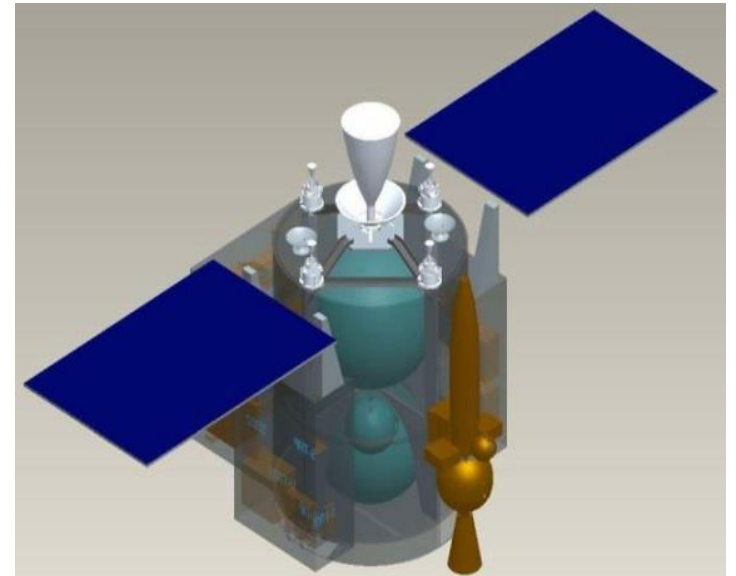
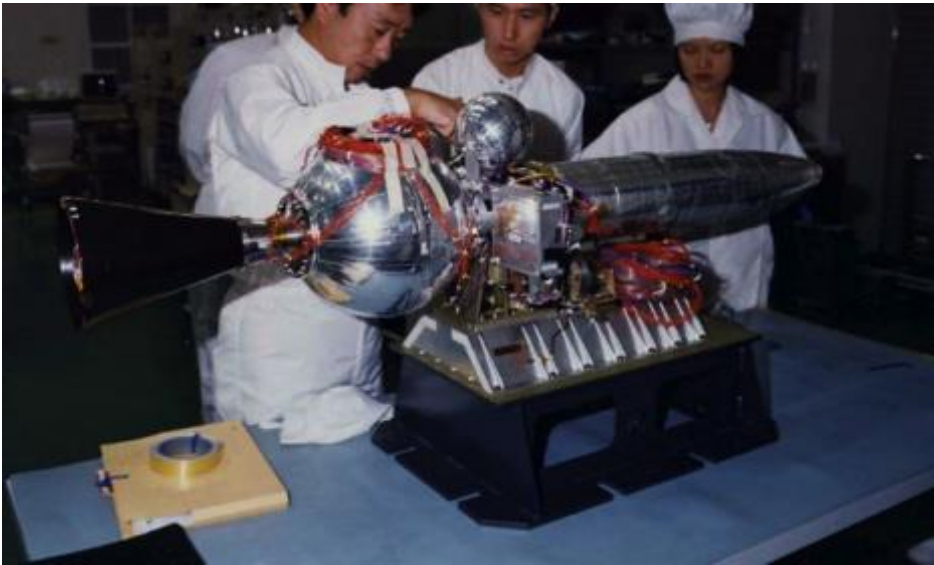


月ペネトレータミッション「APPROACH」で目指す 科学と検討状況

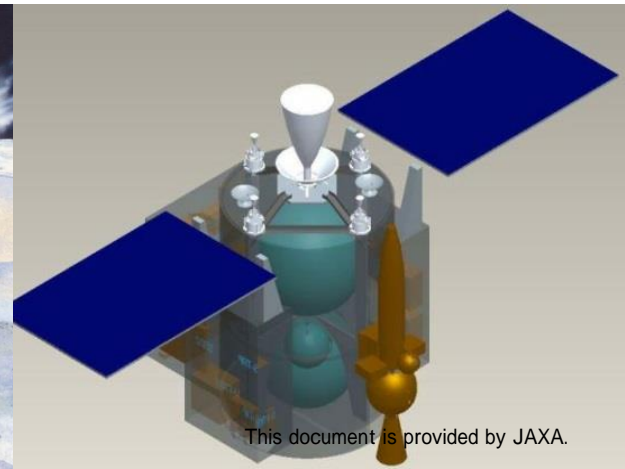
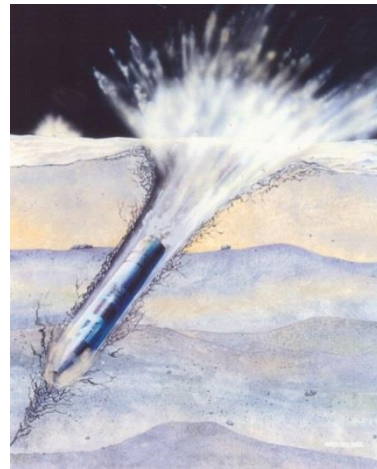


