

# 月探査機「かぐや」が明らかにした 月科学と月開発の可能性



2015年6月

## 講演の内容

1. “かぐや”の計画とは？
2. 月科学上の成果
3. 月の開発利用につながる成果（将来的には生存圏の拡大へ）

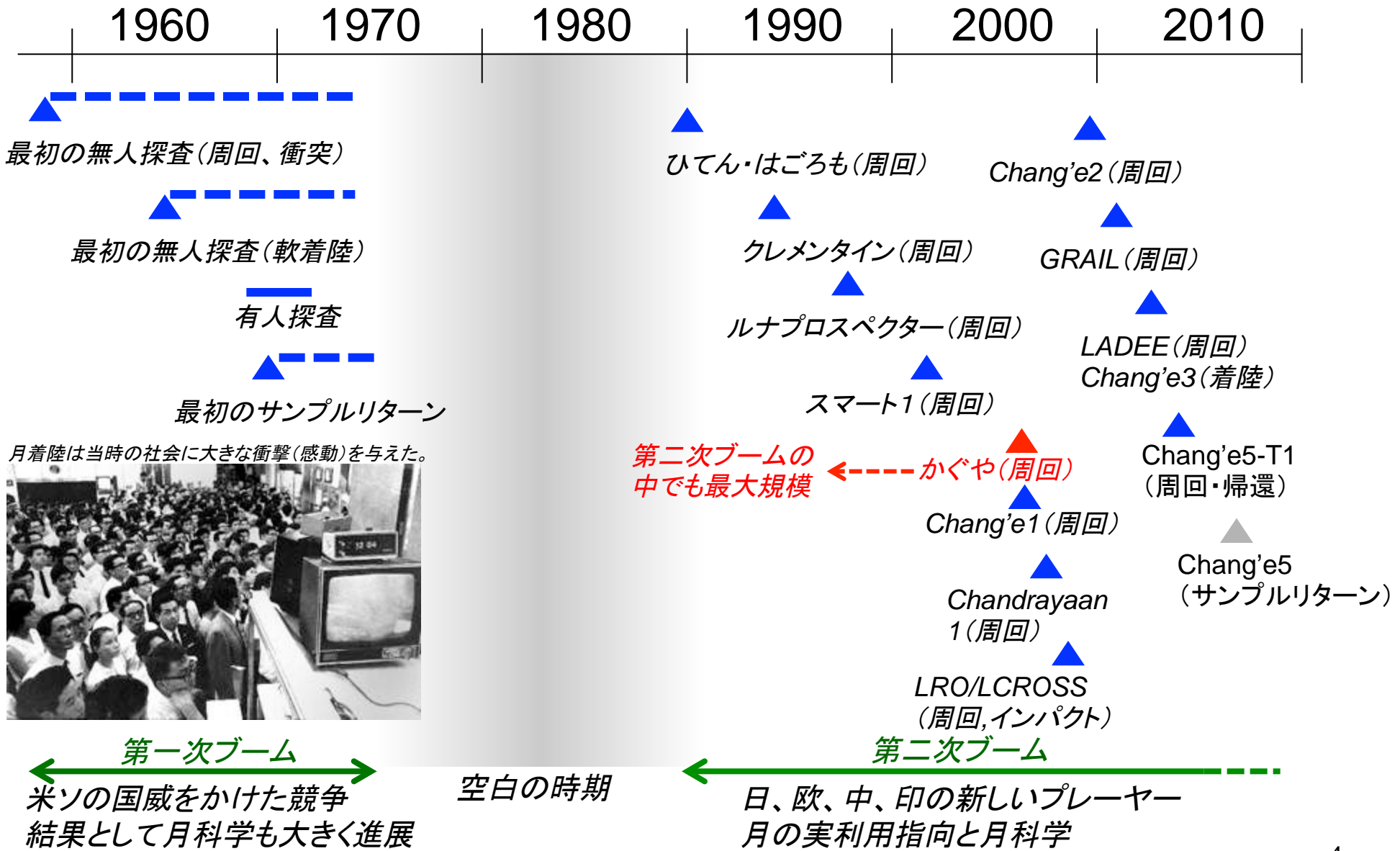




# 1. “かぐや”の計画とは？

© JAXA/NHK

# 月探査の歴史の中での“かぐや”の位置づけ



月着陸は当時の社会に大きな衝撃(感動)を与えた。



# 大型月探査機“かぐや”は、何故日本で 実現することになったのか？

- ・月の開発利用に我が国として先鞭をつけたい  
(国の政策的意図)
- ・アポロ後にも残っている月科学の謎を解明し  
たい(惑星科学者からの要望)

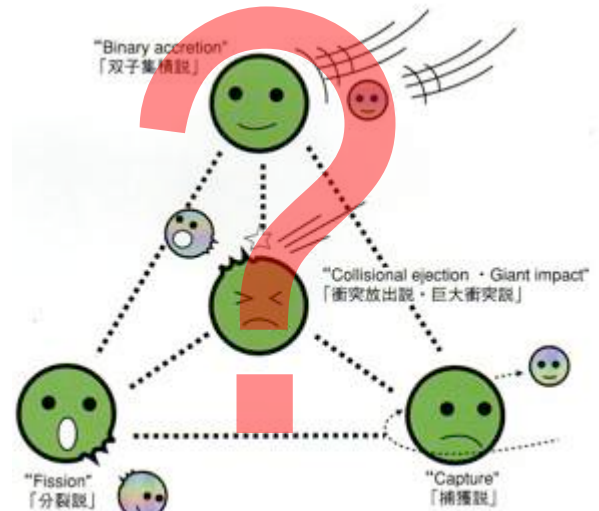
大きさ: 2.1x2.1x4.8m  
(マイクロバス程度)  
構成: 主衛星と2機の子衛星  
重さ: 約3トン



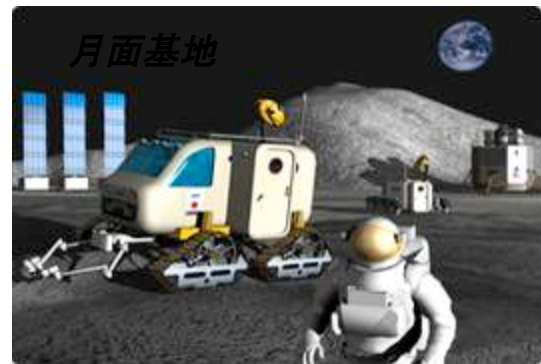


# “かぐや”の目標

1. アポロ後も未だ謎の多い月の起源と進化を明らかにする。
2. 将来、人類が月で活動したり、月を開発利用するための調査(月のどこに基地を作れば良いか?等)。



起源という根源的な問題がまだ謎



将来の月面活動のための調査

加えて、将来の月探査・開発のための技術の習得(月軌道投入、周回軌道運用、制御落下)も目指した。

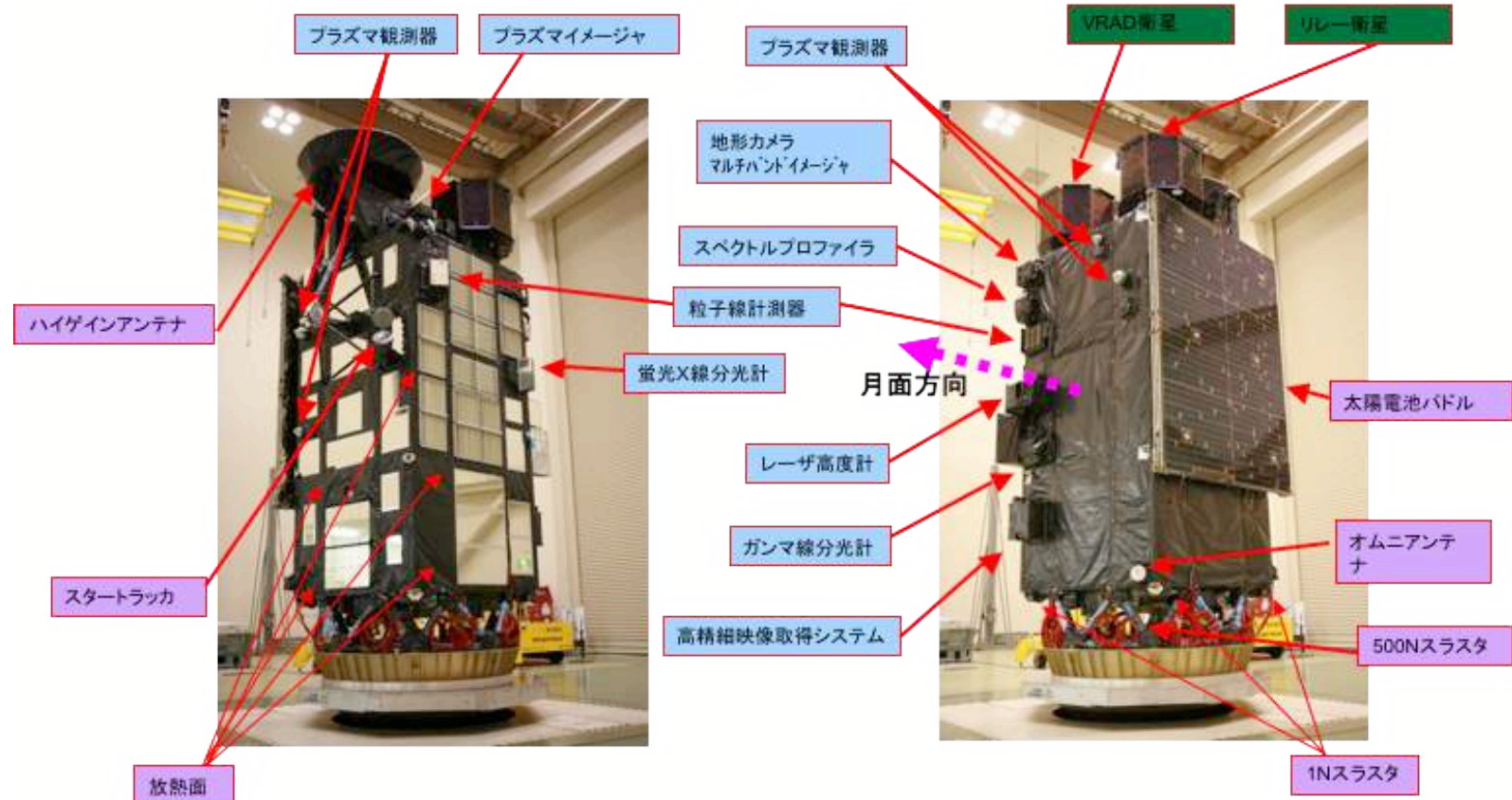
# 搭載観測機器

表面の物質の組成を調べる機器・・・4台  
表面の地形と地下の構造を調べる機器・・・3台  
重力場を調べる機器・・・2台  
環境を調べる機器・・・5台(1台は重力場用機器と同じ機器)  
広報用機器(ハイビジョンカメラ)・・・1台

