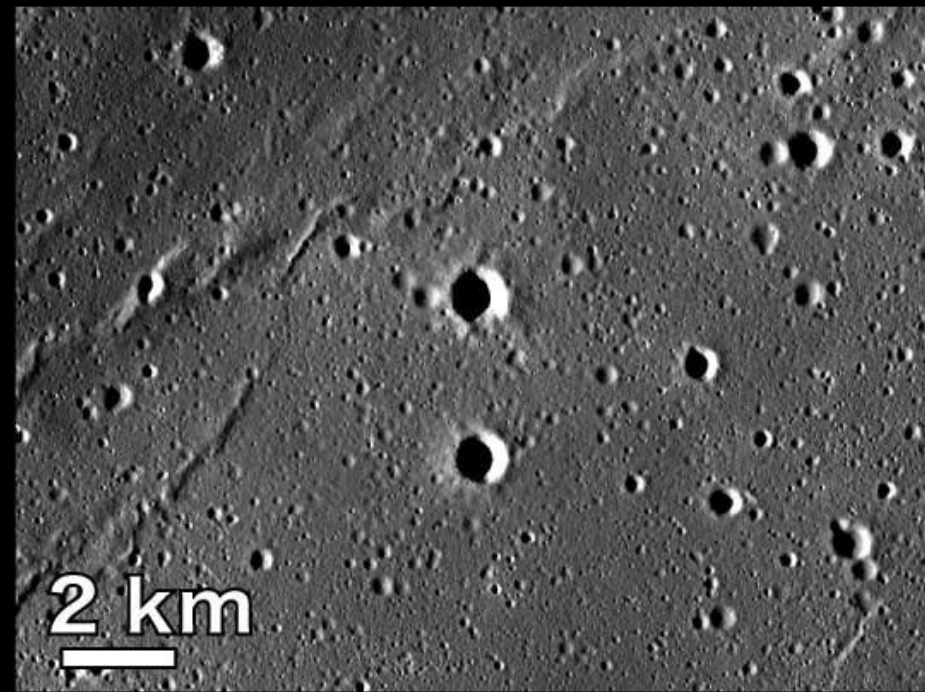
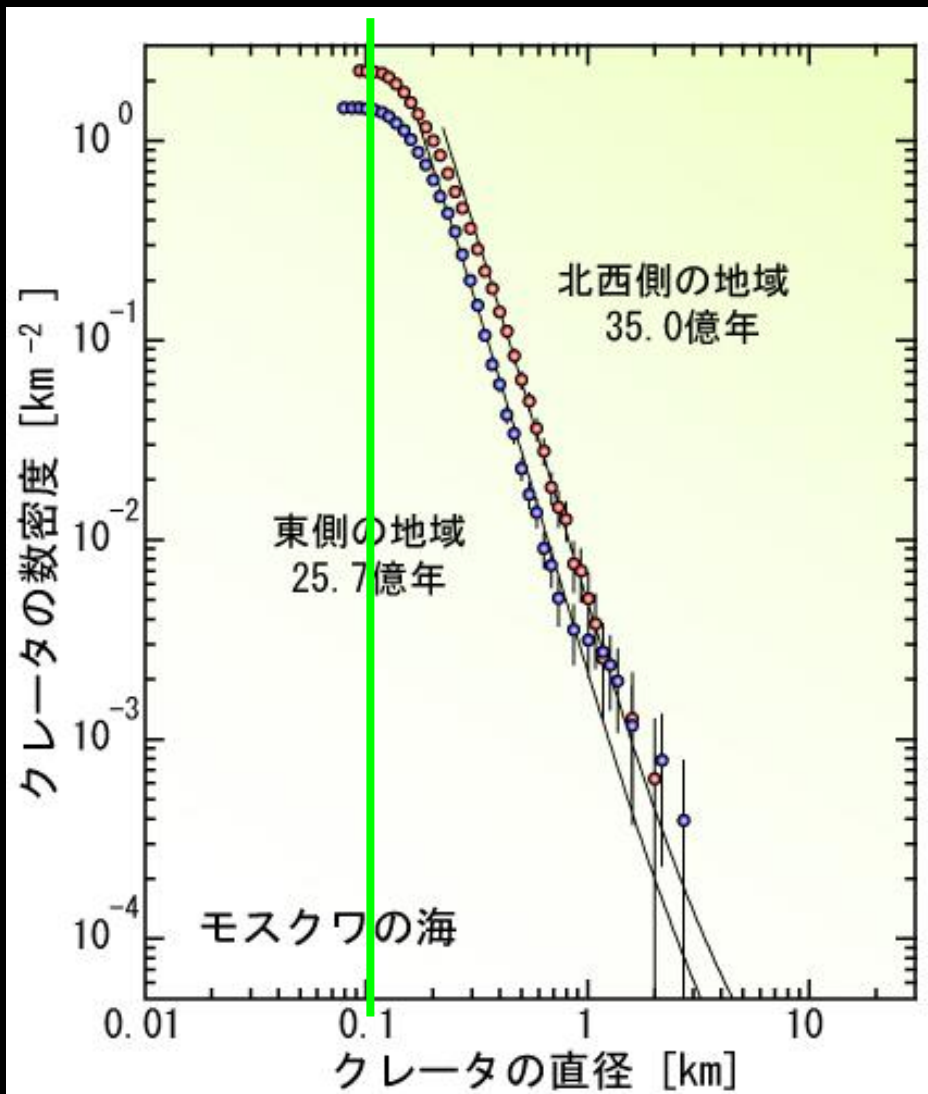
月の裏側



クレータはどれくらいあるのか？

クレータ個数密度計測結果

—モスクワの海—

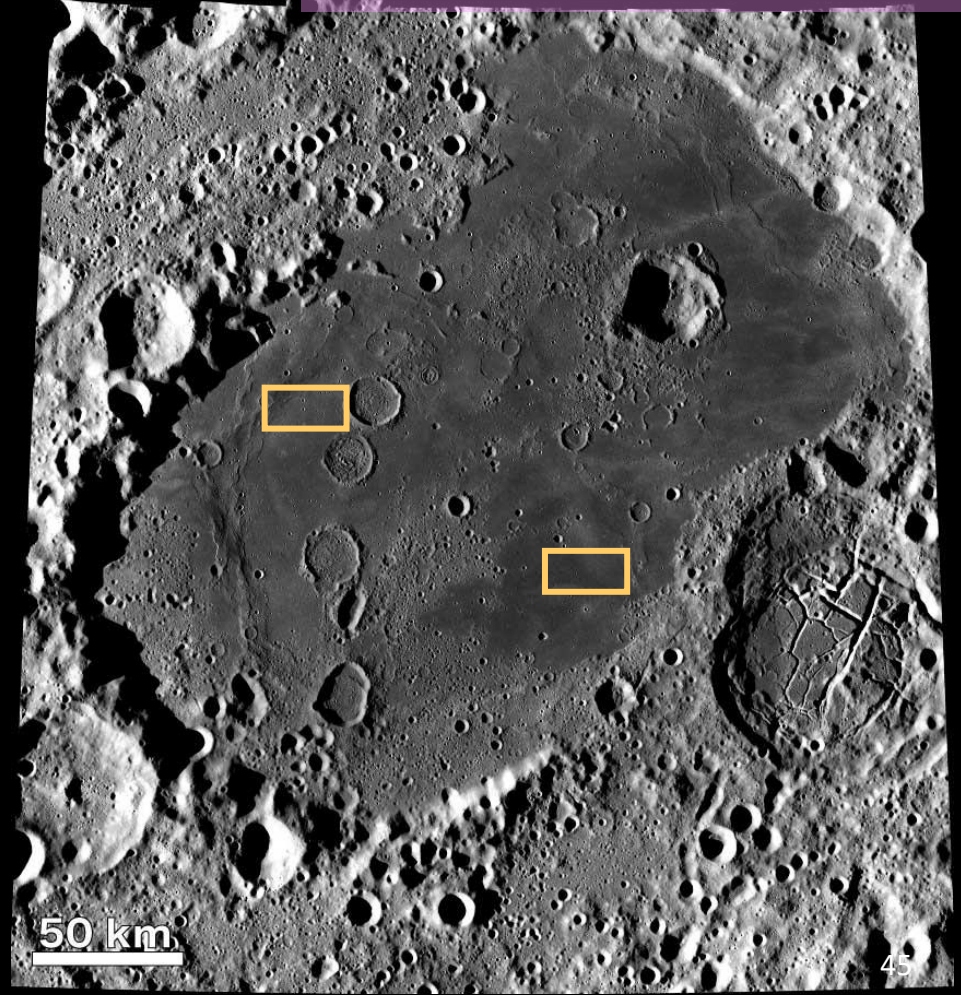
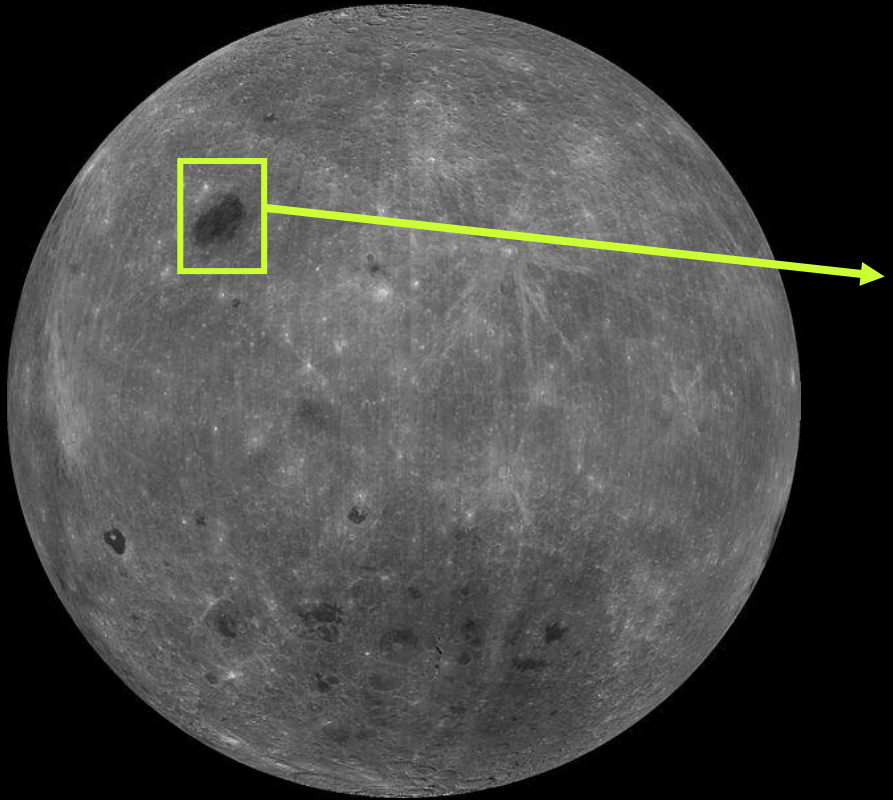