田中智、後藤健、白石浩章(JAXA)、川村太一(NAOJ)、山田竜平(会津大)、村上英記(高知大)、石原吉明、早川雅彦(JAXA)

APPROACH2 WG

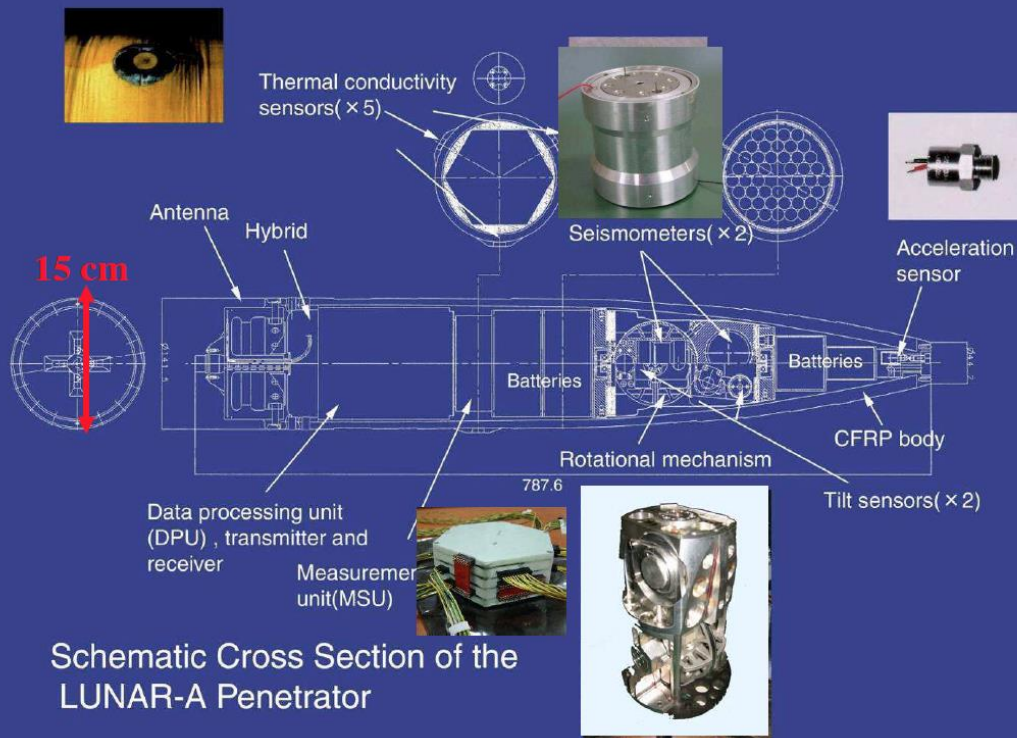
Science overview

- APPROACH is a mission to the Moon that consists of a penetrator and an instrumented relay satellite.
 - >Understand origin and evolution of the Moon
 - >Develop new infrastructure for the future planetary exploration



The penetrator

- Geophysical measurements (seismic and heat flow observation)