観測機器の開発と運用には200名程度の大学、研究機関の研究者が参加



お祭りミッションと呼ばれた  
(良い意味でも悪い意味でも)



# “かぐや”の歴史

1995-1998年

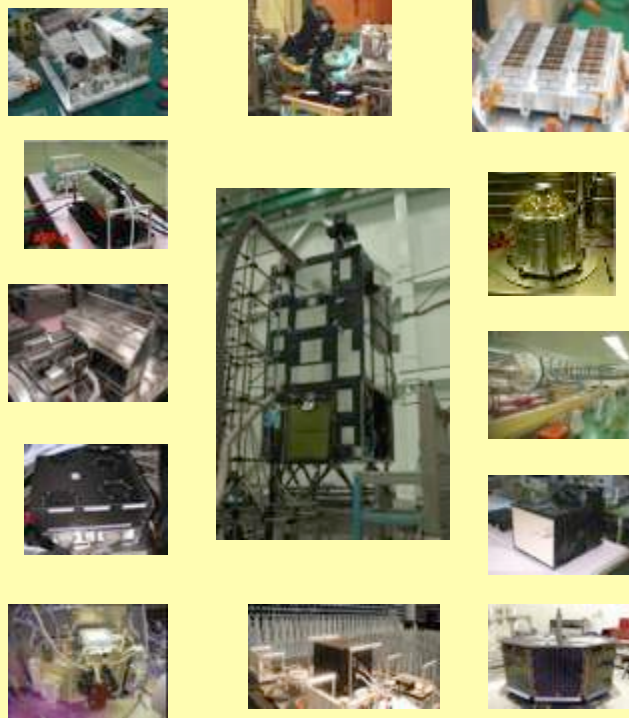
準備・提案



宇宙科学研究所、  
宇宙開発事業団で  
共同提案書作成

1999-2004年

衛星本体・観測機器の製作



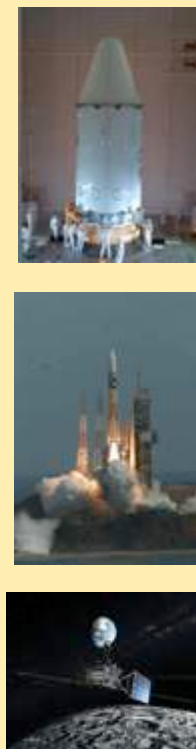
2005-2006年

組立・試験



2007-2009年

打上・運用



打ち上げ

提案書作成からミッション終了まで14年かかった。現在も内外の多くの研究者がデータ解析を継続中。8



# 月探査機”かぐや”から見た地球の出



© JAXA/N



## 2. 月科学上の成果

© JAXA/NHK

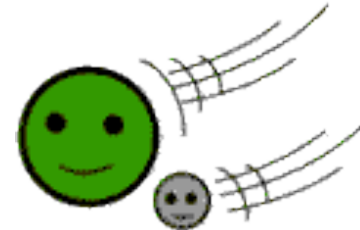
# “かぐや”がせまった月の起源



双子集積説



分裂説

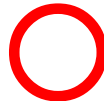


捕獲説



巨大衝突説

力学的にありうる？  
マグマの海の規模？  
物質が似ている？  
中心の重い部分の大きさ？



“かぐや”での研究



解析中。  
一定の結論が得られると想定される。

原料物質



解析中。  
最終的には内部構造探査で確定。

内部構造



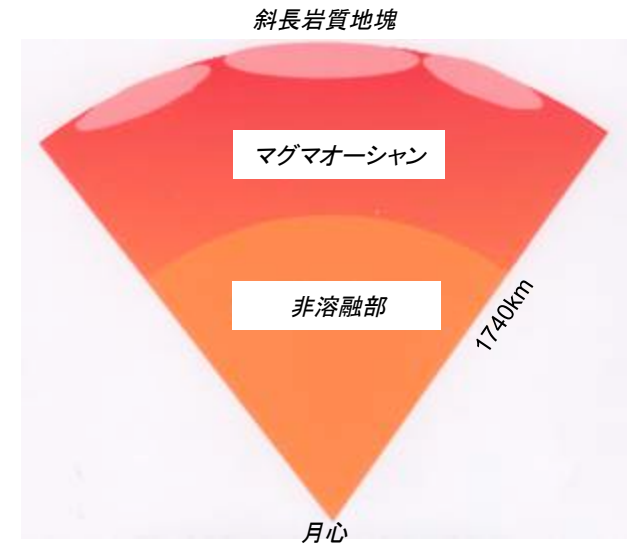
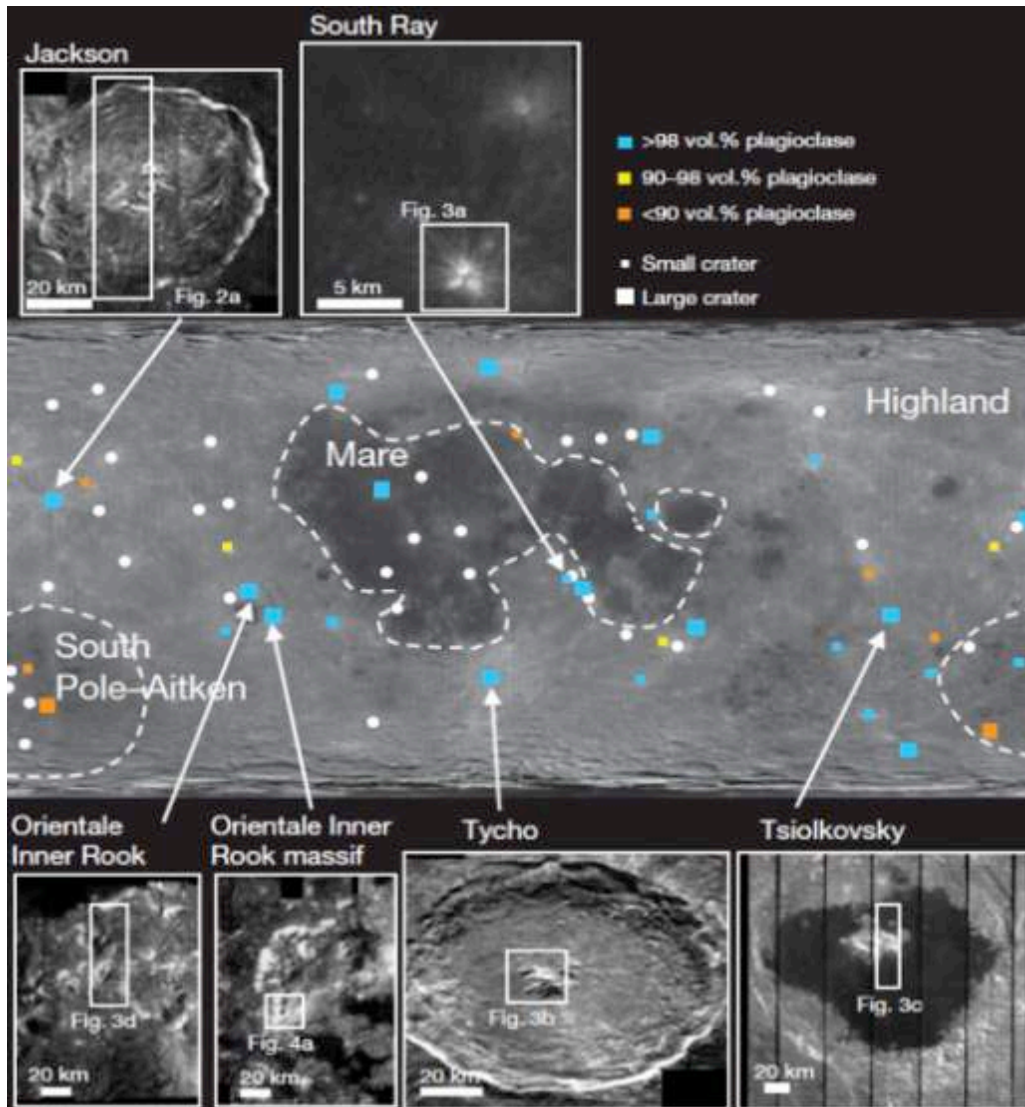
証拠をつかんだ。

全球規模のマグマ  
オーシャンの有無

月起源について結論を得る為の主要な3つの鍵



# 月マグマオーシャンの存在の証拠



マグマオーシャンに浮かぶ軽い斜長岩質の塊

多色撮像カメラで表面の岩石を同定。高純度斜長岩が月全球のクレータ中央丘で存在することが分かり、マグマオーシャンが全球に亘って存在したことの直接的証拠を発見。これにより、ジャイアント・インパクトにより月が誕生したことが示唆された。(Ohtake et al., Nature, 2009)

# “かぐや”が明らかにした月進化

月が生まれた時には、温度が高く、月全体が溶けていた(マグマオーシャン)。



その後、裏側から冷えてかたい表面が作られ、次第に表側も固まっていた。



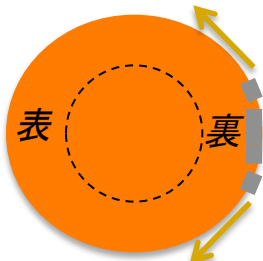
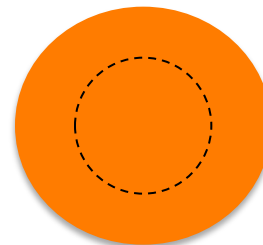
生まれた後しばらくは、中心付近に溶けた金属のような場所があり、地球と同じような磁場があった。



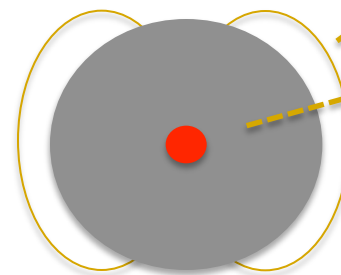
全球が冷却、但し以前考えられていたよりも冷却は緩やかで、比較的火成活動も最近までであった。