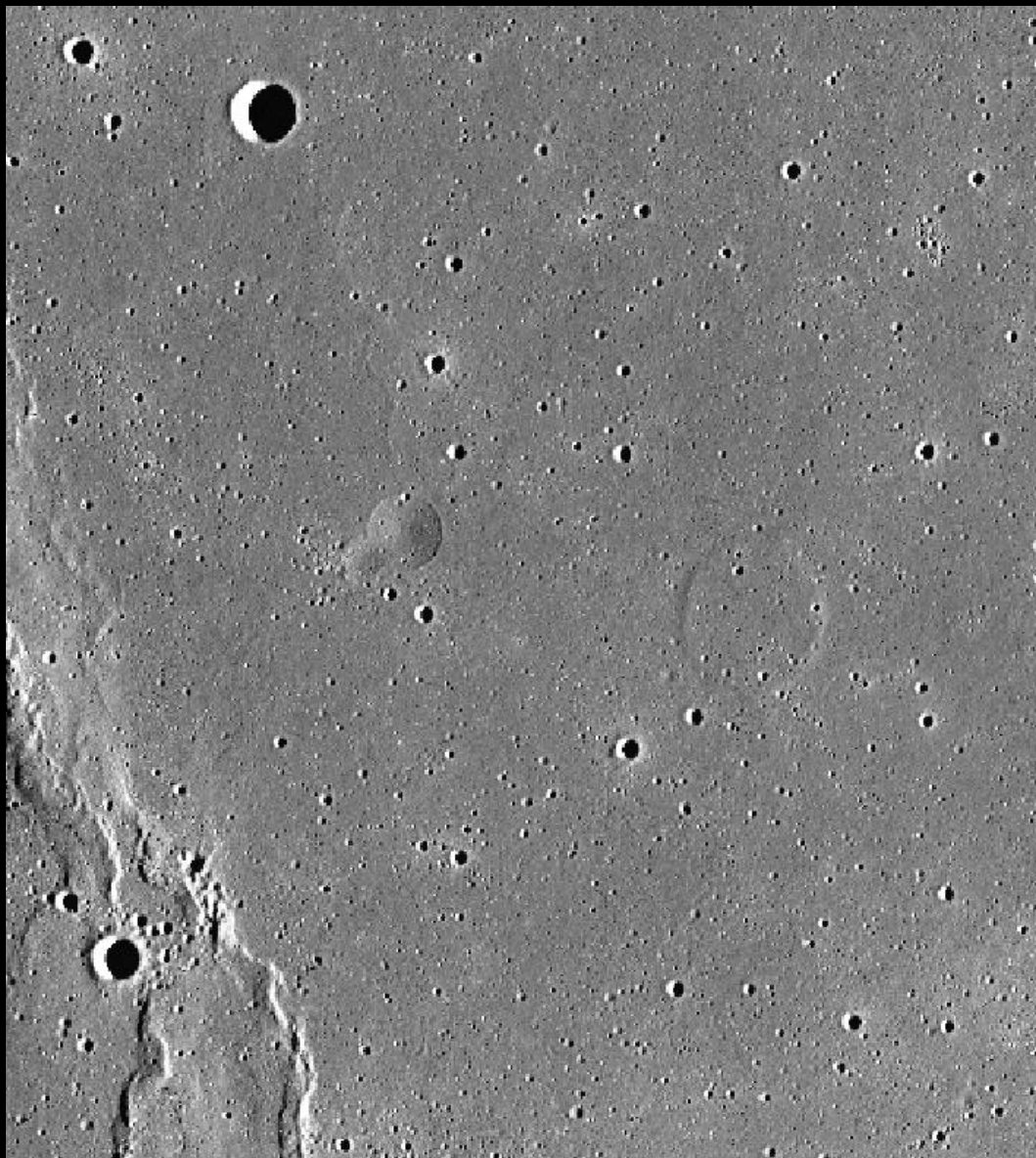
この領域であれば、
大凡20km x 15km (= 300km²):
直径100m以上のクレータが1個
/1km²なので、数百個以上のクレー
タを数えあげる必要がある。

クレータはどれくらいあるのか？ クレータ個数密度計測結果 —モスクワの海—

各地質領域はもっと広い

月の裏側





この地形カメラ画像であれば、
～42kmx45km
～1800km²

直径100m以上のクレータを
2000個近く数え上げる必要。
仮に3秒に1個、
数えるとして、約1時間半。

画像をzoom inしたりzoom out
したりする必要も考えると、数時
間。

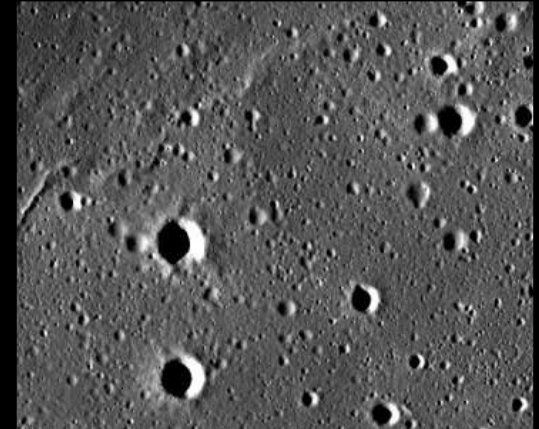
更に人、体調、画質による差が
生じる可能性がある。

クレータ抽出の自動化

クレータ自動抽出

<様々な試み>

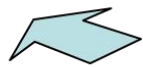
- クレータの影の形状を調べる
※地形によっては誤抽出する
- クレータのリムを調べる
(e.g. Head et al. 2010、山本 2015)
- クレータの形状について機械学習させて調べる
(e.g. Young et al. 2020)



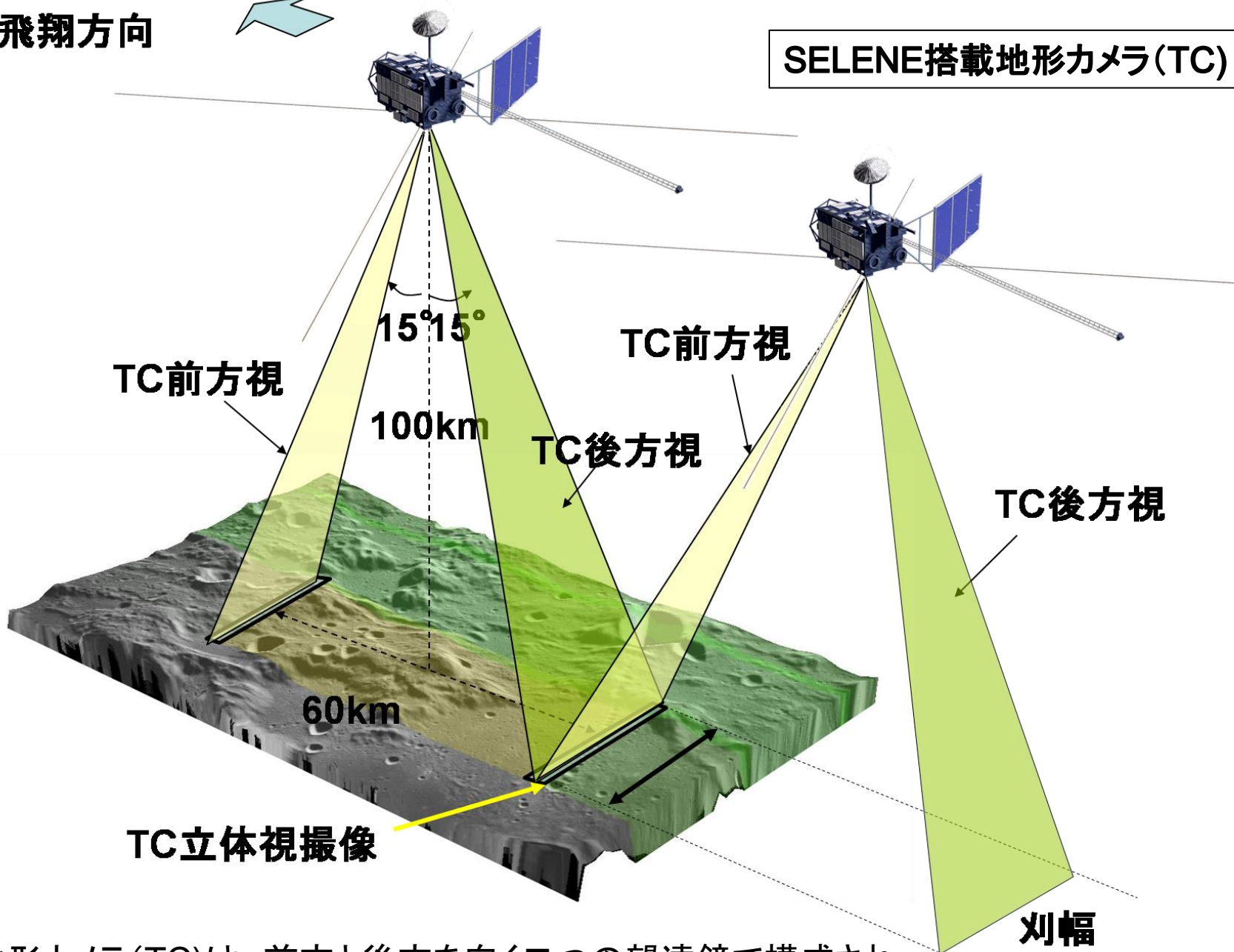
<今回採った手法>

SELENE地形カメラの特長を最大限に利用

衛星飛行方向



SELENE搭載地形カメラ(TC)



地形カメラ(TC)は、前方と後方を向く二つの望遠鏡で構成され、10mの解像度で月面の立体視データを取得する

刈幅
40km~16km
(モードによる)

クレータ自動抽出

(春山、原 2021)

＜今回採った手法＞

SELENE地形カメラは、画像情報と、標高情報(DTM)のセットを得た

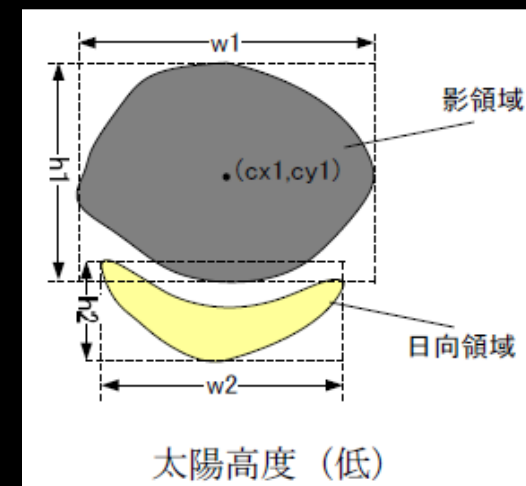
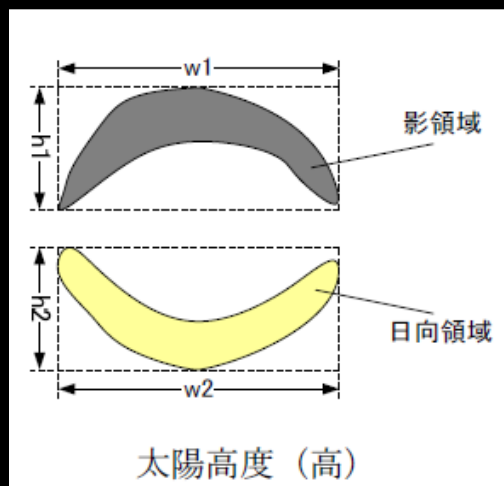
・画像情報から、影-日向パターンを抽出

・影パターンから中心を抽出

判定条件例

$$0.25 \leq w1/w2 \leq 4.0 \text{ かつ } 0.25 \leq h1/h2 \leq 4.0$$

・DTM情報からクレータの周囲の盛り上がり(リム)を抽出して、チェックする



詳細は、「春山、原、2021、宇宙航空研究開発機構研究開発資料 SELENE(かぐや)地形カメラオルソ画像とDEMにおけるクレータ検知手法 (ISSN 2433-2224 JAXA-RM-21-007)」参照のこと