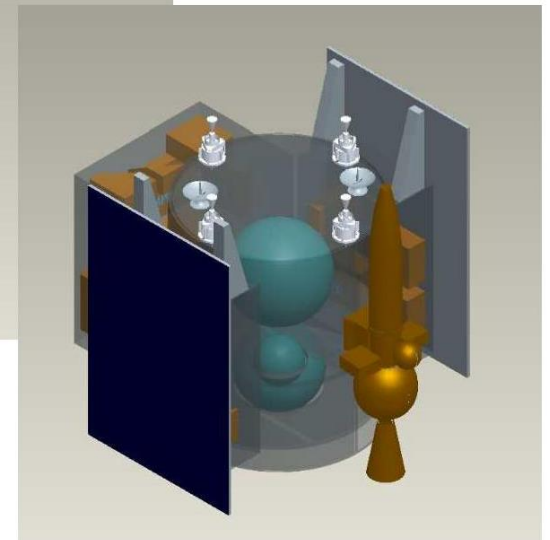
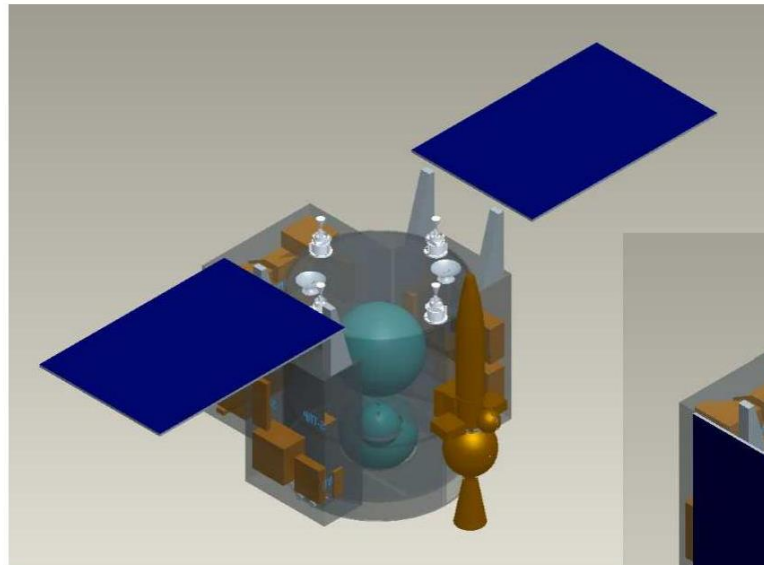


The relay satellite

- Data relay from the penetrator
- Impact monitor from the orbit



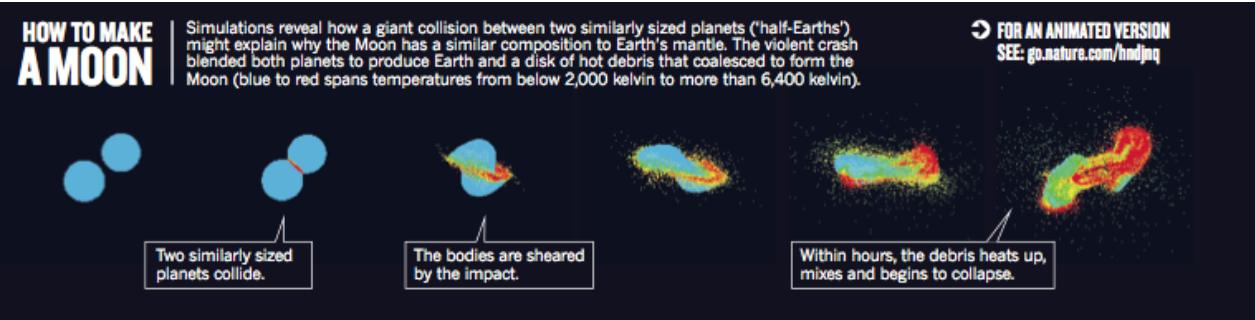
Abe et al.,(2018)



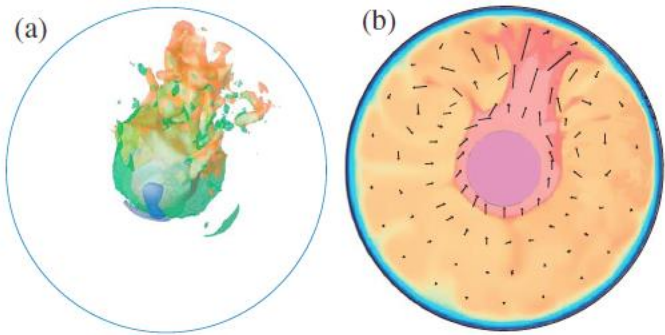
Why the Moon?