いまでも中心付近で溶けてやわらかい部分が少しある。

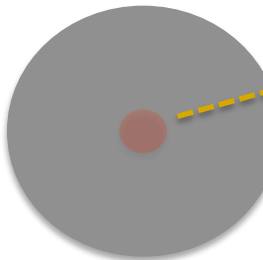


固まった地殻



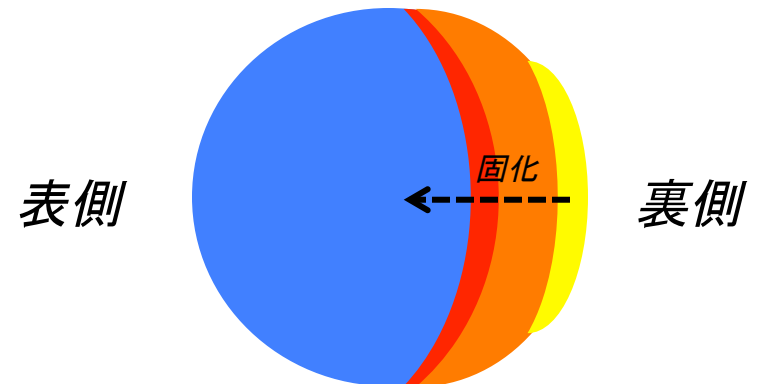
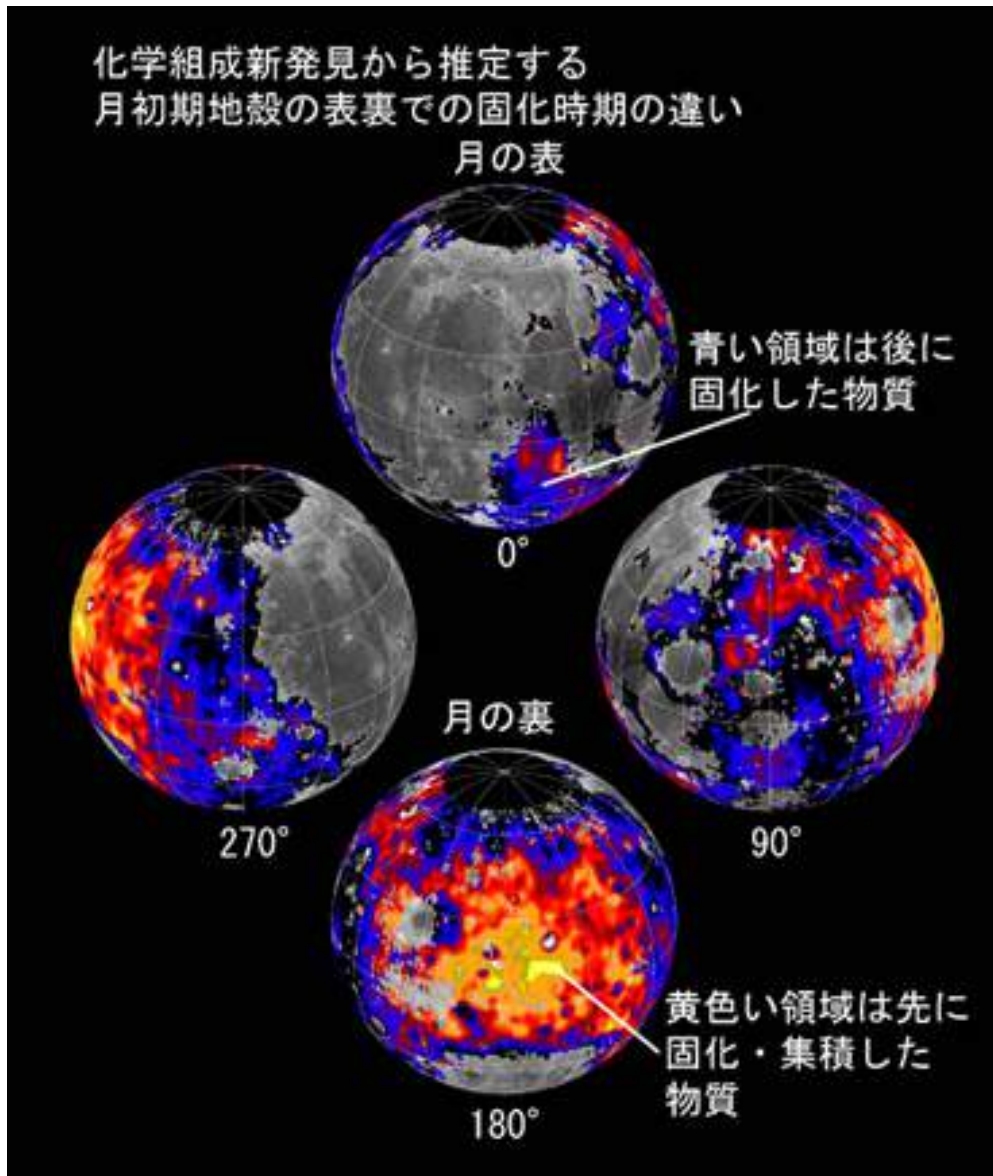
磁場

溶けている部分



少しだけ溶けている部分

# 月地殻の形成過程



マグマオーシャンの固化の順序(模式図)

マグマから鉱物が析出する際、時期が遅くなるほどMg/Fe比が小さくなる。分光器によりMg/Fe比を同定し、固化の順序を推定した。黄色が最も古く、橙・赤・青への新しくなる。月の裏側中央に最初の地殻が誕生し(黄色の領域)、周囲、そして月の表側へ徐々に地殻が広がったことが明らかにされた。

(Ohtake et al., Nature Geoscience, 2012)



# “かぐや”が明らかにした月進化

月が生まれた時には、温度が高く、月全体が溶けていた(マグマオーシャン)。



その後、裏側から冷えてかたい表面が作られ、次第に表側も固まっていた。



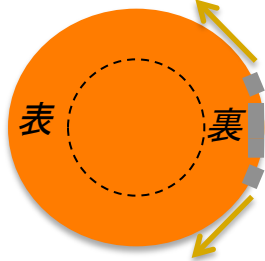
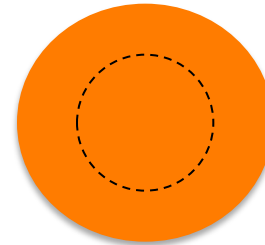
生まれた後しばらくは、中心付近に溶けた金属のような場所があり、地球と同じような磁場があった。



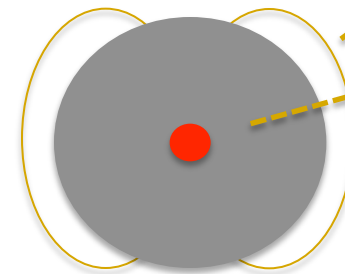
全球が冷却、但し以前考えられていたよりも冷却は緩やかで、比較的火山活動も最近までであった。



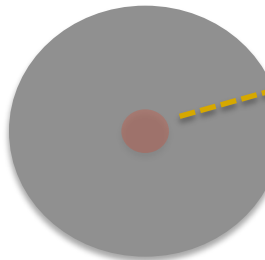
いまでも中心付近で溶けてやわらかい部分が少しある。



固まった地殻

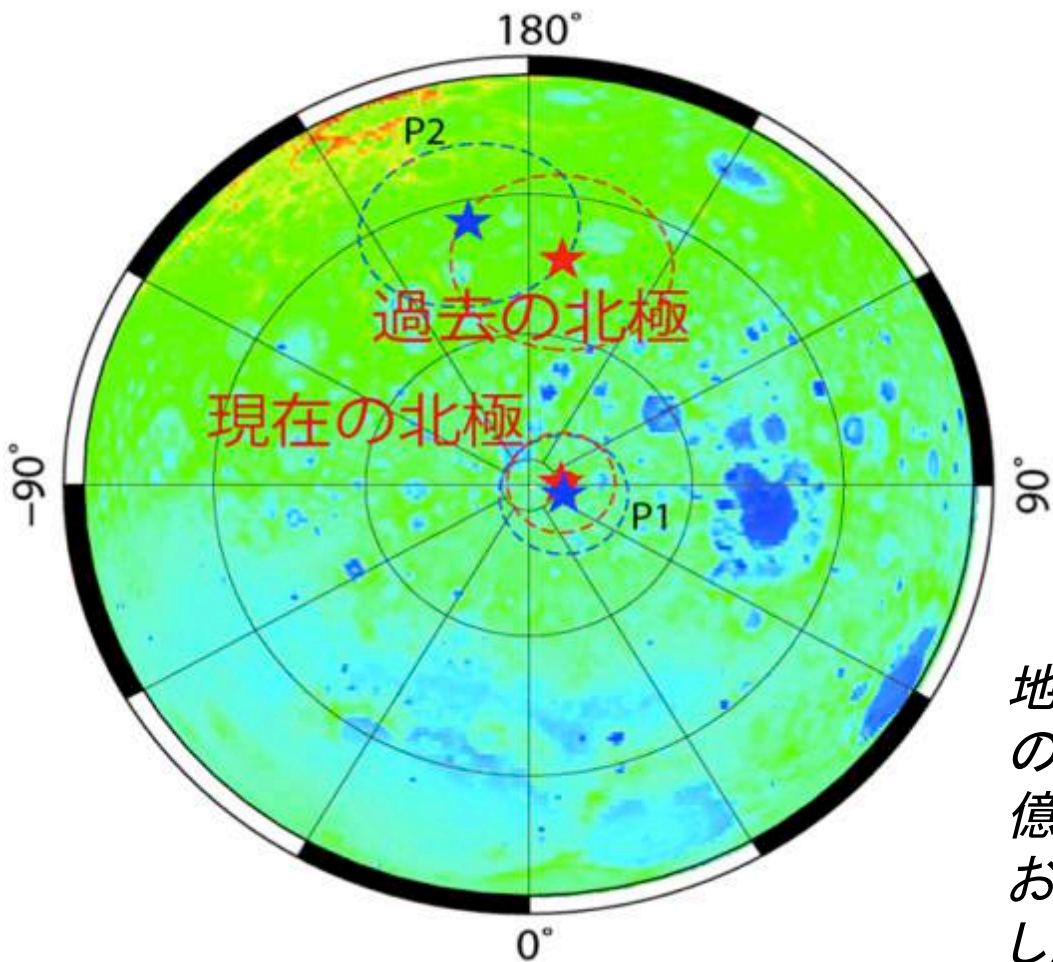


磁場  
溶けている部分



少しだけ溶けている部分

# 太古の月に大規模な磁場の存在



過去の月の磁極を現在の月北極側から見た図。青い星印がSELENEデータによる結果。



地球の大規模磁場(国土地理院ホームページ)

地磁気の10万分の1という極めて弱い磁場の計測が可能で高性能磁力計により、約40億年前には月にも大規模磁場があったこと、および磁極が数十度動いたことを明らかにした。これにより過去の月にダイナモ作用による大規模磁場が存在し、月に十分な大きさの流体金属コアがあったことを示した。  
(Takahashi et al., Nature Geoscience, 2014)