クレータ自動抽出ツールの GUI化

GUI化

・SELENE(かぐや)アーカイブサイトにあるSELENE地形カメラデータをクレータカウンティングに使うには、

★投影法変換、解像度変換

★自動カウンティング領域、解析領域設定

★クレータ自動抽出後、抽出結果の確認・編集

GUI化

・SELENE(かぐや)アーカイブサイトにあるSELENE地形カメラデータをクレータカウンティングに使うには、

★投影法変換、解像度変換

★自動カウンティング領域、解析領域設定

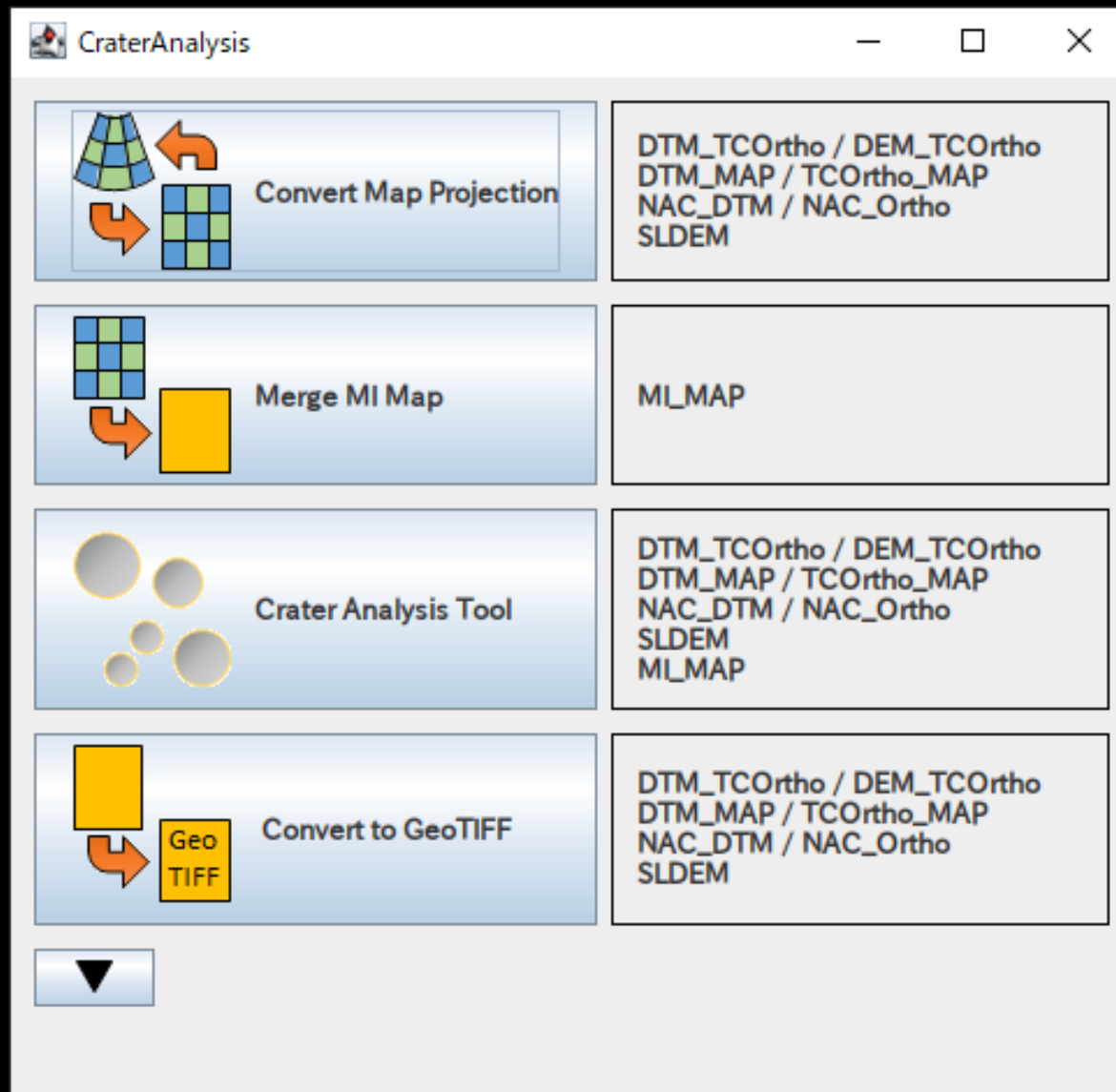
★クレータ自動抽出後、抽出結果の確認・編集

こうした機能を達成する適当なGUIがあると、(プログラミングに慣れていなくとも)(自動)クレータカウンティングに取り組める。

ということで、会津大との共同研究で、本GUIツールを開発した。
対象OSは、Windows(10)、MAC-インテル版、MAC-M1チップ版、
LINUX版。

メイン画面

メイン画面



データ変換画面

データ変換画面

Convert Map Projection

1. Type

- DTM_TCOrtho / DEM_TCOrtho (Select File)
- DTM_MAP / TCOrtho_MAP (Select Directory / Folder)
- NAC_DTM / NAC_Ortho (Select File)

2. Input

Ref.

Product ID Info.

Projection Type

Line Samples Sample Bits

Lines Clear

	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
UL	<input type="text"/>	<input type="text"/>	UR	<input type="text"/>
			Center	<input type="text"/>
LL	<input type="text"/>	<input type="text"/>	LR	<input type="text"/>

Resolution [m/pixel]

3. Output Projection

SC PS LCC **TM**

	Latitude	Longitude
Projection Center [deg]	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Resolution [m/pixel] Set

Interpolation NN BL CC

UL Lat [deg] LR Lat [deg] Auto

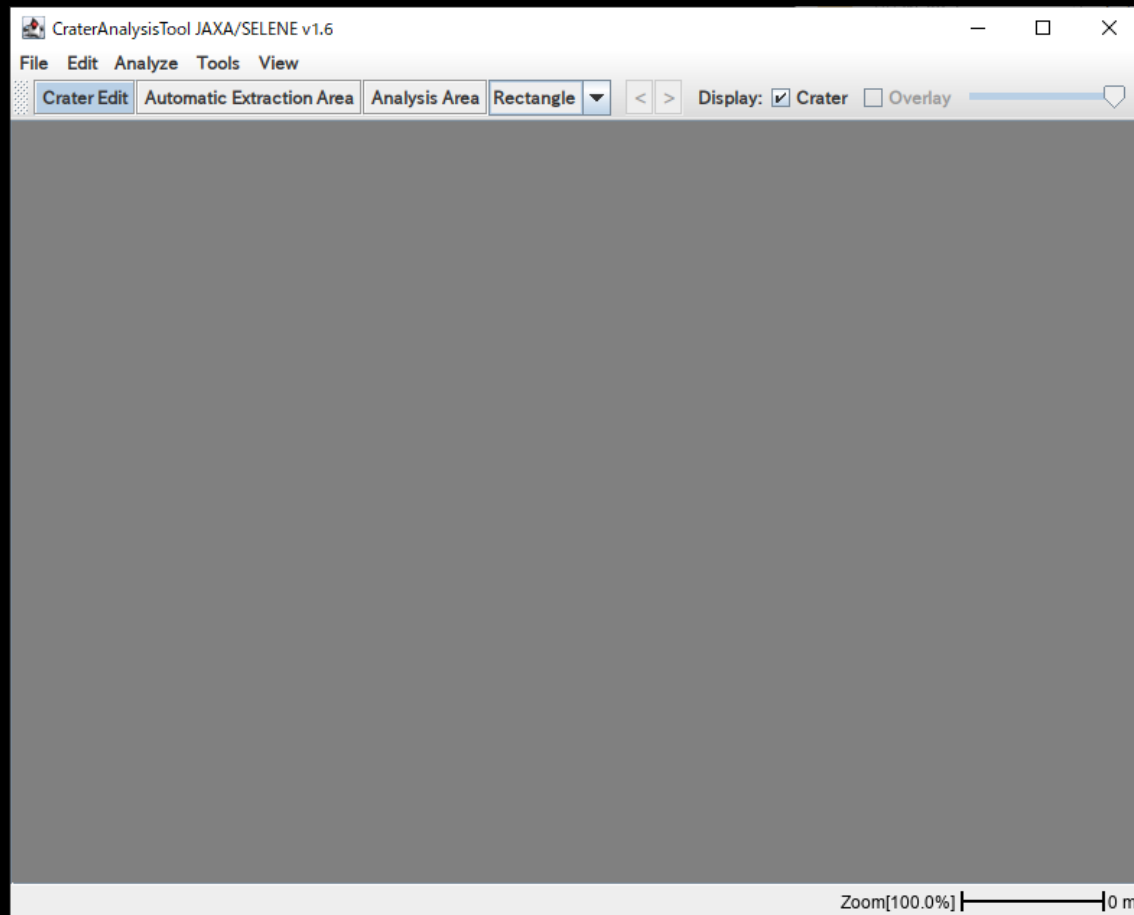
UL Lon [deg] LR Lon [deg]

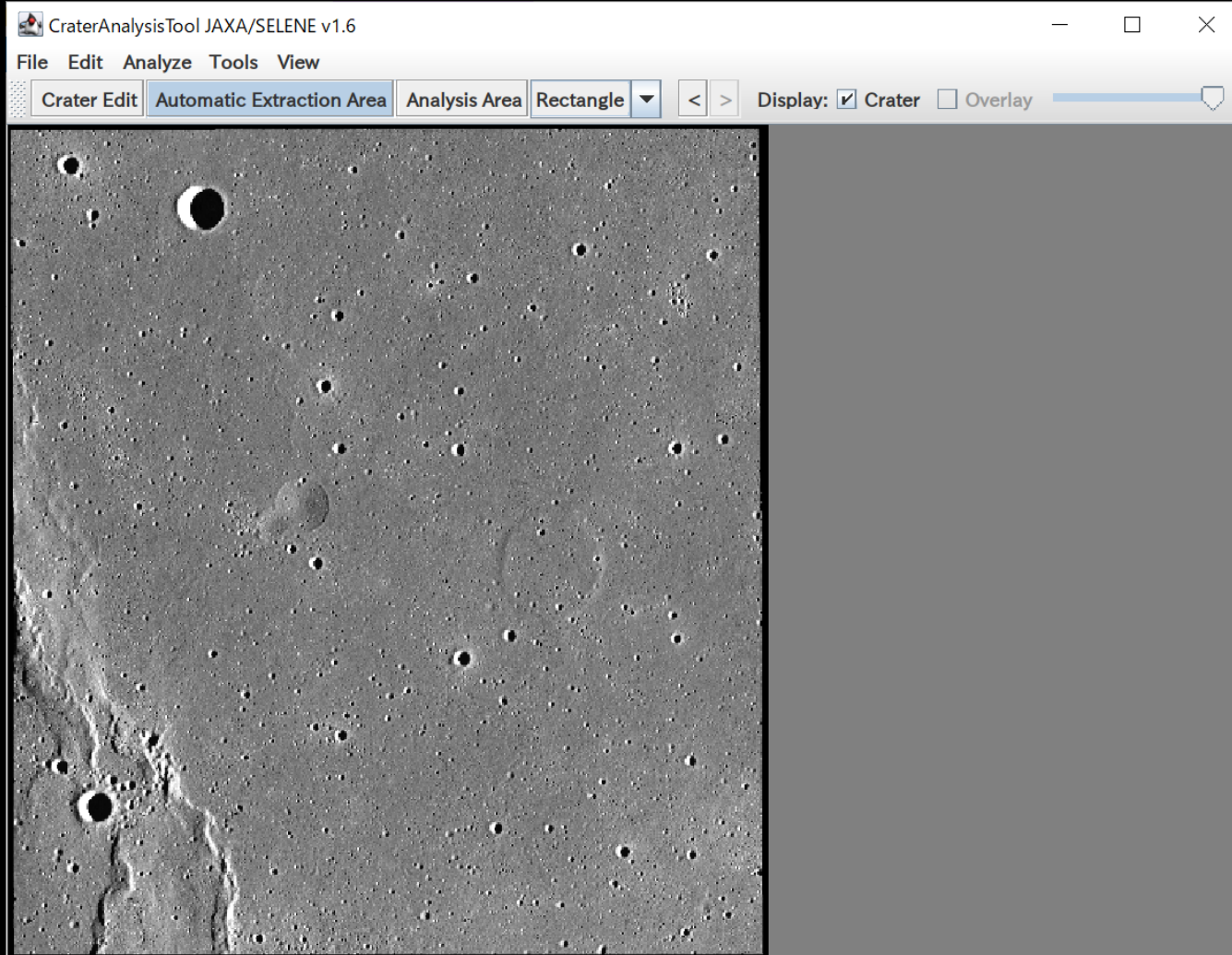
Auto Ref.