- 惑星形成過程において普遍的と考えられる「カタストロフィック」、「ダイナミック」イベントを検証できる絶好(唯一)の対象
- 「分化天体進化」の基本
- 惑星科学の「基準」天体
- 地球外重力天体のアクセスの容易さ
- 地球からも(常時)モニター観測が可能
→継続的、持続的な探査対象

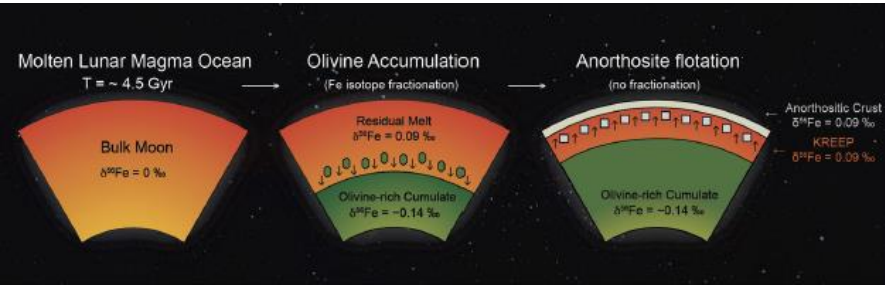
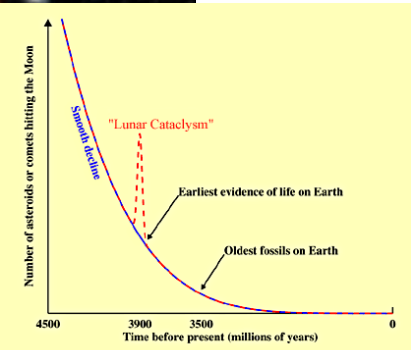
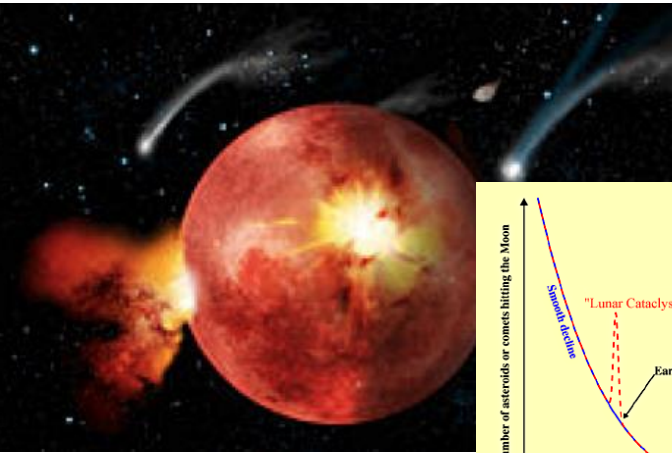
(1)「カタストロフィック」、「ダイナミック」イベントの検証の絶好の対象