# “かぐや”が明らかにした月進化

月が生まれた時には、温度が高く、月全体が溶けていた(マグマオーシャン)。



その後、裏側から冷えてかたい表面が作られ、次第に表側も固まっていた。



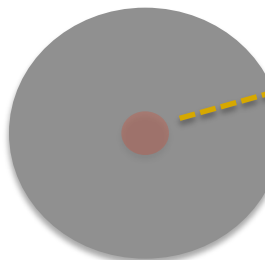
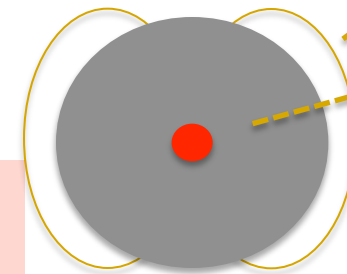
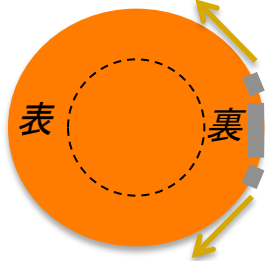
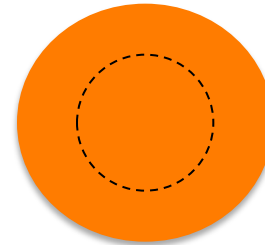
生まれた後しばらくは、中心付近に溶けた金属のような場所があり、地球と同じような磁場があった。



全球が冷却、但し以前考えられていたよりも冷却は緩やかで、比較的火成活動も最近までであった。

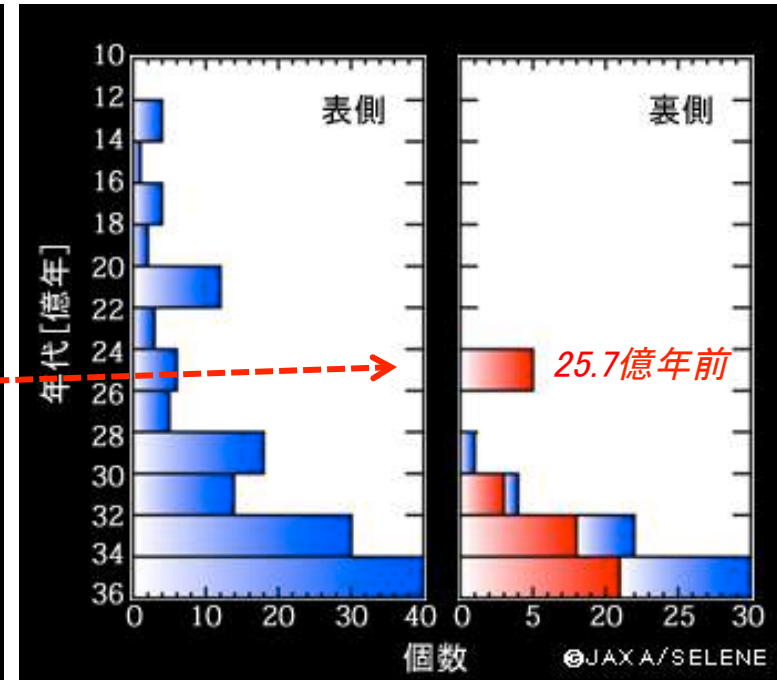
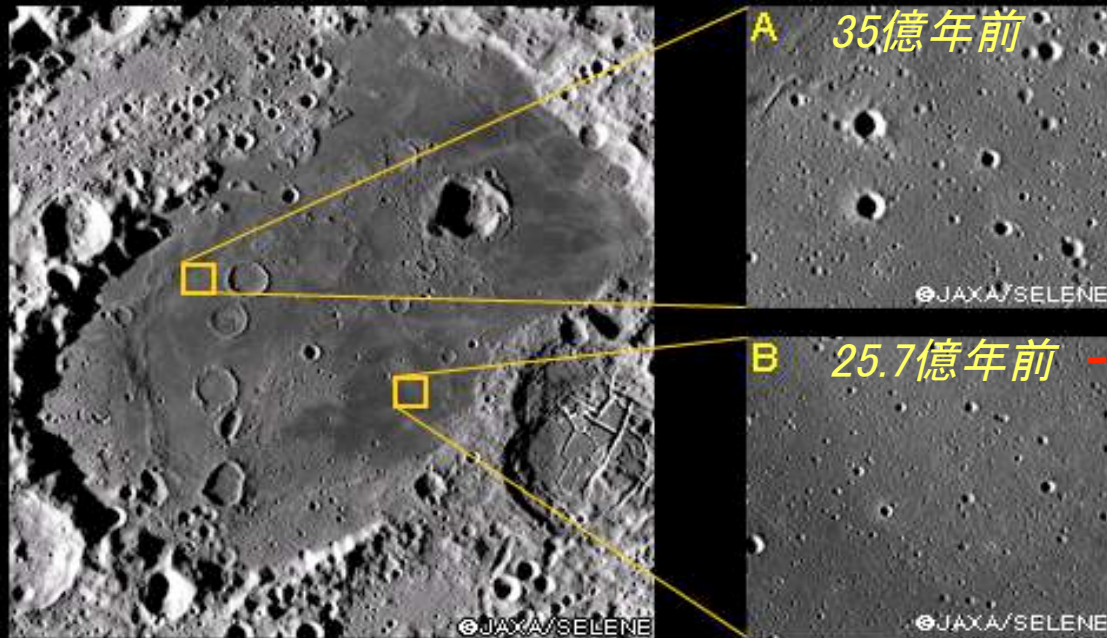


いまでも中心付近で溶けてやわらかい部分が少しある。





# クレータの分布観測を利用した月面の年代推定



10m分解能の地形カメラによって得られた画像データをもとに、クレータ年代学の手法により、月の裏側の海(モスクワの海など)の形成年代を調べた。その結果、月の裏側で、25億年前までの長い期間にわたりマグマの噴出活動があったことが判明した。従来の観測データから推定されていたモスクワの海の年代は、30数億年前とされていた。図の青色部分は、これまでの研究により推定されている海のそれぞれの領域の形成時期で、赤色部分は今回の研究成果により新たに推定できた形成時期。月の裏側の海には、25億年前頃に出来た領域もあることが推定される(Haruyama et. al., Science, 2009)。

# “かぐや”が明らかにした月進化

月が生まれた時には、温度が高く、月全体が溶けていた(マグマオーシャン)。



その後、裏側から冷えてかたい表面が作られ、次第に表側も固まっていた。



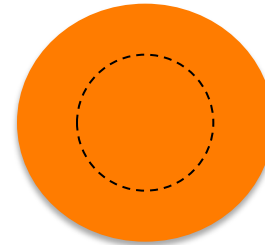
生まれた後しばらくは、中心付近に溶けた金属のような場所があり、地球と同じような磁場があった。



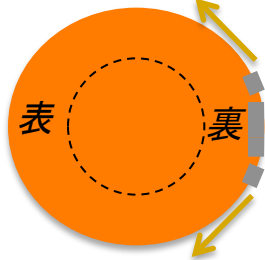
全球が冷却、但し以前考えられていたよりも冷却は緩やかで、比較的火成活動も最近までであった。