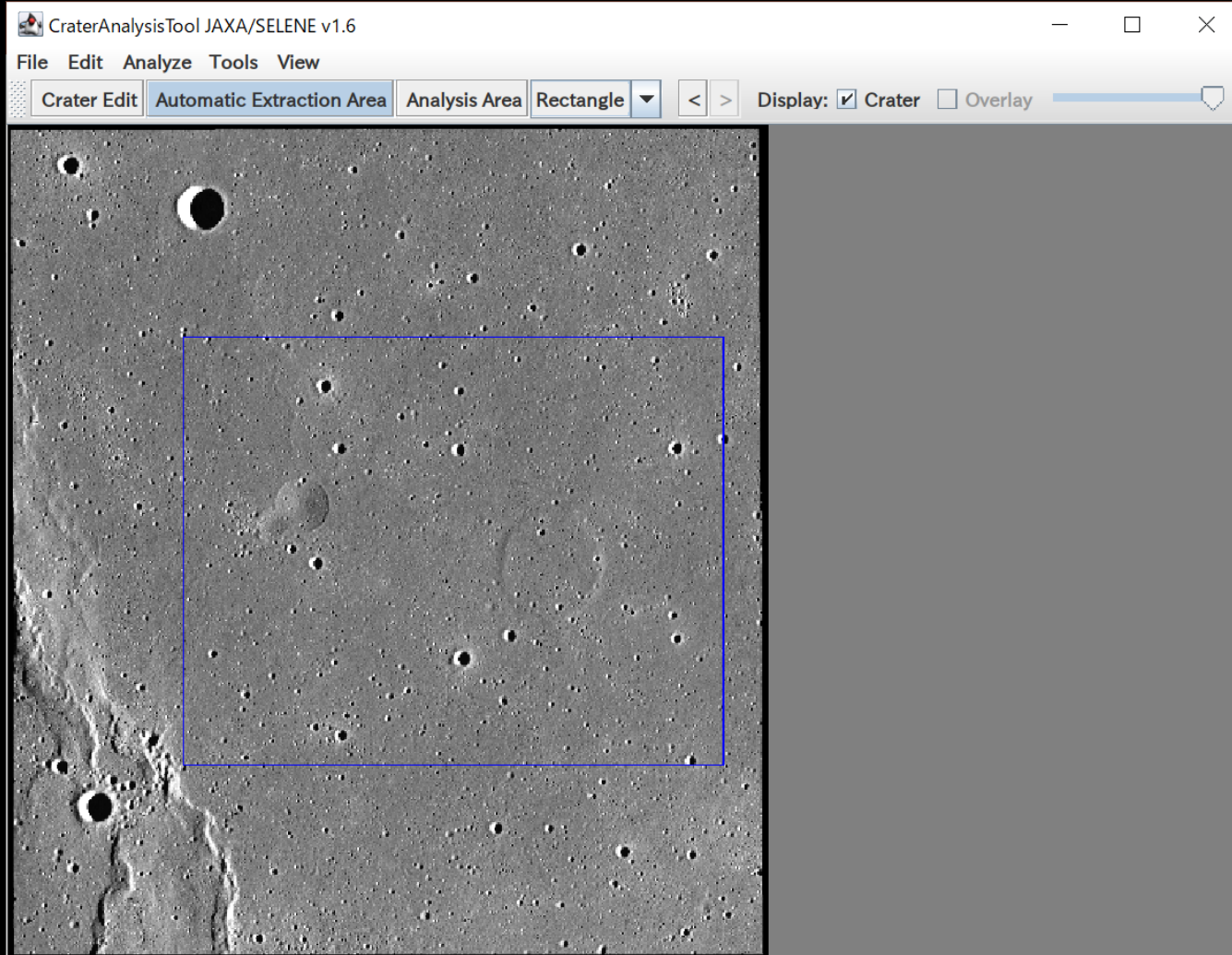
Convert

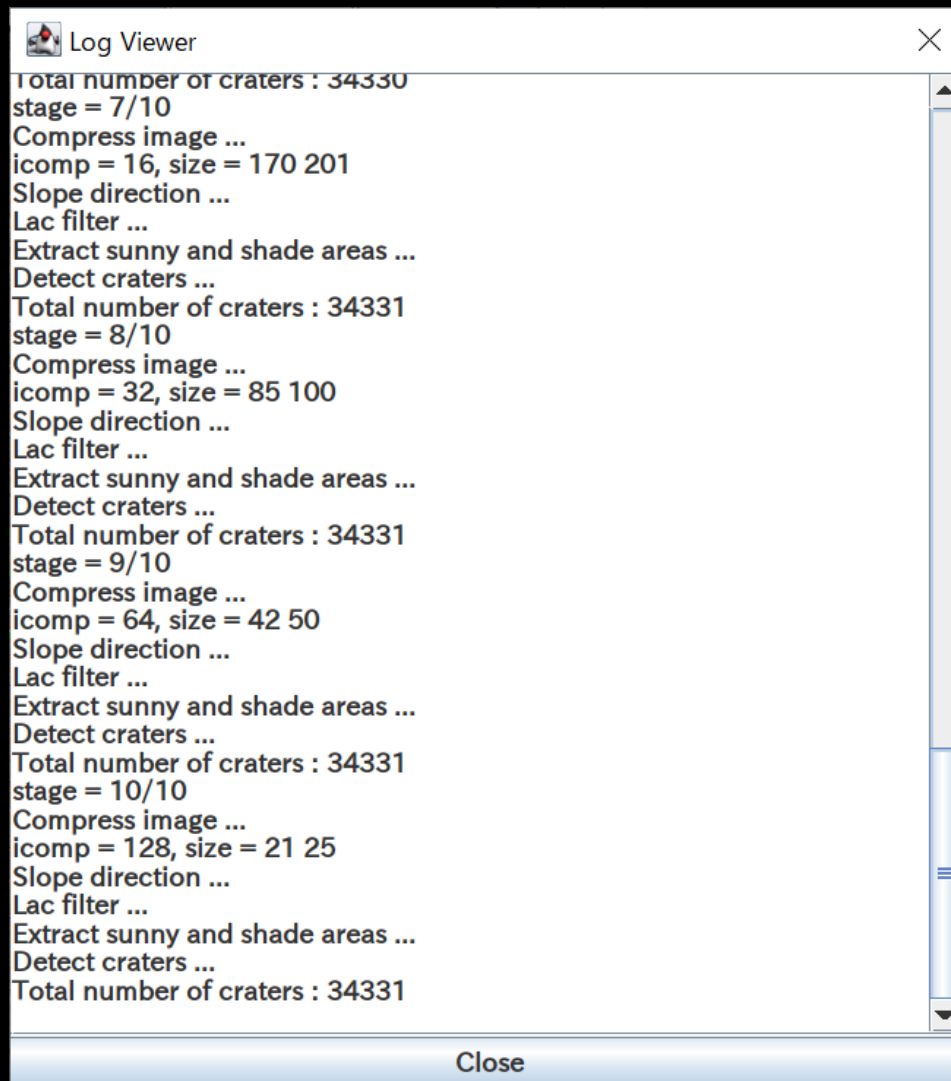
自動クレータ抽出・解析画面

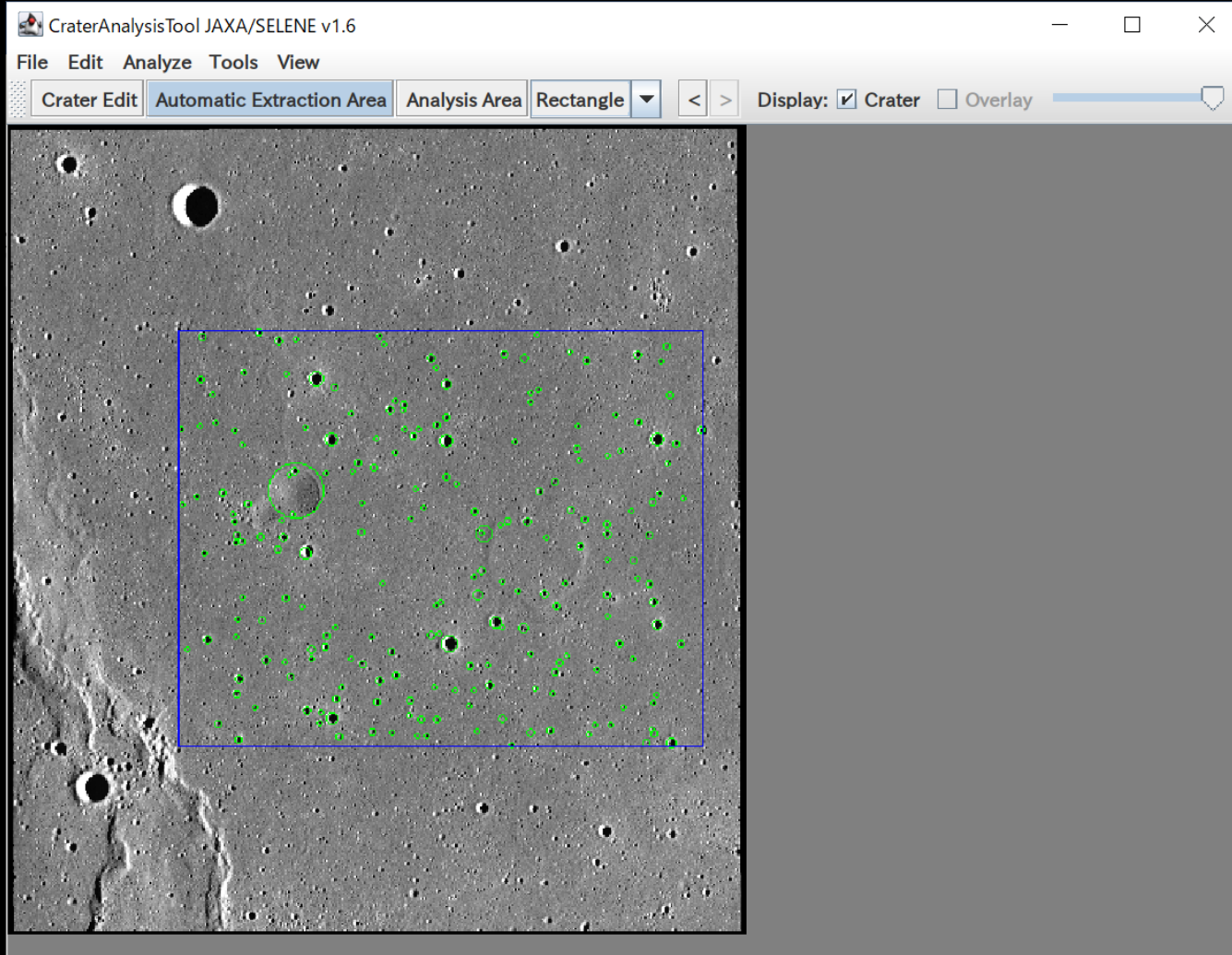
自動クレータ抽出・解析画面