GI

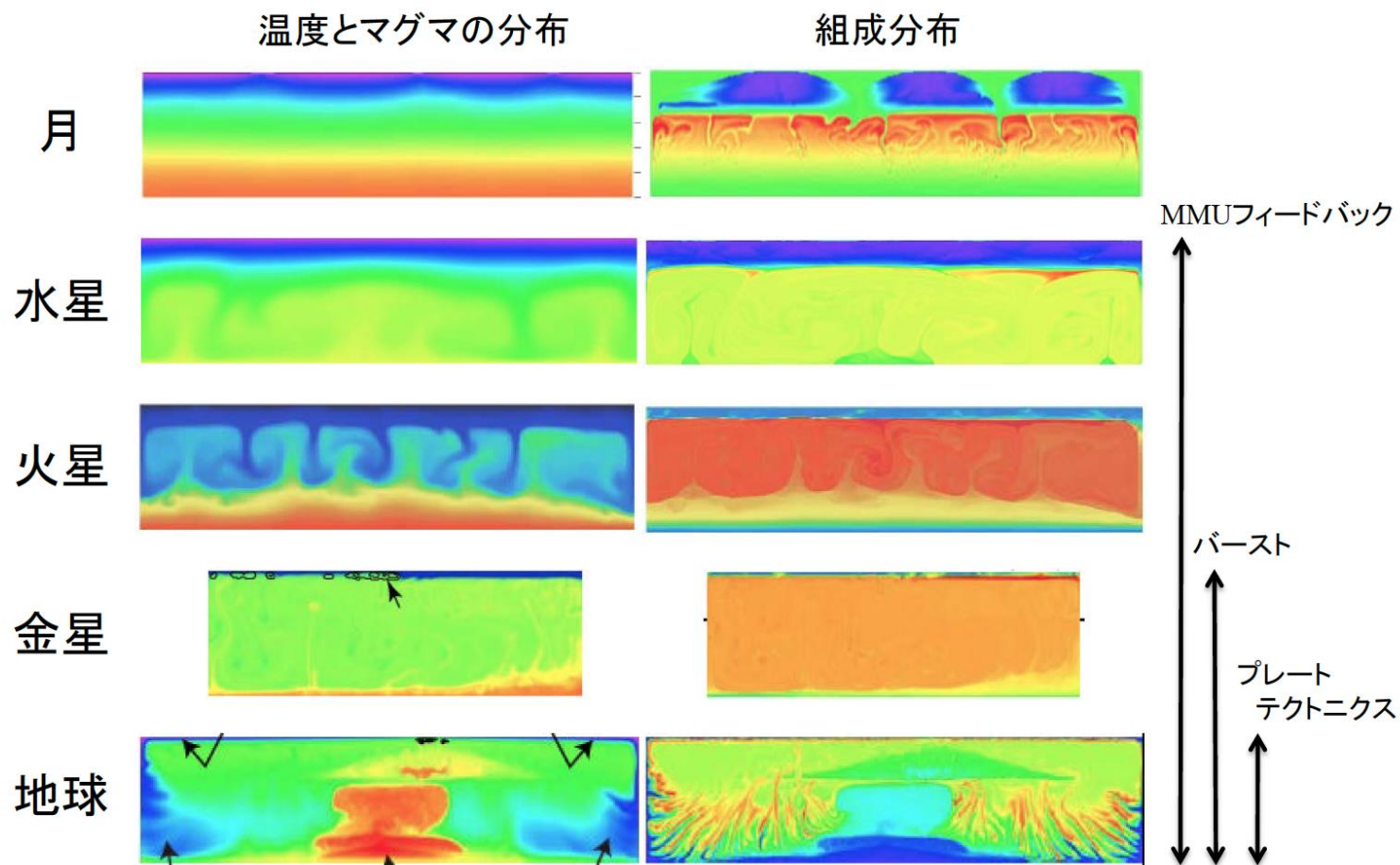


MO(Zang et al.,2013)



LMO(Wang et al.,2015)

「分化天体の進化」の基本



Ogawa (2014)

惑星科学の「基準」天体

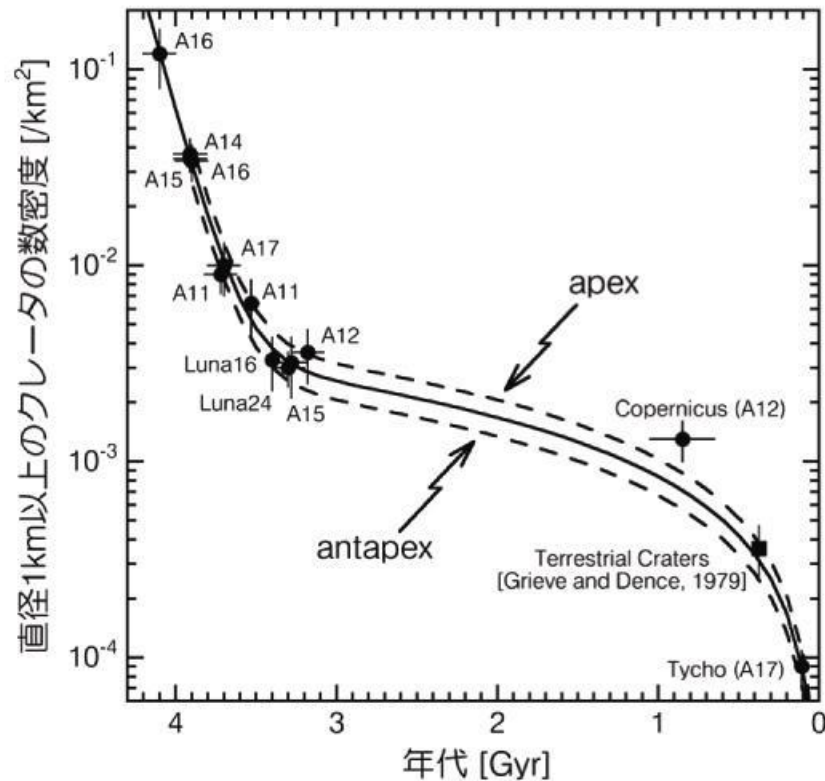
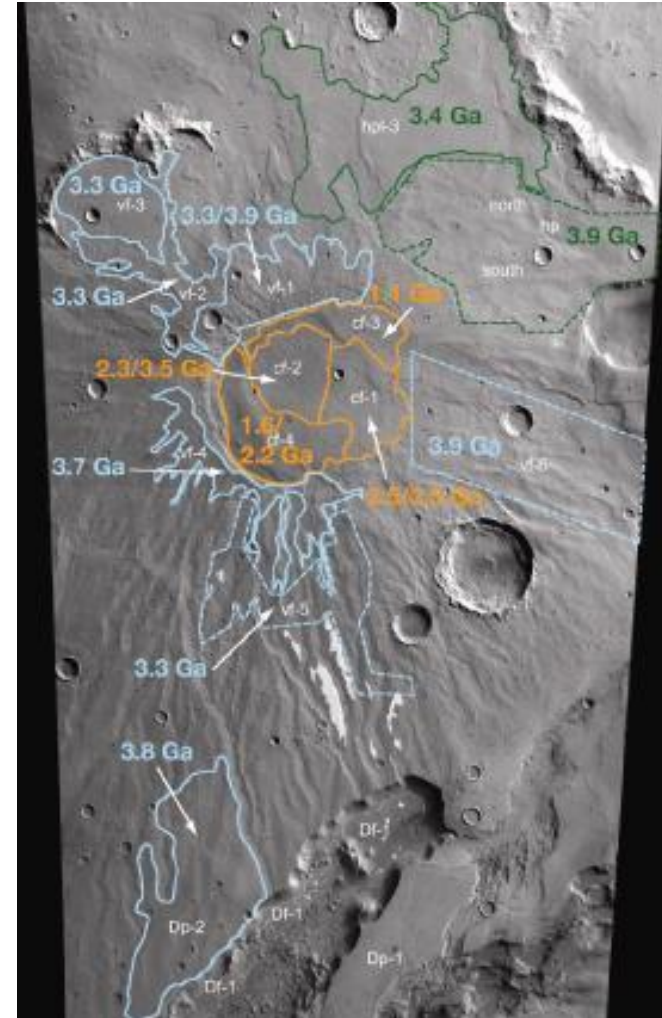