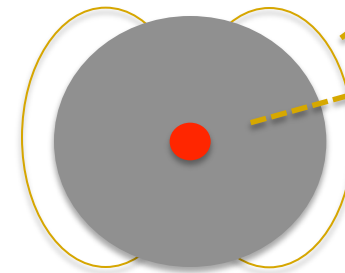
いまでも中心付近で溶けてやわらかい部分が少しある。



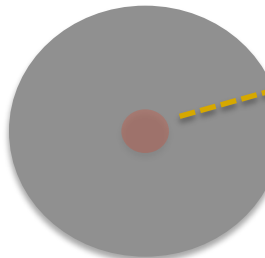
マグマの海



固まった地殻

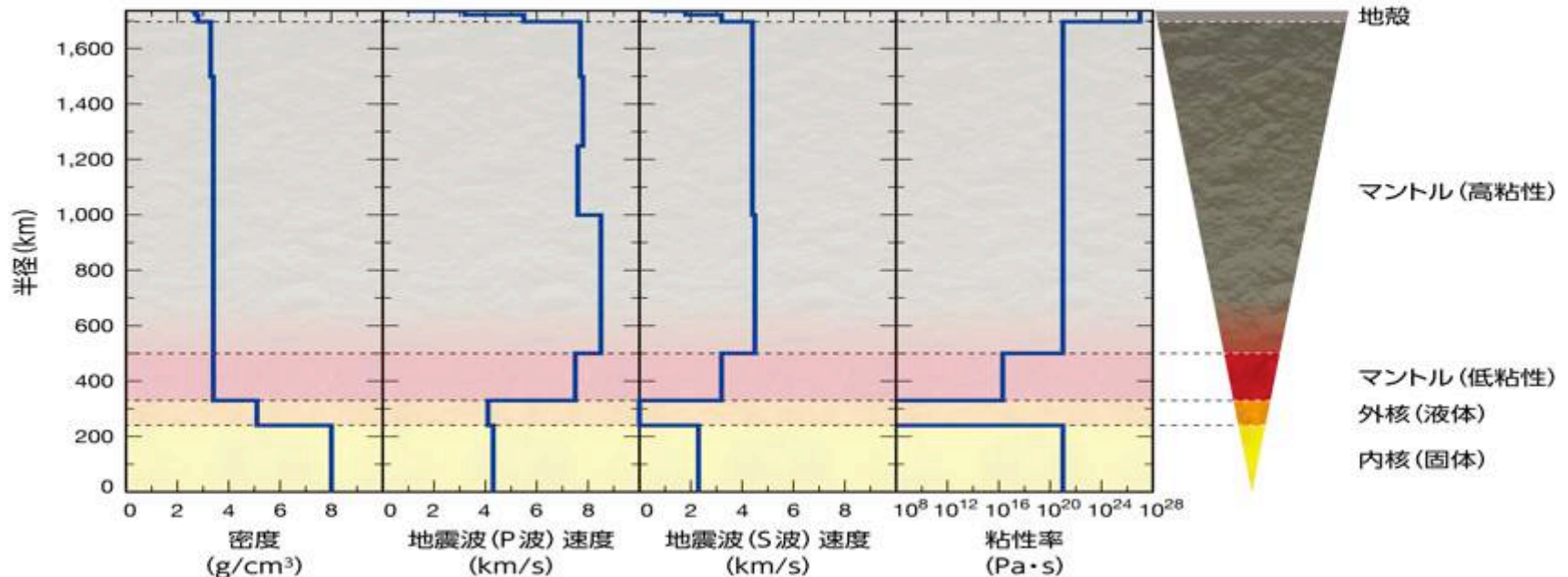


磁場  
溶けている部分

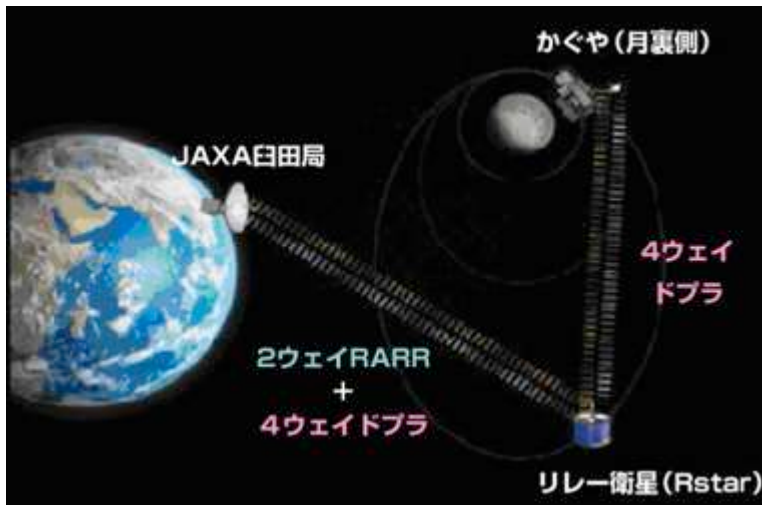


少しだけ溶けている部分

# 月マントル最深部における潮汐加熱



月の形の変化を説明できる月内部の粘性率の推定



子衛星を用いた月重力探査

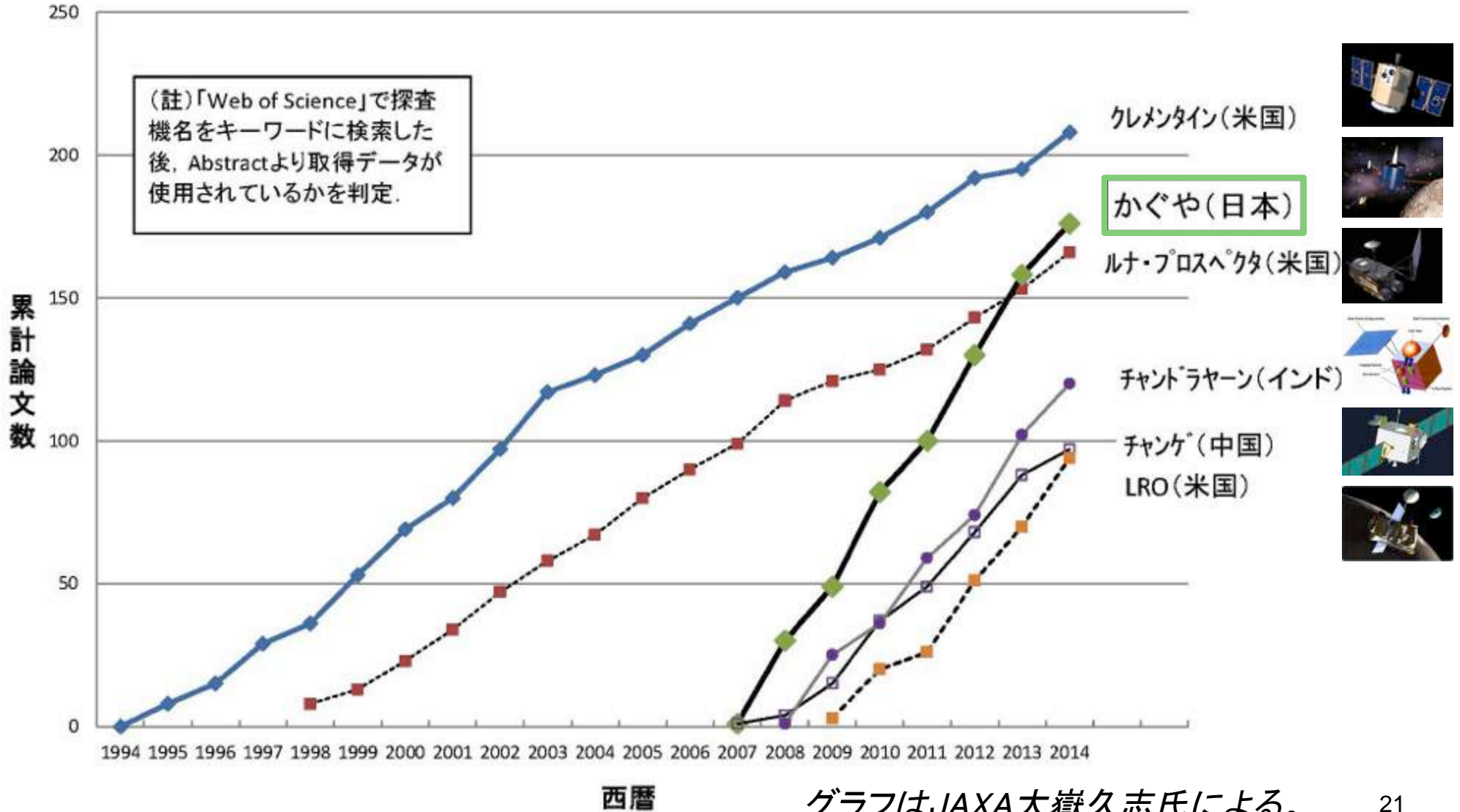
月は地球等による潮汐力によってその形が変化する。2機の小衛星を用いた「かぐや」の観測によって月の形の変化を詳細に調べ、どのような月の内部構造を推定した。月のマントルの最深部に軟らかい層があると仮定することで、観測結果をうまく説明できた。

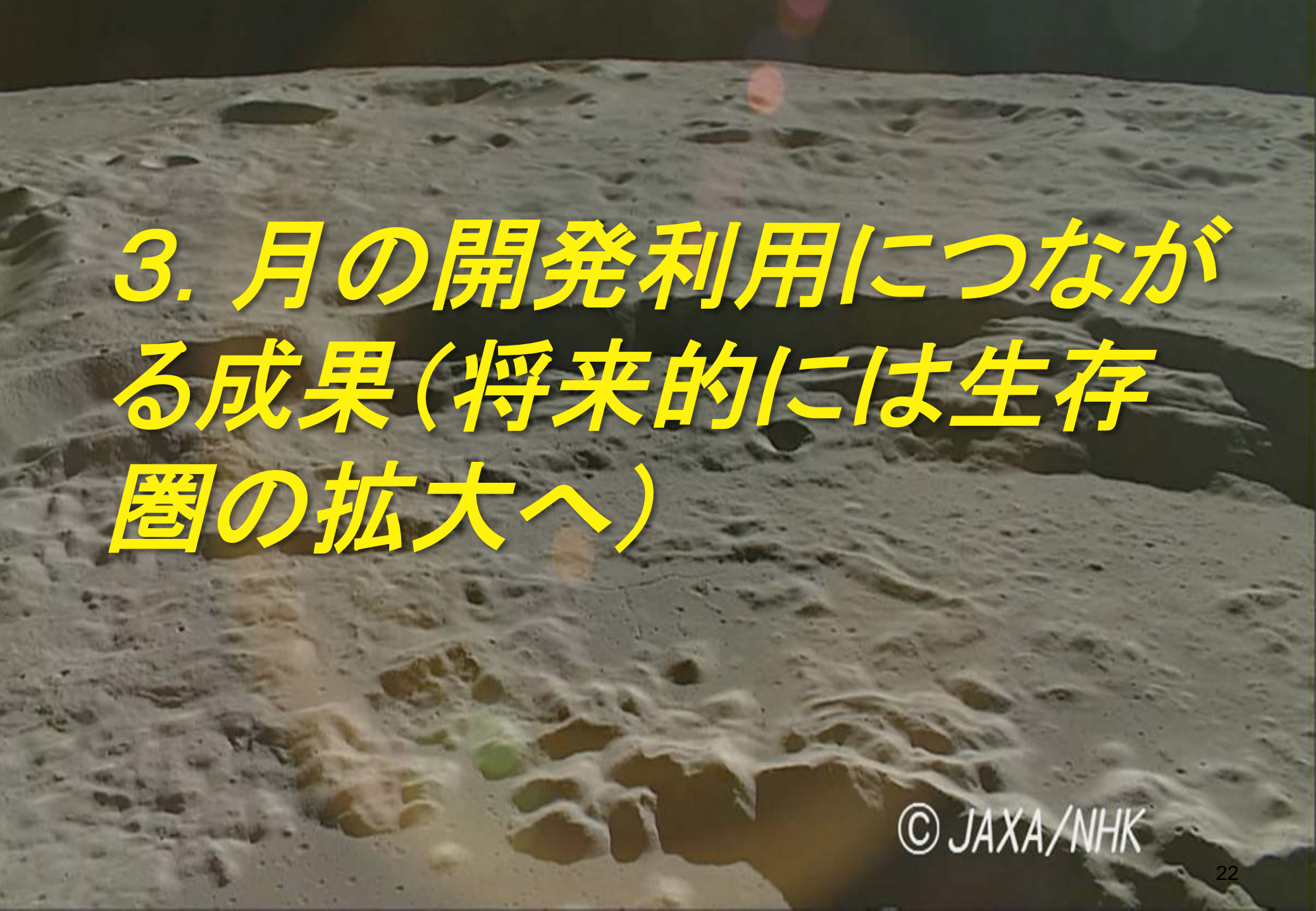
(Harada et al., Nature Geoscience, 2014)



# “かぐや”ミッションの科学論文数

月探査機の観測データを用いた論文数  
(打ち上げ以降, 2014/12/Eまでの累計)





### 3. 月の開発利用につながる成果（将来的には生存圏の拡大へ）



Dr. Gerard O' Neill

# 宇宙への生存圏の拡大



大林辰蔵先生

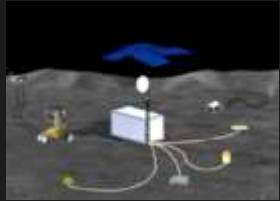
大林辰蔵先生(宇宙に夢中、昭和60年)

人口爆発:最近の人口の伸びは2%程度(過去100年)、このままだと500年後は150兆人(全ての地上に1mおきに人間)。人類は、物理的に生存可能な場があれば常に生存圏を拡大し、人口を伸ばし続けるという宿命を持った生命体(これは人間の遺伝子に書いてある)。実際、人類の歴史を見ると、アフリカに発生してアジア、ヨーロッパ、アメリカ大陸へと生存圏を広げ続け、生存圏拡大の停滞あるいは縮小の時代はこれまではなかった。