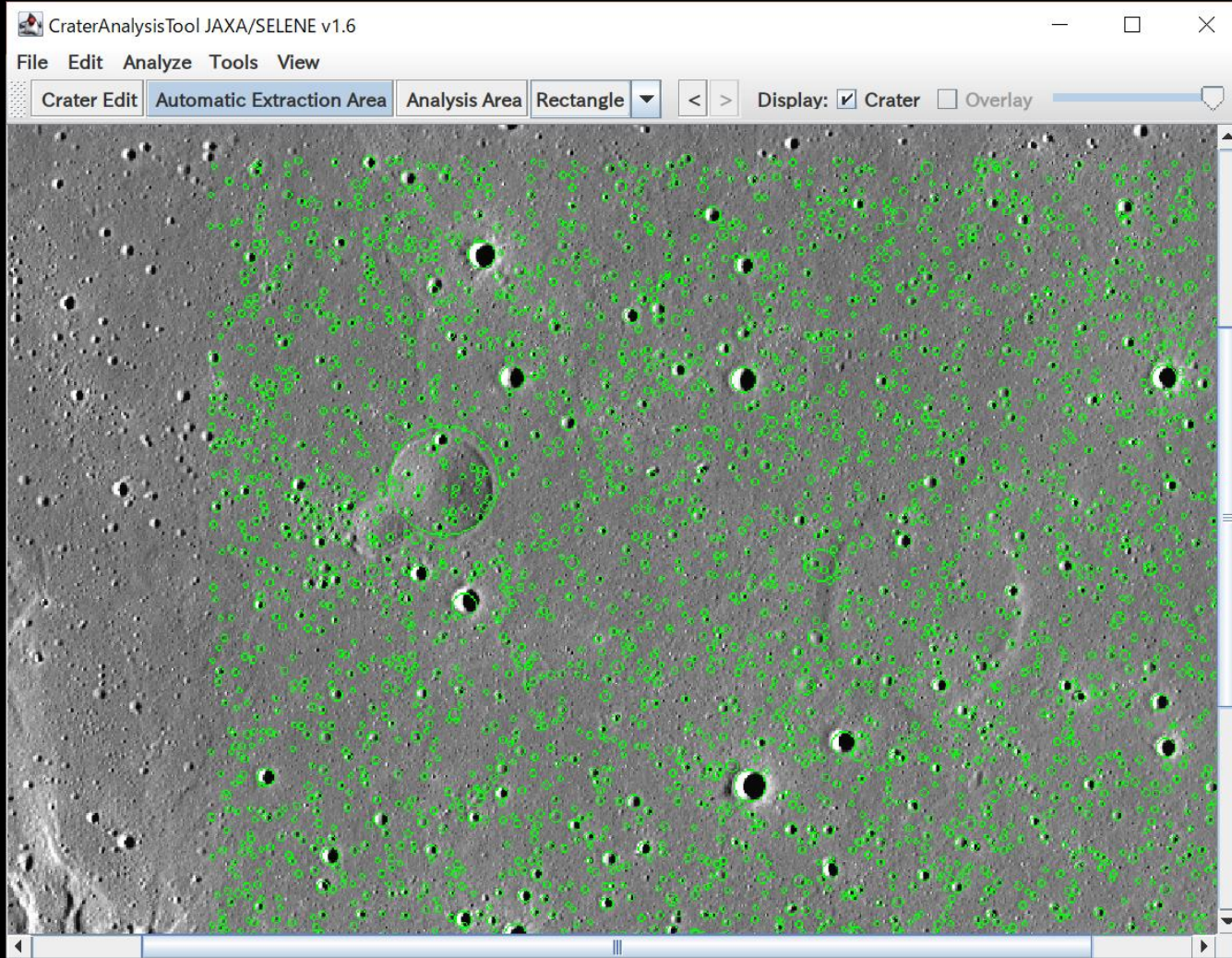


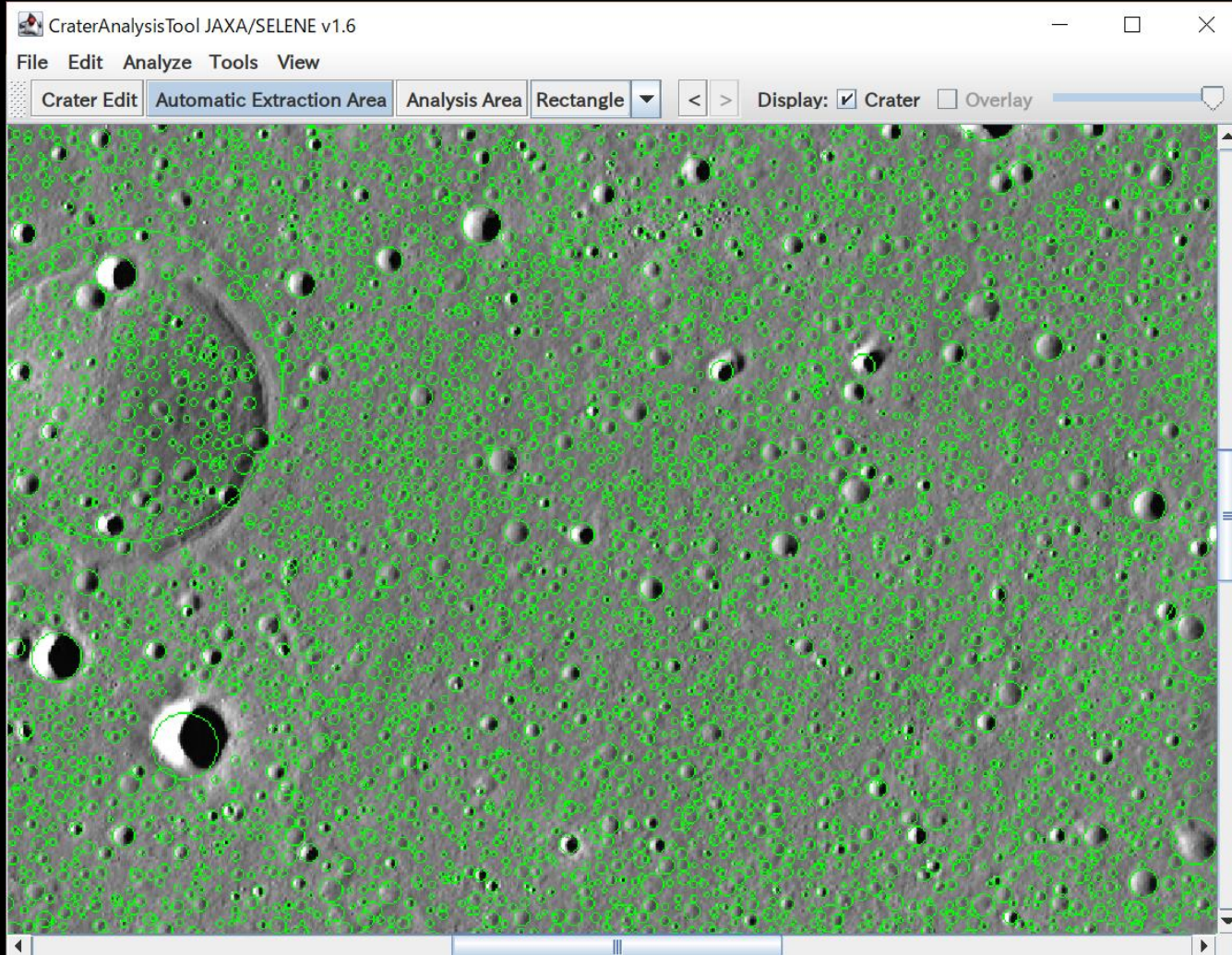


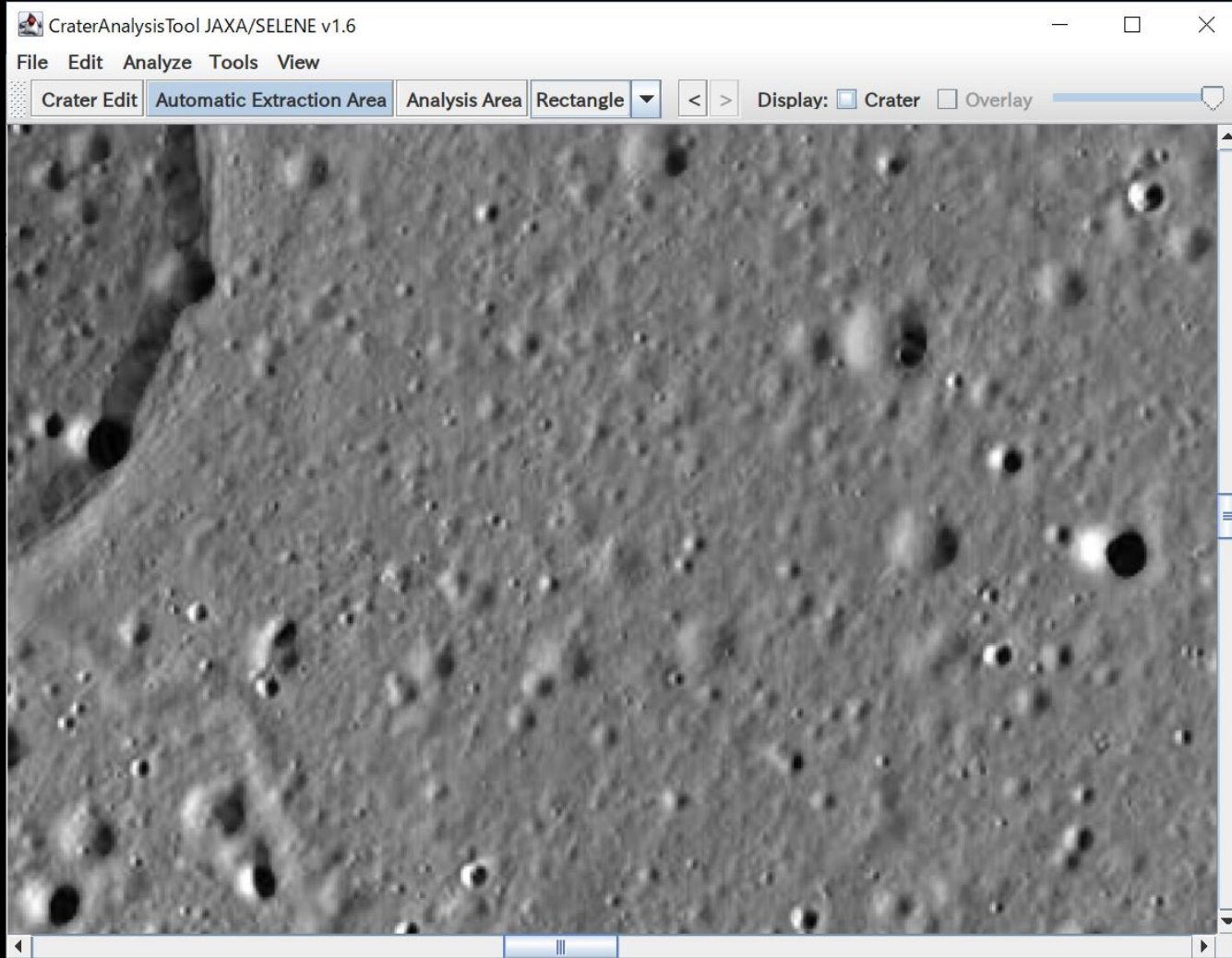