宇宙空間への拡大:まずは月、その後、軌道上植民地、火星など他惑星



# 月での生存圏構築へのステップ



無人探査サービス  
ステーション



短期滞在型有人拠点



常時滞在型有人拠点



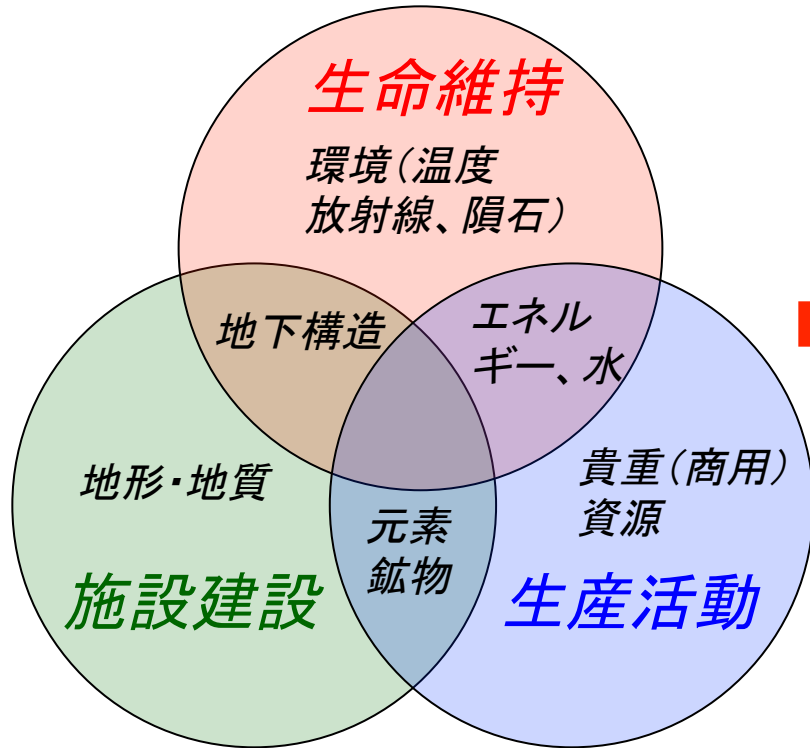
月面都市

--> 探査・調査

——> 開発

——> 移住

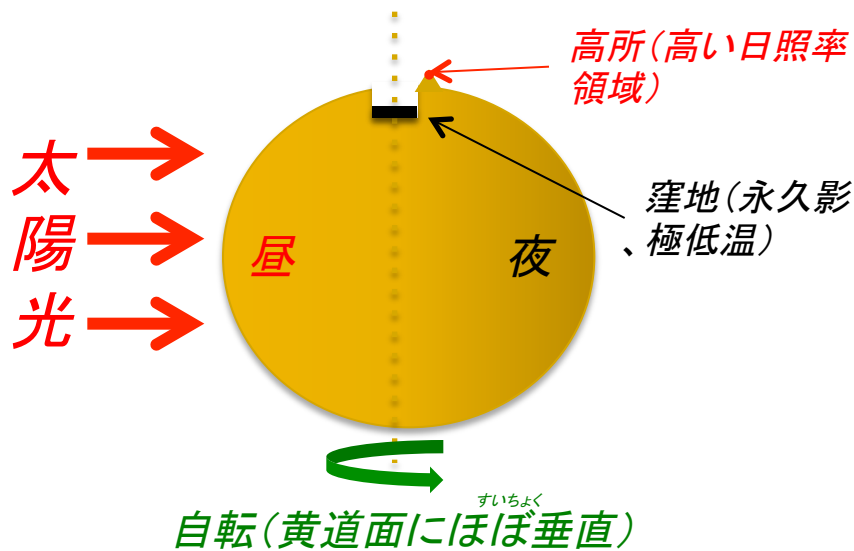
# 月面の生存圏構築のために必要な情報



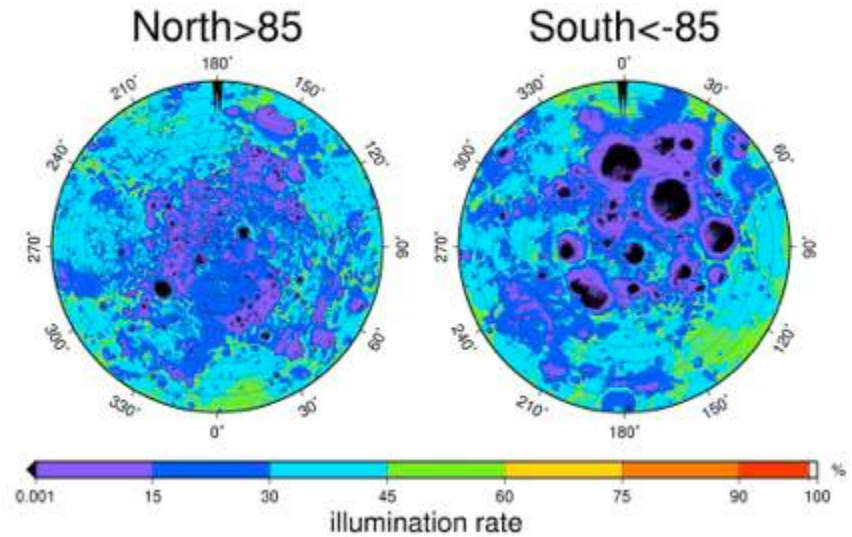
生存圏を支える3本柱

必要な情報	生命維持	施設建設	生産活動	“かぐや”での調査
環境(温度、放射線、隕石)	√			(既に基本的なデータあり。“かぐや”での調査はなし)
エネルギー、水	√		√	全日照領域調査 永久影内部調査
地下構造	√	√		縦穴と空洞の発見
地形		√		3次元データ(10m分解能)を全球で取得
元素、鉱物		√	√	岩石、U,Th分布データを全球で取得
貴重(商用)資源			√	(He <sub>3</sub> が代表的な候補だが“かぐや”での調査はなし)

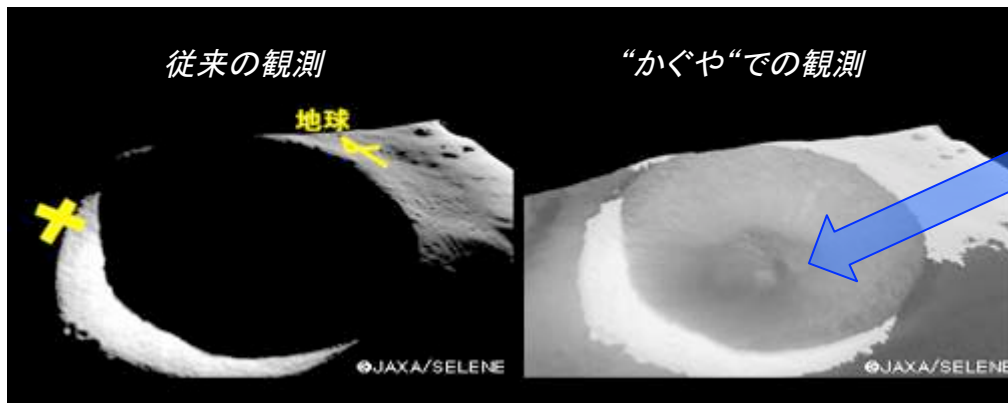
# 高い日照率領域と極域の永久影の氷 (太陽エネルギーと水)



極域では高日照領域と永久影 (氷が存在する領域) が存在し、月面基地の有力候補



“かぐや”の観測結果。黒い部分が「永久影」領域。月面で最大の日照率は北極域で89%、南極域で86%であり、100%の永久日照の地域はないことが明らかになった(Noda et al., GRL, 2008)。



月面基地の候補南極付近のシャクルトンクレータ

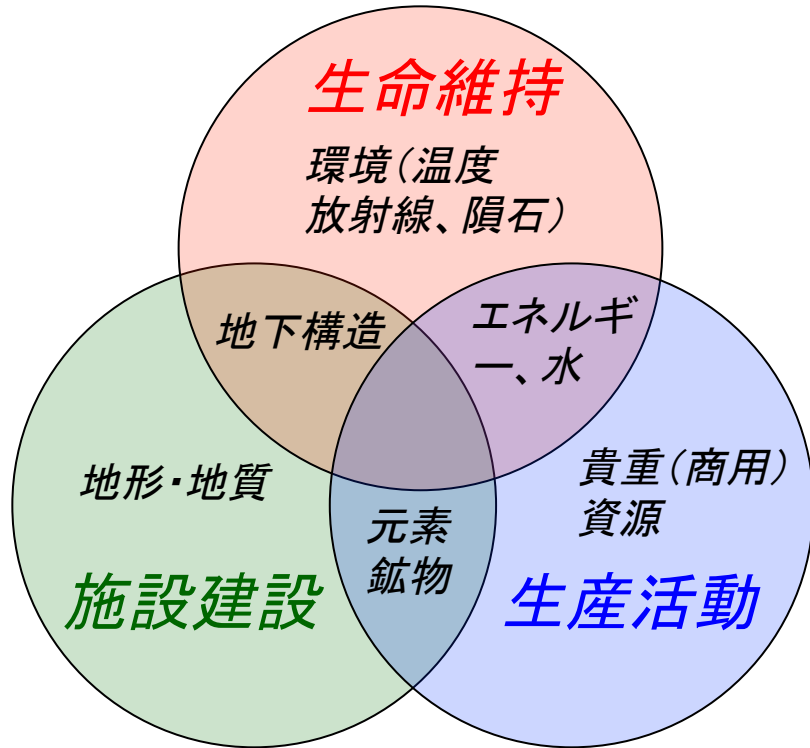
地形カメラが映し出しシャクルトンクレータの内部。水氷による高い反射率の場所は存在せず、クレータ底部には水氷は露出した形で大量には存在しないことが判明した。水氷はあっても数パーセント (Haruyama et al., Science, 2008)。



火星の場合 (マーズ・エクスプレス、2005年)