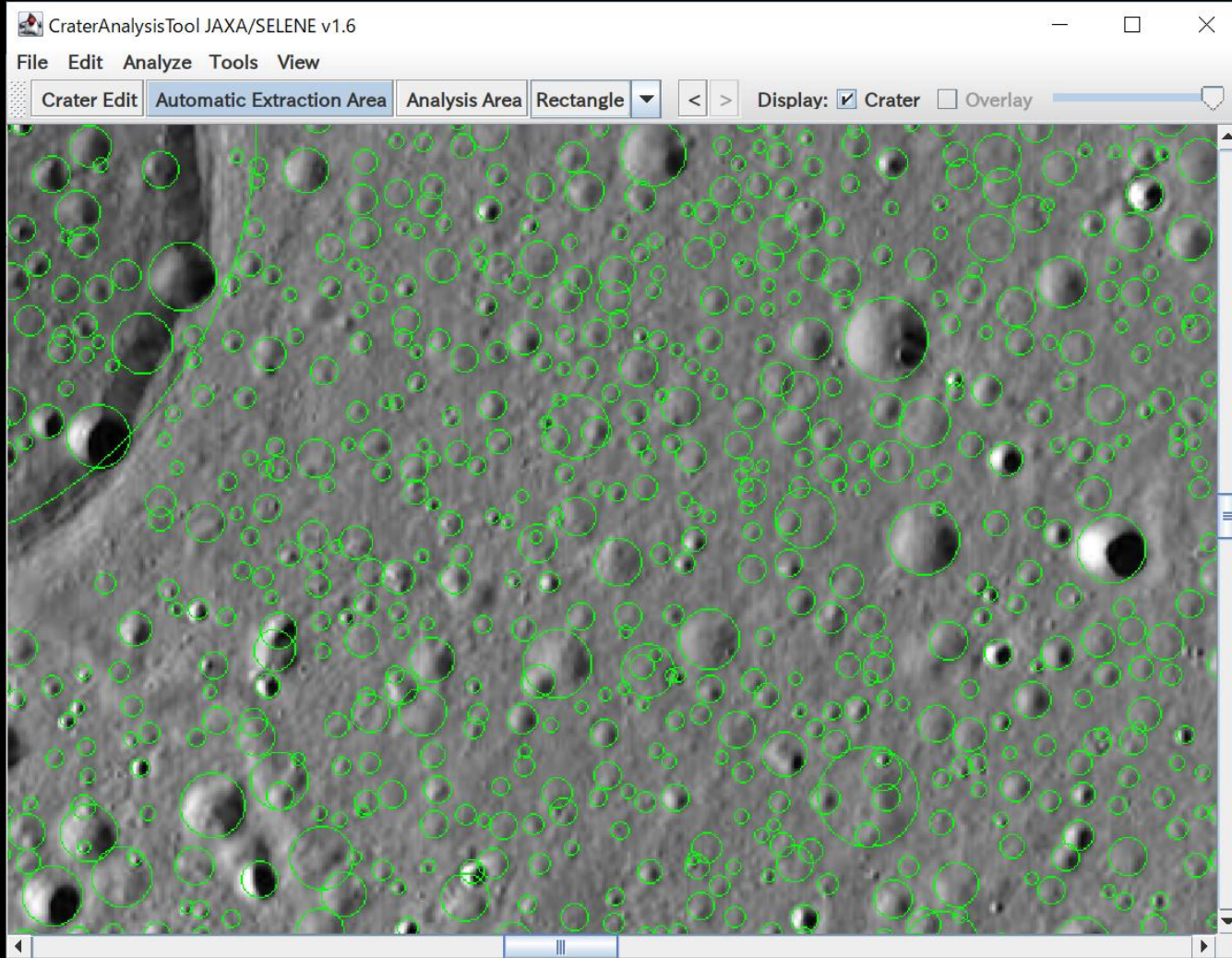


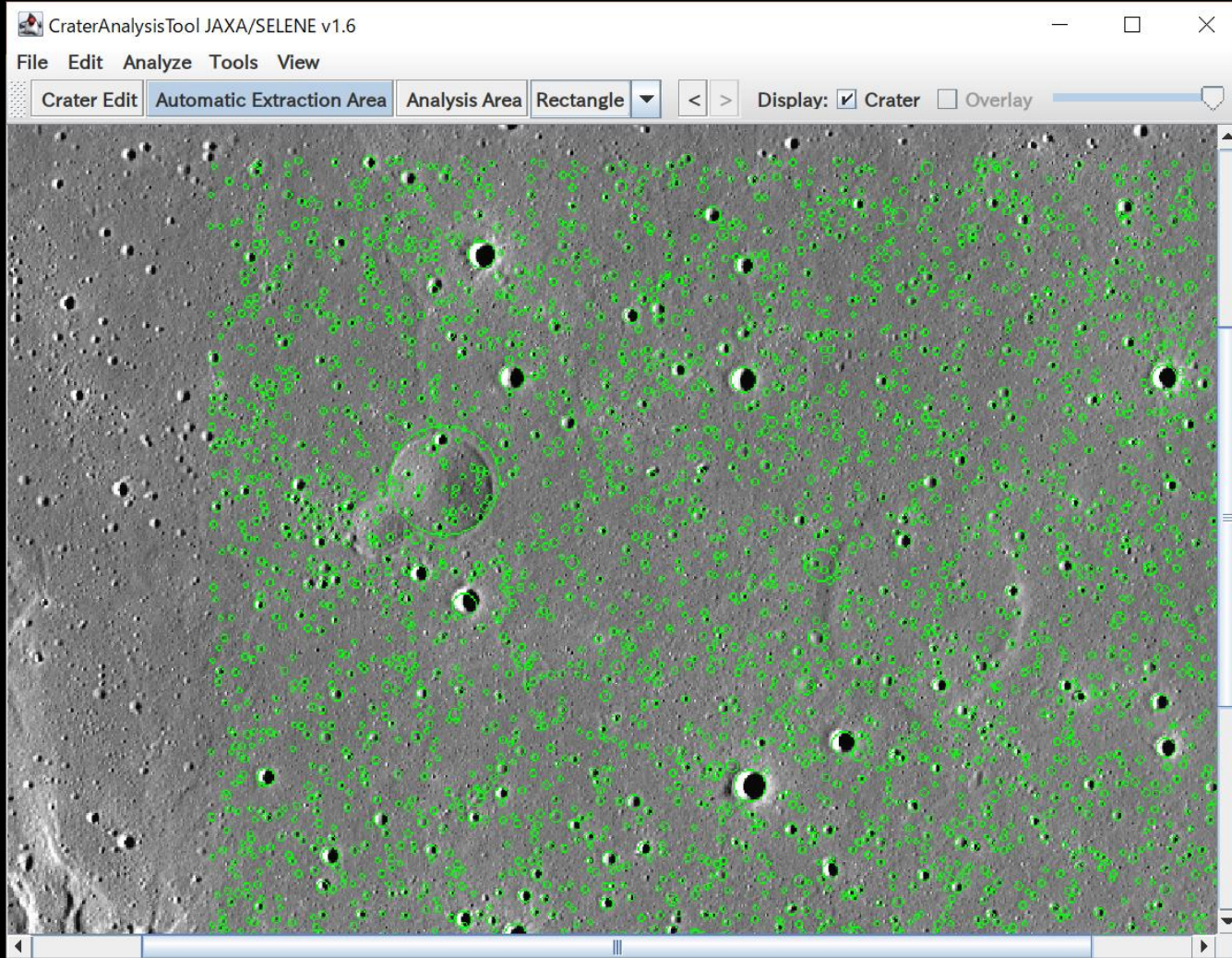






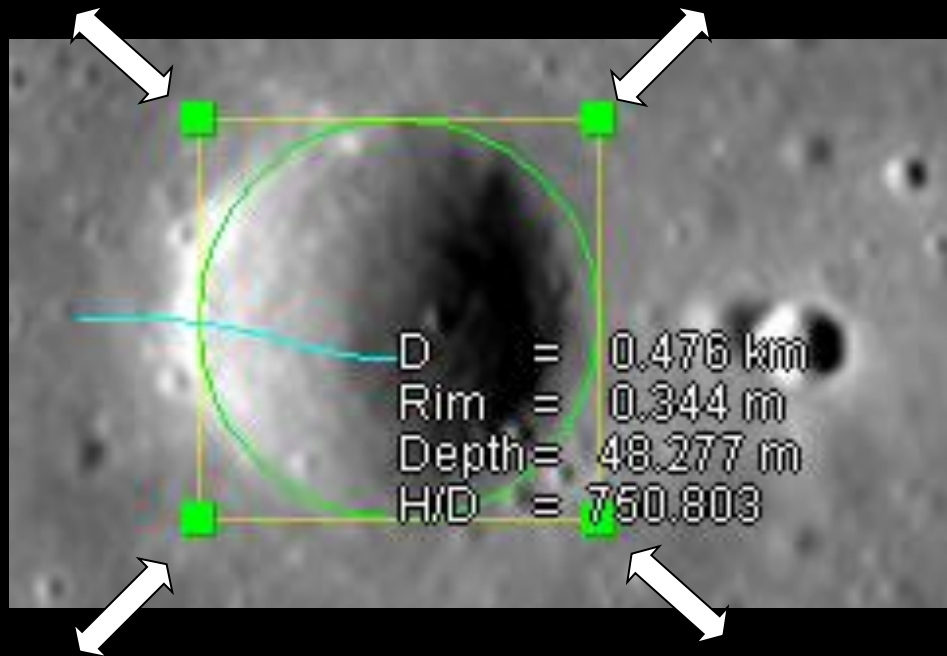


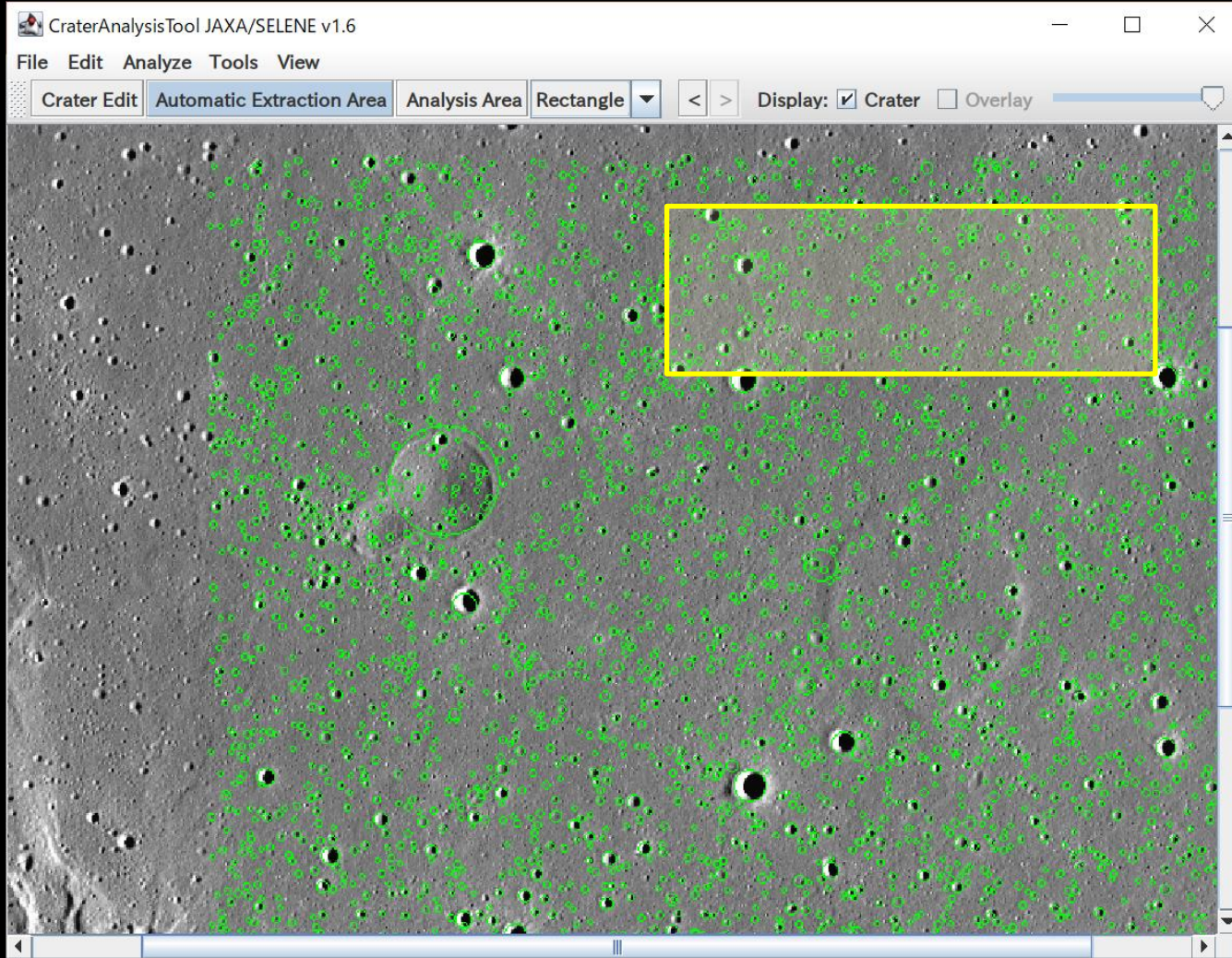


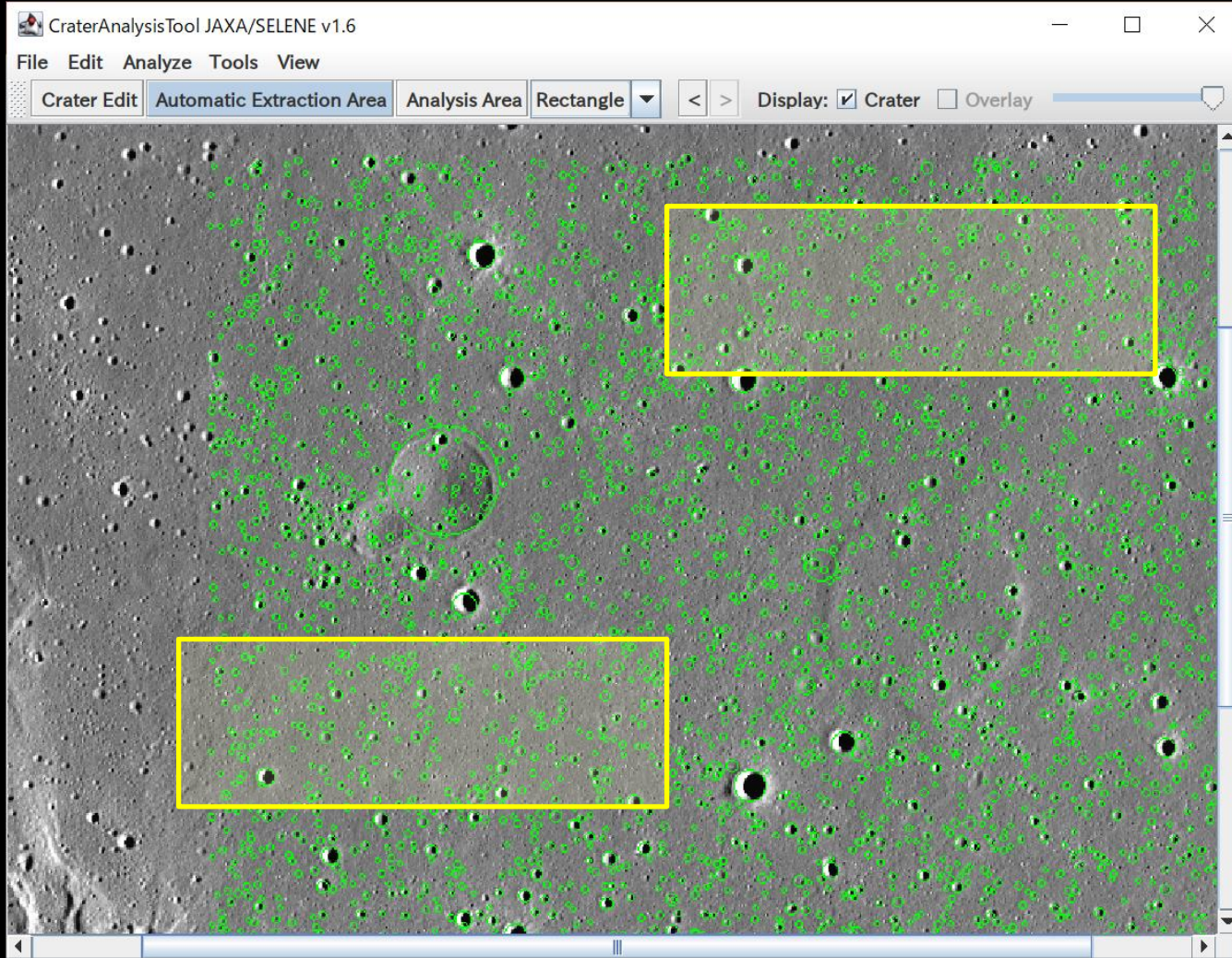


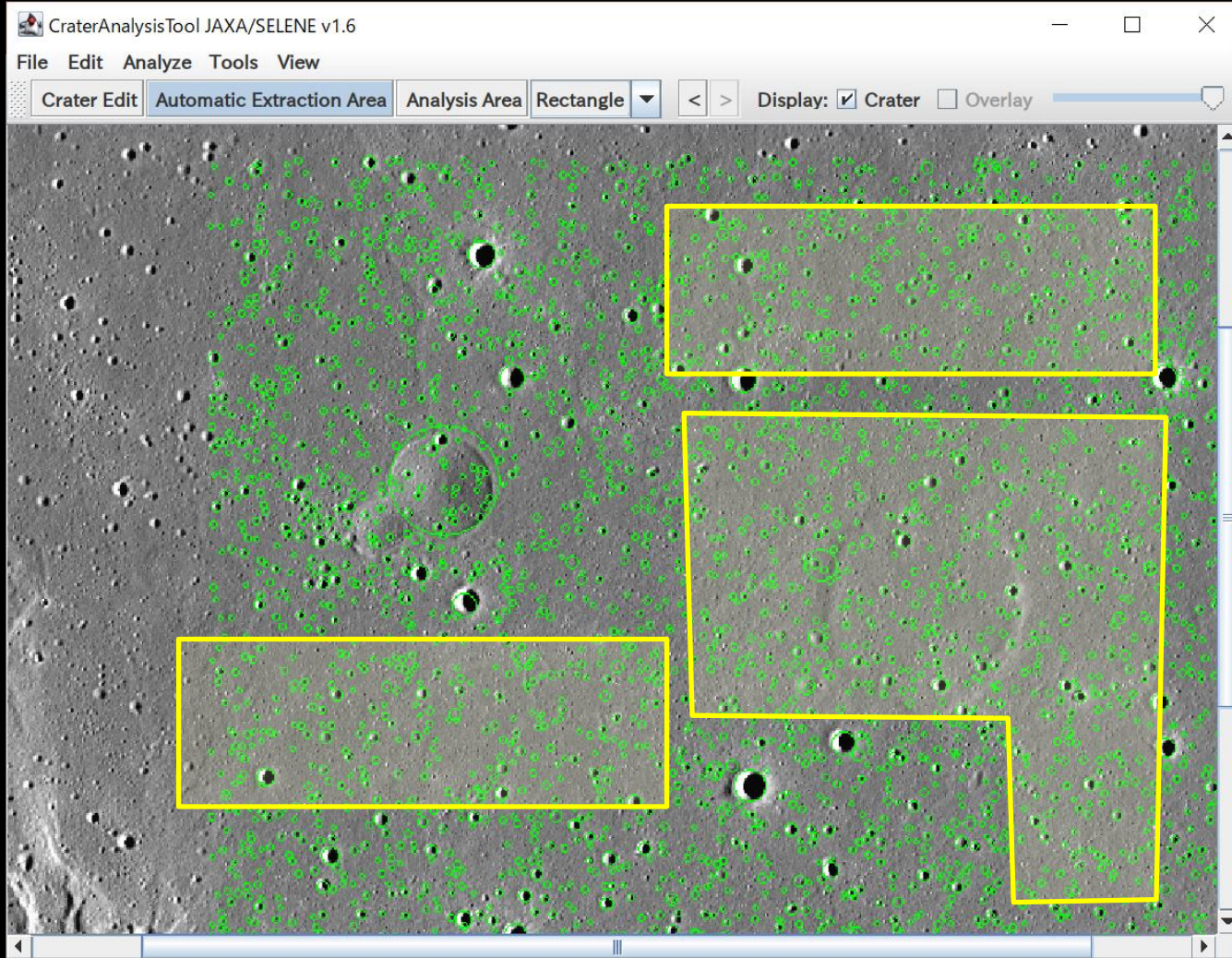
クレータ情報の確認

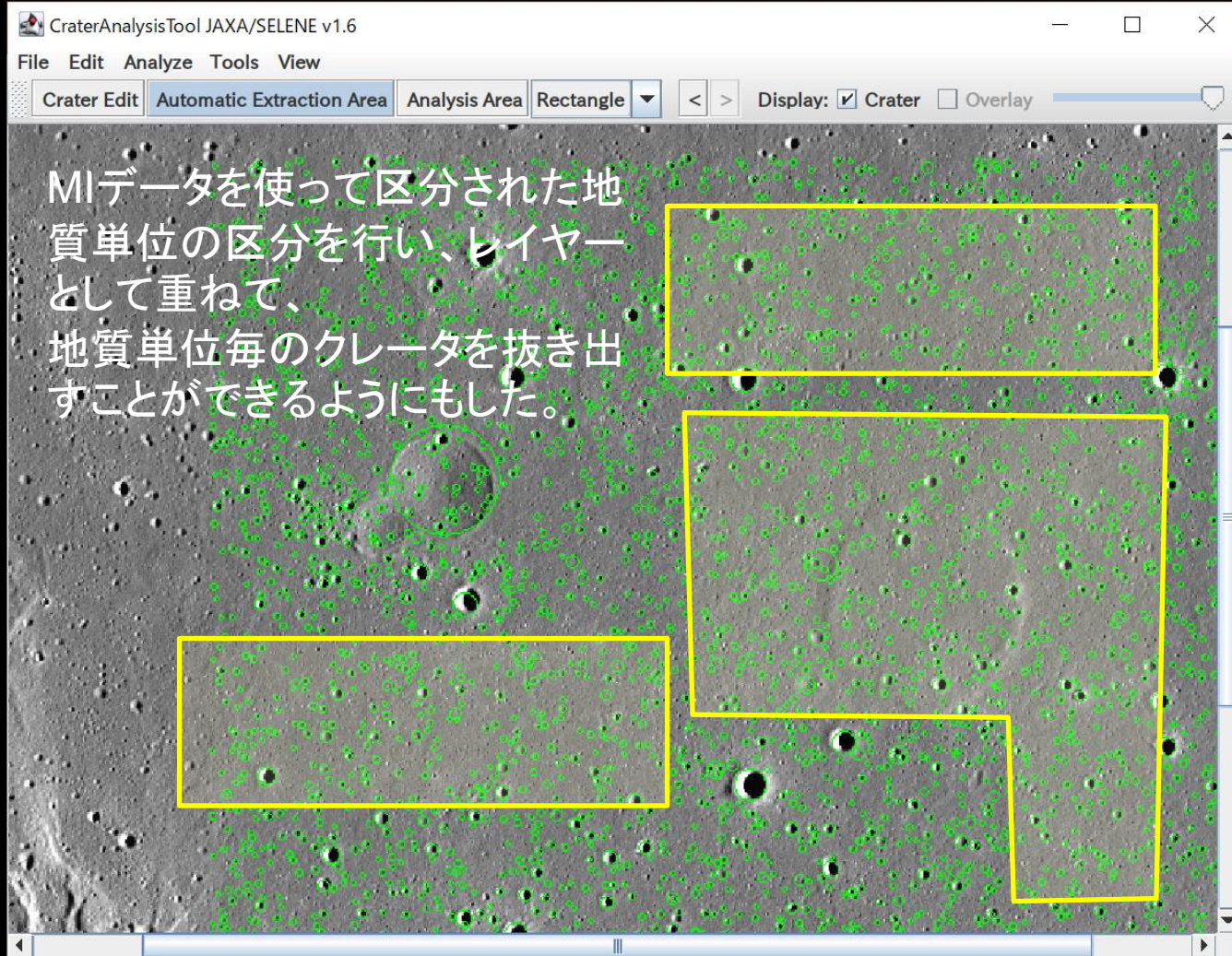
編集(修正や削除が可能)