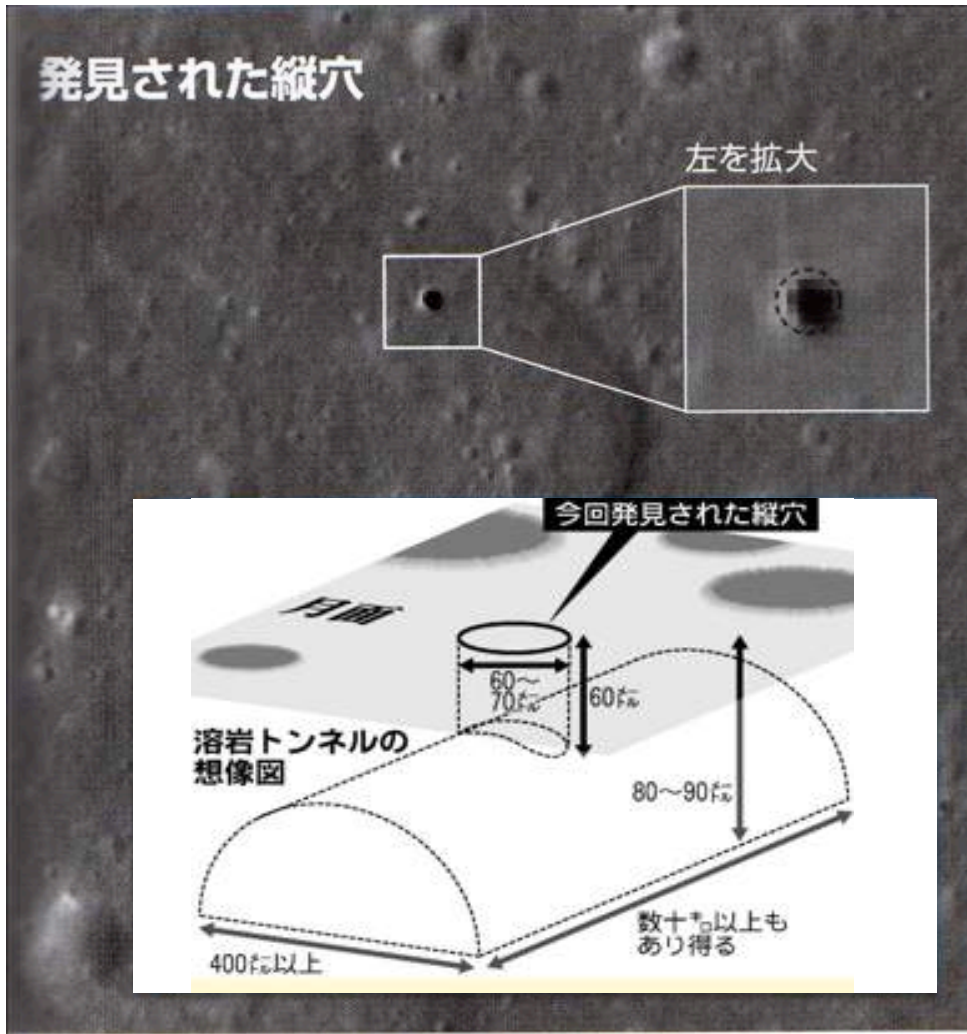
# 月面の生存圏構築のために必要な情報



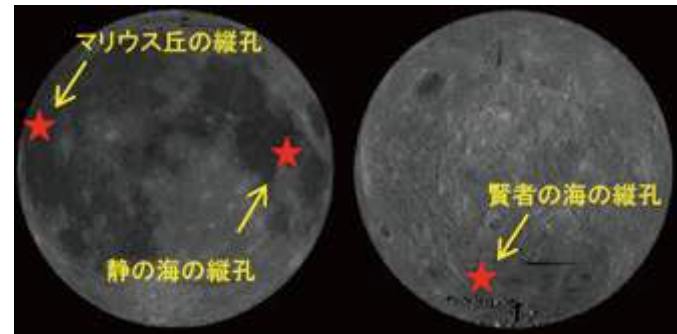
生存圏を支える3本柱

必要な情報	生命維持	施設建設	生産活動	“かぐや”での調査
環境(温度、放射線、隕石)	√			(既に基本的なデータあり。“かぐや”での調査はなし)
エネルギー、水	√		√	全日照領域調査 永久影内部調査
地下構造	√	√		縦穴と空洞の発見
地形		√		3次元データ(10m分解能)を全球で取得
元素、鉱物		√	√	岩石、U,Th分布データを全球で取得
貴重(商用)資源			√	(He <sub>3</sub> が代表的な候補だが“かぐや”での調査はなし)

# 縦穴と地下空洞の発見



縦穴(径70m程度)と空洞(最大370m程度) (Haruyama et al., GRL, 2009)

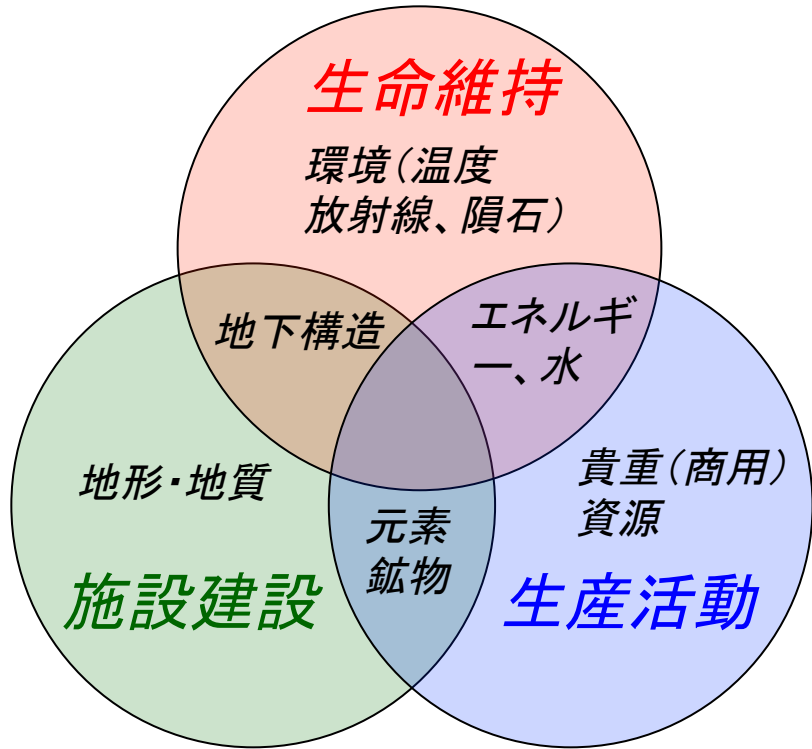


発見された月面の100m級の縦穴構造(3ヶ所)



温度:  $-20^{\circ}\text{C}$ 一定(表面は  $-170\sim+110^{\circ}\text{C}$ )  
放射線: 地上と同じレベル(約 $1\text{mSv/年}$ 、  
月面で $100\text{-}500\text{mSv/年}$ 、 $5\text{m}$ 厚の月の砂)  
隕石: 隕石や隕石の飛散物からの防護

# 月面の生存圏構築のために必要な情報



生存圏を支える3本柱

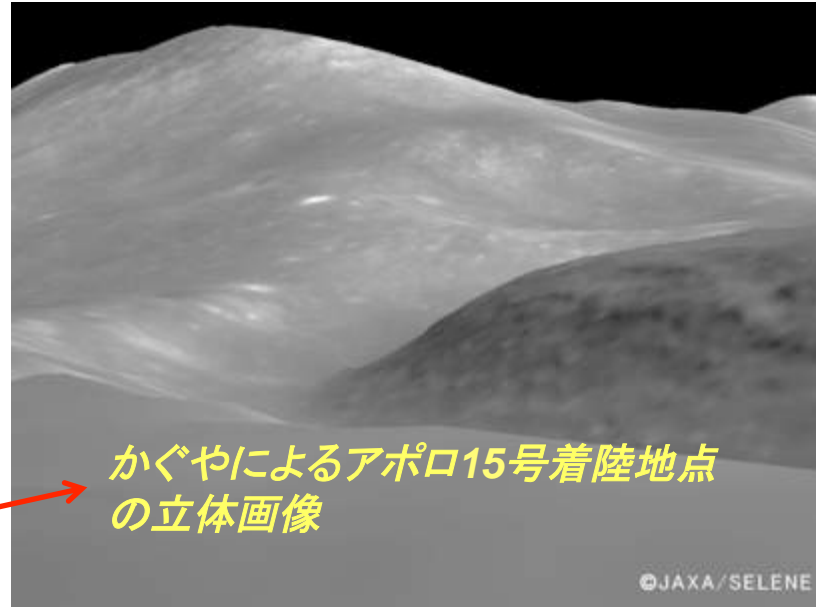
必要な情報	生命維持	施設建設	生産活動	“かぐや”での調査
環境(温度、放射線、隕石)	√			(既に基本的なデータあり。“かぐや”での調査はなし)
エネルギー、水	√		√	全日照領域調査 永久影内部調査
地下構造	√	√		縦穴と空洞の発見
地形		√		3次元データ(10m分解能)を全球で取得
元素、鉱物		√	√	岩石、U,Th分布データを全球で取得
貴重(商用)資源			√	(He <sub>3</sub> が代表的な候補だが“かぐや”での調査はなし)



# 3次元の詳細な地形の情報

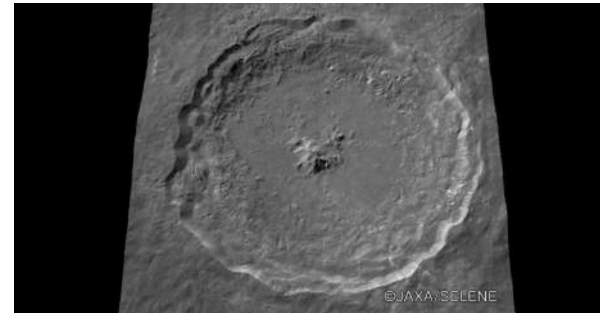
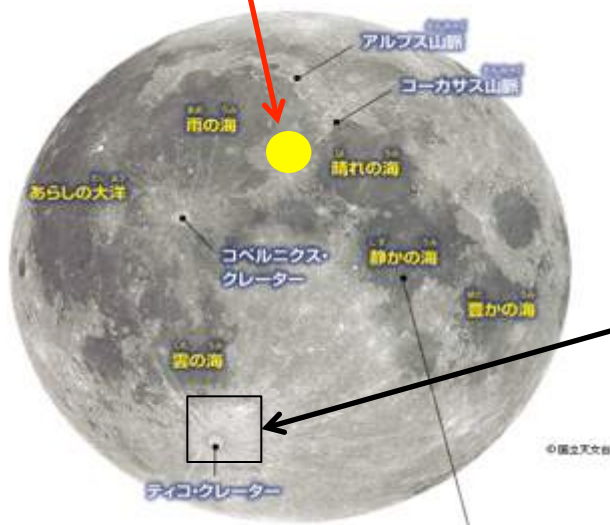


アポロ15号着陸地点の写真



かぐやによるアポロ15号着陸地点の立体画像

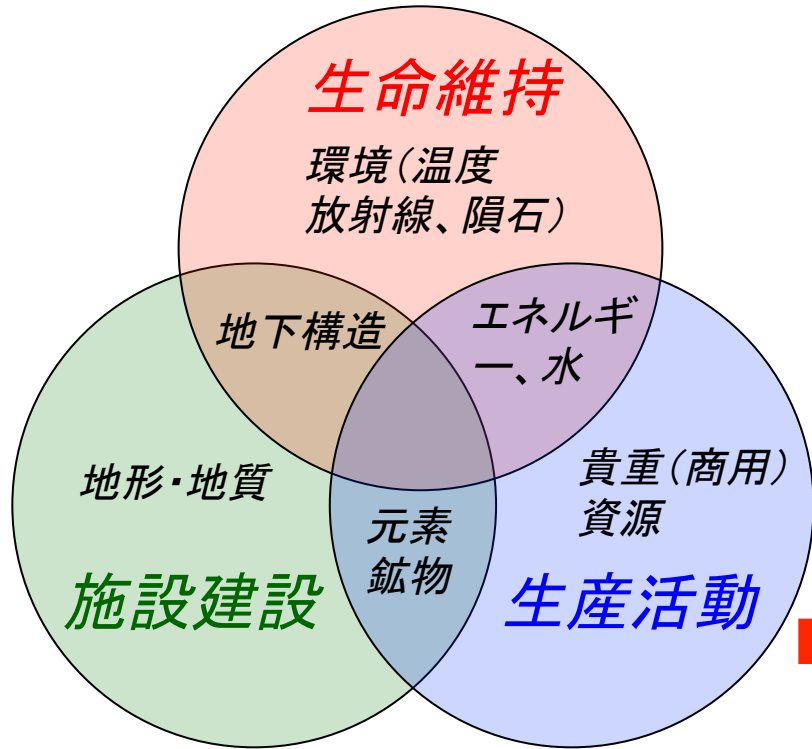
雨の海 ハドリー山(アポロ15号着陸地点)



## ティコクレーター

直径85km、中央に山がある。1.1億年前にできた新しいクレーター。地球からも長くのびた光の筋がよく見える。上空の遊覧飛行映像が製作された(飛んでいるように見える映像)(JAXA/ISAS かぐや画像ギャラリー)

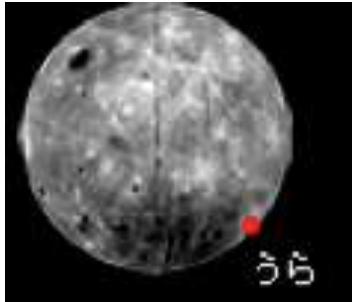
# 月面の生存圏構築のために必要な情報



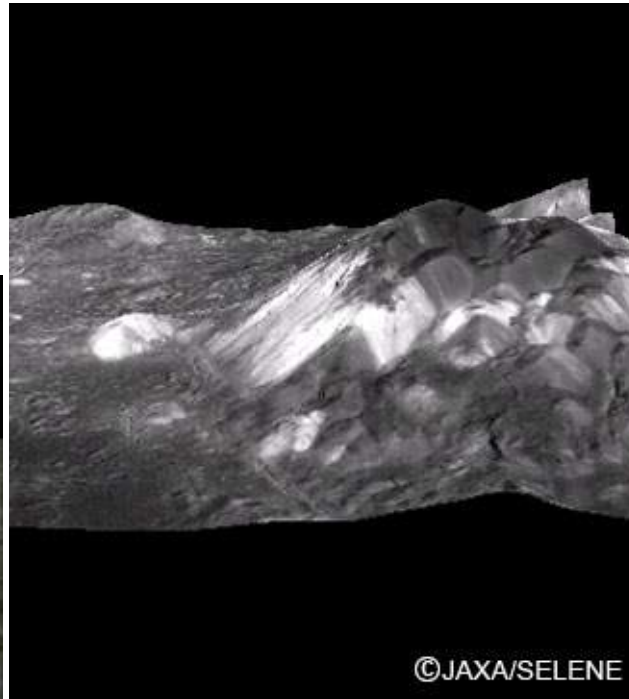
生存圏を支える3本柱

必要な情報	生命維持	施設建設	生産活動	“かぐや”での調査
環境(温度、放射線、隕石)	√			(既に基本的なデータあり。“かぐや”での調査はなし)
エネルギー、水	√		√	全日照領域調査 永久影内部調査
地下構造	√	√		縦穴と空洞の発見
地形		√		3次元データ(10m分解能)を全球で取得
元素、鉱物		√	√	岩石、U,Th分布データを全球で取得
貴重(商用)資源			√	(He <sub>3</sub> が代表的な候補だが“かぐや”での調査はなし)

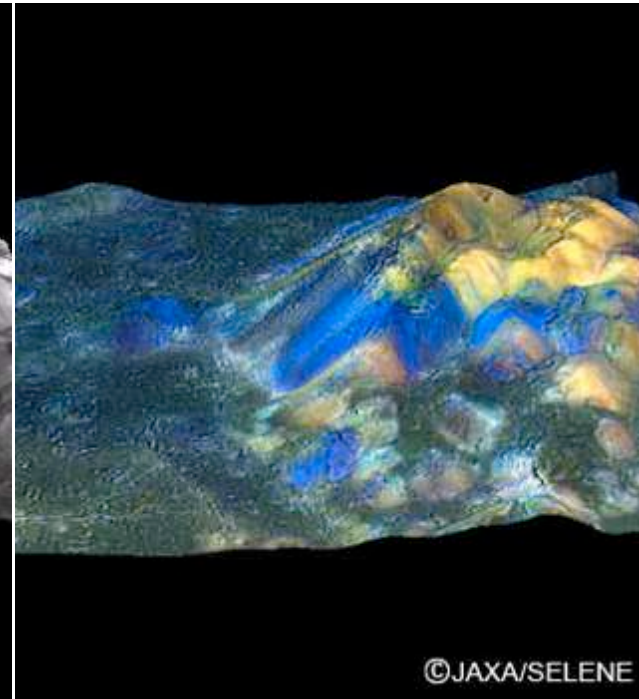
# 岩石種データを広範囲に取得 ジャクソンクレーターの例



ジャクソンクレータ(22.4N/  
163.1W、直径71Km)



ジャクソンクレータ

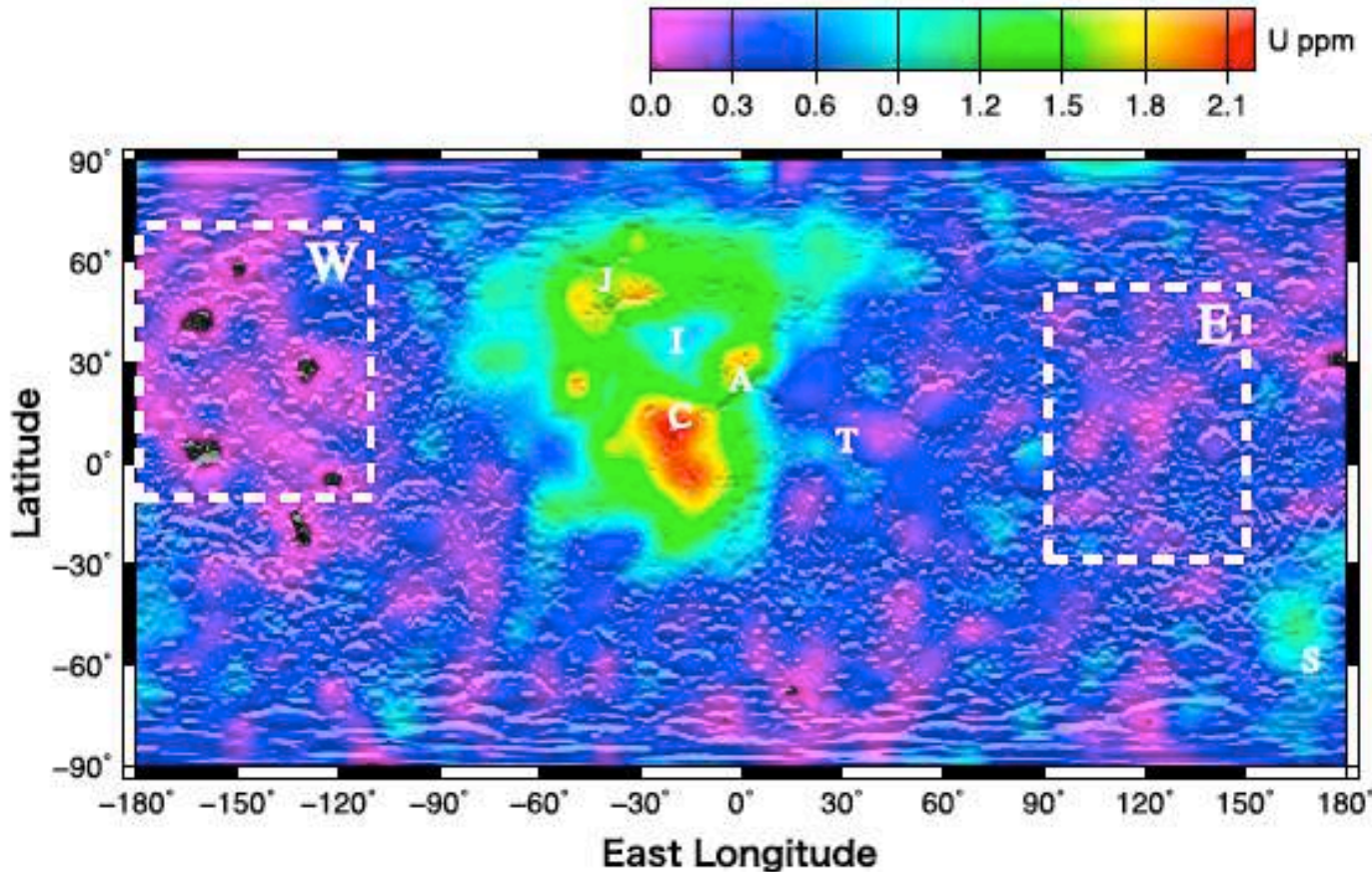


岩石種(赤:輝石、緑:かん  
らん石、青:斜長石で表示)  
(Ohtake et al., Nature, 2009)



# ウランの濃度分布

過去の観測で、トリウムとカリウムの月面濃度はわかっていたが、ウランの濃度分布はかぐやで初めて明らかになった(Hasebe et al., GRL, 2010)。



コペルニクスクレーター(C)付近で最大濃縮しているが、稀少すぎる(2ppm程度)ため、現状の技術での利用は困難(地上のU鉱石は0.1%前後)。ウランの濃度の情報は月の進化の研究に重要。

# 近未来の展望

新型固体ロケットイプシロン3号機では、月着陸実証機SLIM (Smart Lander for Investigating Moon)が選定され、プリプロジェクト化を目指している。

一方、“かぐや”の後継機SELENE-2計画はプリプロジェクト期間が約8年間続いたが、最近スコープを変更し、着陸目標を中緯度から極域へと変更した。水・氷の調査及びその場資源の利用を目指した国際共同による極域着陸探査 (NASA提案)も考慮。

日米以外にも、ロシア・ESA、中国、インドで月探査計画が検討されている。



小型月着陸実験機SLIM  
「降りたいところに降りる」着陸技術  
(SLIMホームページ)



日本で検討中の着陸  
探査ミッション



NASAで検討中の  
RPM((提案中)



# まとめ

1. かぐやでは、月面の物質、地形、重力場、磁場、環境の観測を行い、アポロ後では質・量ともに最大の科学データを得た。これらの解析により、“月の起源と進化”の解明に大きな進歩をもたらした。
2. 今後の月の開発利用の検討に使用できる、地形、地質、地下構造、日照の情報が得られ、また月軌道への投入技術や制御落下技術など近未来の月探査につながる技術が習得できた。
3. 今後の本格的な月探査・利用の展望は国際的にも流動的だが、短期的な視点からではなく、長期的な人類社会の持続的発展を目指した着実なステップを踏み出すことが必要（“何ができるか”“ではなく”何をすべきか“の視点が重要）。