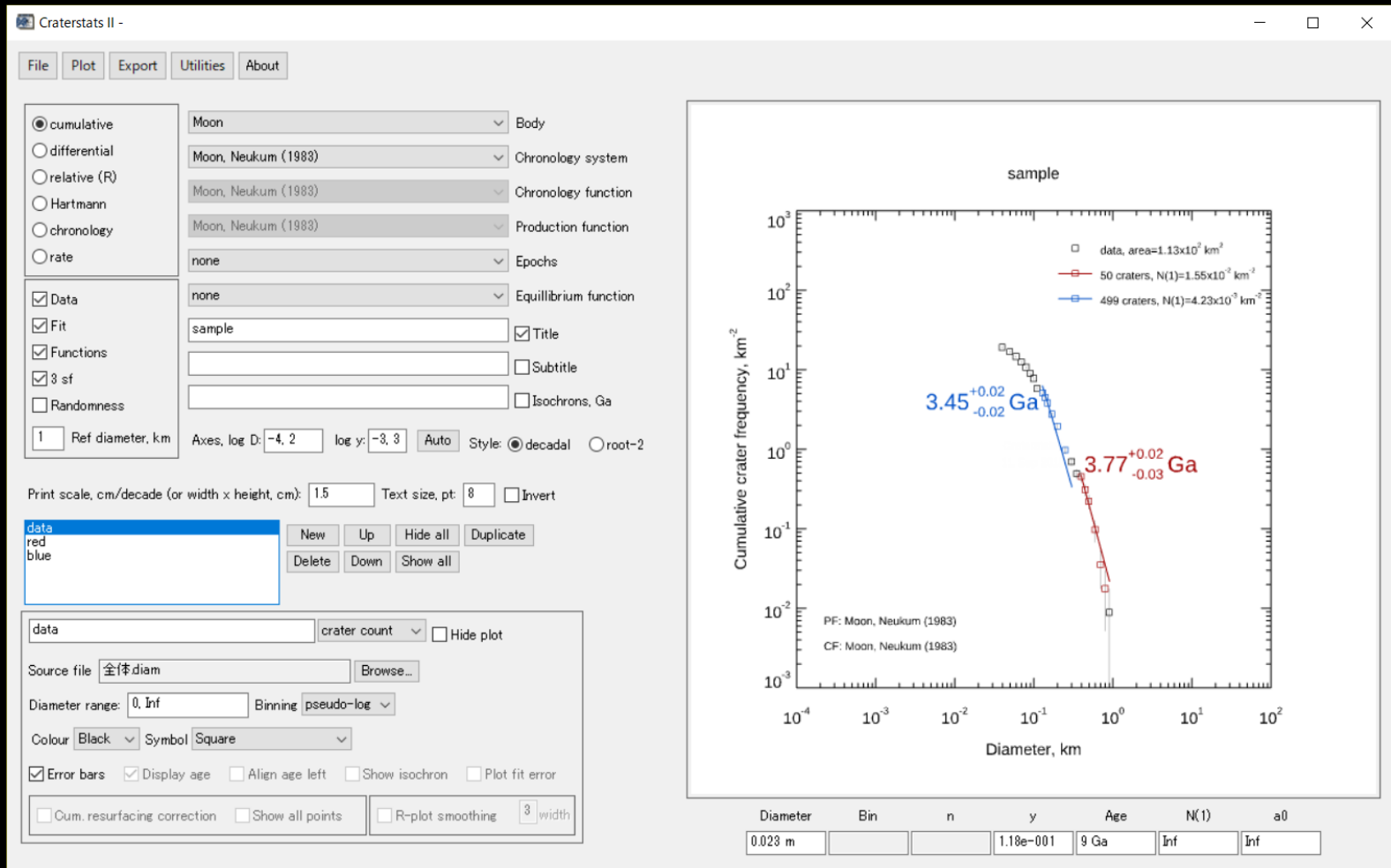


データの出力

- 出力データは、
形式:テキスト(CSV)
内容:
クレータ中心画像座標X、クレータ中心画像座標Y、クレータ直径(ピクセル)、
リム高、深さ、H/D比
- 解析範囲面積情報も出力される
- これらを、Craterstats (MarsExpressチームが開発したソフトウェア、
無償で利用可能)などを利用して年代解析することが可能

データの解析

Craterstats



今後に向けて

●ツールの問題

- ・Windows(10)で、投影法変換・解像度変換できないケースがある
- ・セキュリティ解除について、Mac-M1チップ搭載版で、初期と現在で、若干対応が異なる(?)

●ツールの公開

ツールは、春山研究室HPで公開。マニュアルはJAXA資料にまとめ公開。今後、多くの人に使ってもらって、問題・使い勝手といったことの情報を集めていきたい。

●将来研究

実際の年代、崩壊率測定他、本ツールでの誤認識のパターン、人や他自動抽出方法との差異、ケースの最適設定パラメータ、といった研究。

●取り扱い説明書の英語版

個人的に、Word文書のコメント版に載せている。

英語校正。完全英語版作成。(海外の研究者に助力してもらおう)

謝辞

これから、月探査が本格化する中、
クレータ自動抽出は、
科学的に有用であると同時に、
どこに着陸するか、どこに基地を建設するか、
といった検討をする上でも非常に役立つ。

会津大学(出村先生)と共同研究ができたこと、
あらためてお礼申し上げます

マルチバンドイメージャ 変換画面

MI Converter

MI(L3C)

Parameter

Absorption Ratioing FeO TiO

R	<input type="text" value="MV2(750)"/> ▾	/	<input type="text" value="MV1(415)"/> ▾
G	<input type="text" value="MV2(750)"/> ▾	/	<input type="text" value="MV4(950)"/> ▾
B	<input type="text" value="MV1(415)"/> ▾	/	<input type="text" value="MV2(750)"/> ▾

Level correct Standard deviation / 1 2 3 4 5

 Min-Max 0% 100%

Min Max

Projection to Ortho Image (TC / NAC)

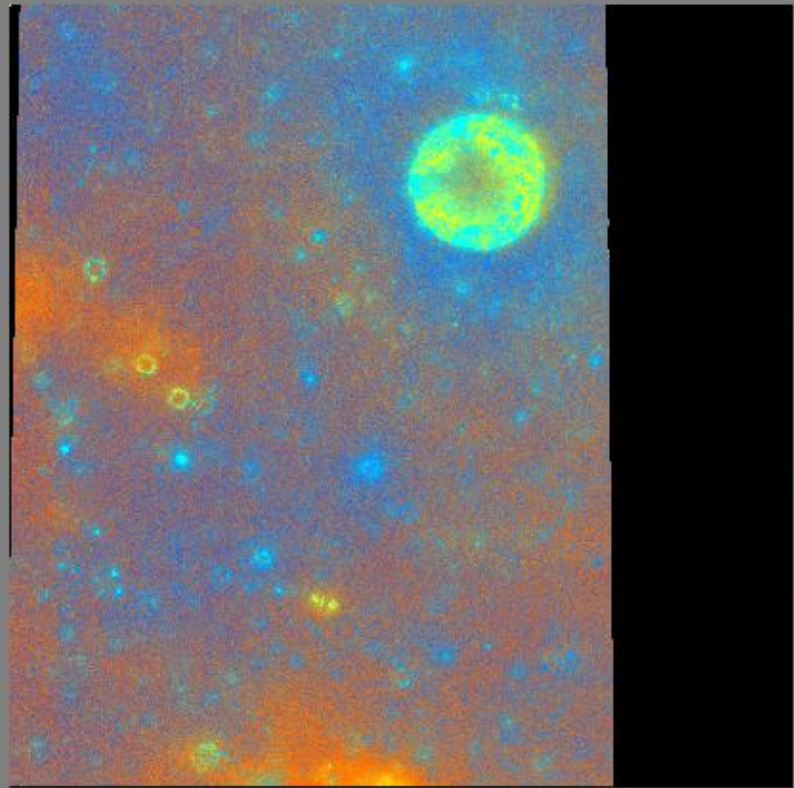
File

Pan-sharpen CLip MI

Level correct Standard deviation / 1 2 3 4 5

Min-Max

Output

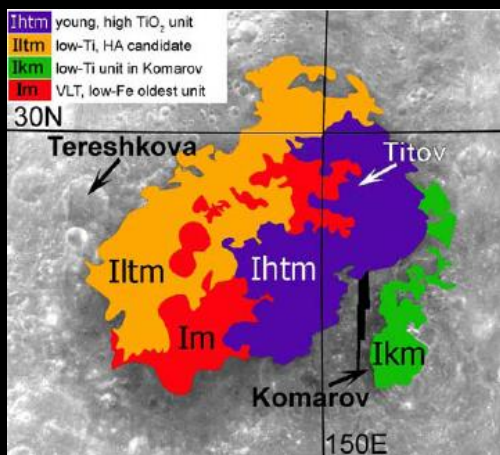


モスクワの海 (月の裏側)

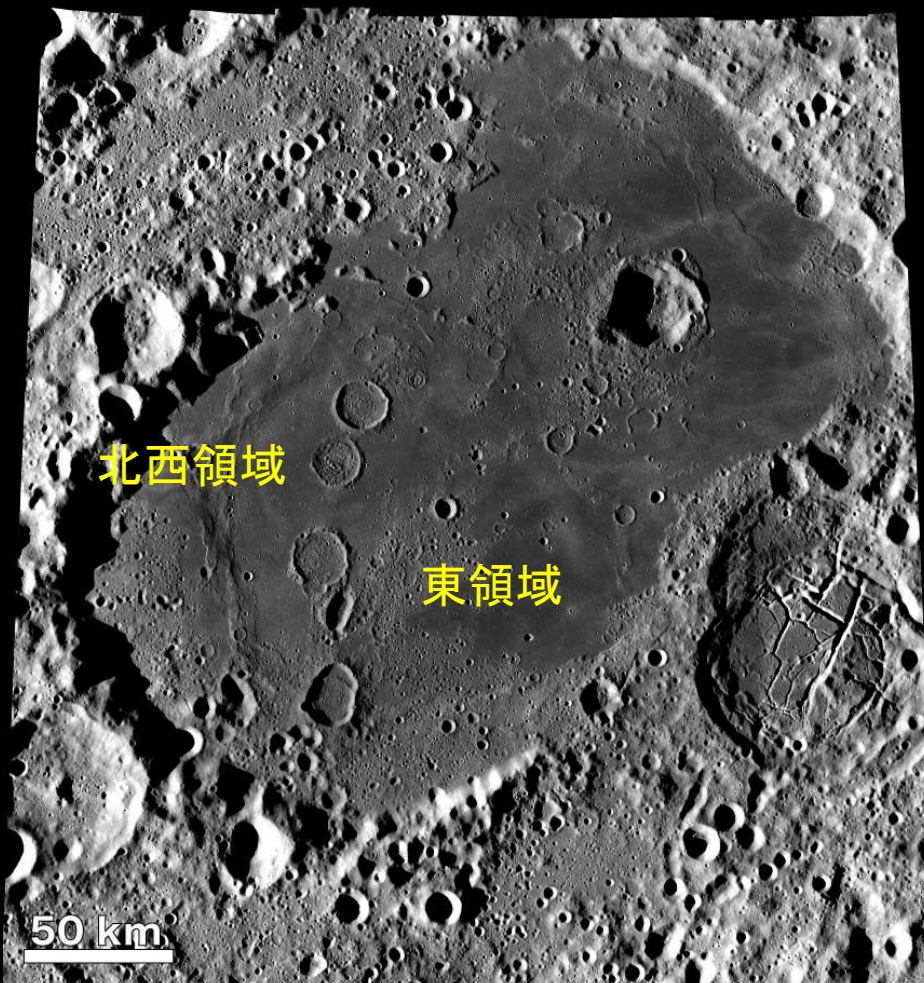


月の裏側。矢印の先がモスクワの海

<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/Clementine/images/albedo.far.jpeg>



クレメンタイン衛星の紫外-可視カメラとルナープロスペクタのガンマ線分光器のデータ使って行われたモスクワの海の物質的な違いによる領域区分。3つないし4つの領域に区分されている: 橙(北西)、青(東)、赤(南)、緑(東外部)。(Kramer et al., *JGR*, 2008)



地形カメラデータによるモスクワの海のモザイク。クレメンタイン衛星によって分けられた領域について、クレータを数え年代を決定している⁸⁰ => ~35億年前