図4：月における表層年代とクレータ密度の関係（Neukum and Ivanov [6]から改変）。点線はapexとantapexでのローカルな年代-クレータ密度カーブ。

Morota and Furumoto (2003)



Williams et al.,(2005)

月面衝突発光観測



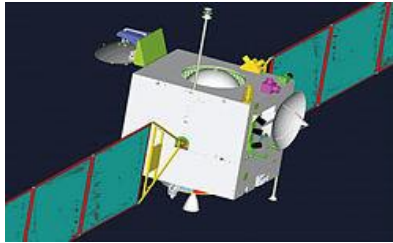
Sustainableに探査される対象

月探査この10年間:

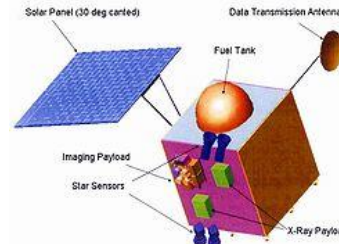
リモートセンシング探査の成熟と直接(着陸)探査へ回帰



Kaguya (2007-2009)



Chang'e1 (2007-2009)
Chang'e2(2010)



Chandrayaan-1
(2007-2009)



LRO(2009-)+LCROSS(2009)

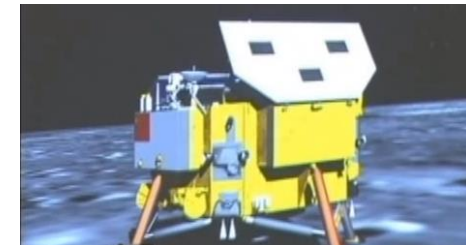
2007 ~ 2012



GRAIL (2011-2012)



LADEE(2013-2014)



Change3 (2013)

2012 ~ 2017

Science objectives

- Objective 1: Understand physical condition of the giant impact to form the Moon.
 - Objective 2: Understand thermal evolution of the Moon.
 - Objective 3: Understand impact phenomena on the planetary body.
-
- Objective 4: Development hard landing system for the in-situ geophysical observation on the Moon.

Science objectives

**The Lunar Exploration Roadmap:
Exploring the Moon in the 21st Century: Themes, Goals, Objectives,
Investigations, and Priorities, 2016**

A Community Endeavor Coordinated by the Lunar Exploration Analysis Group (LEAG)

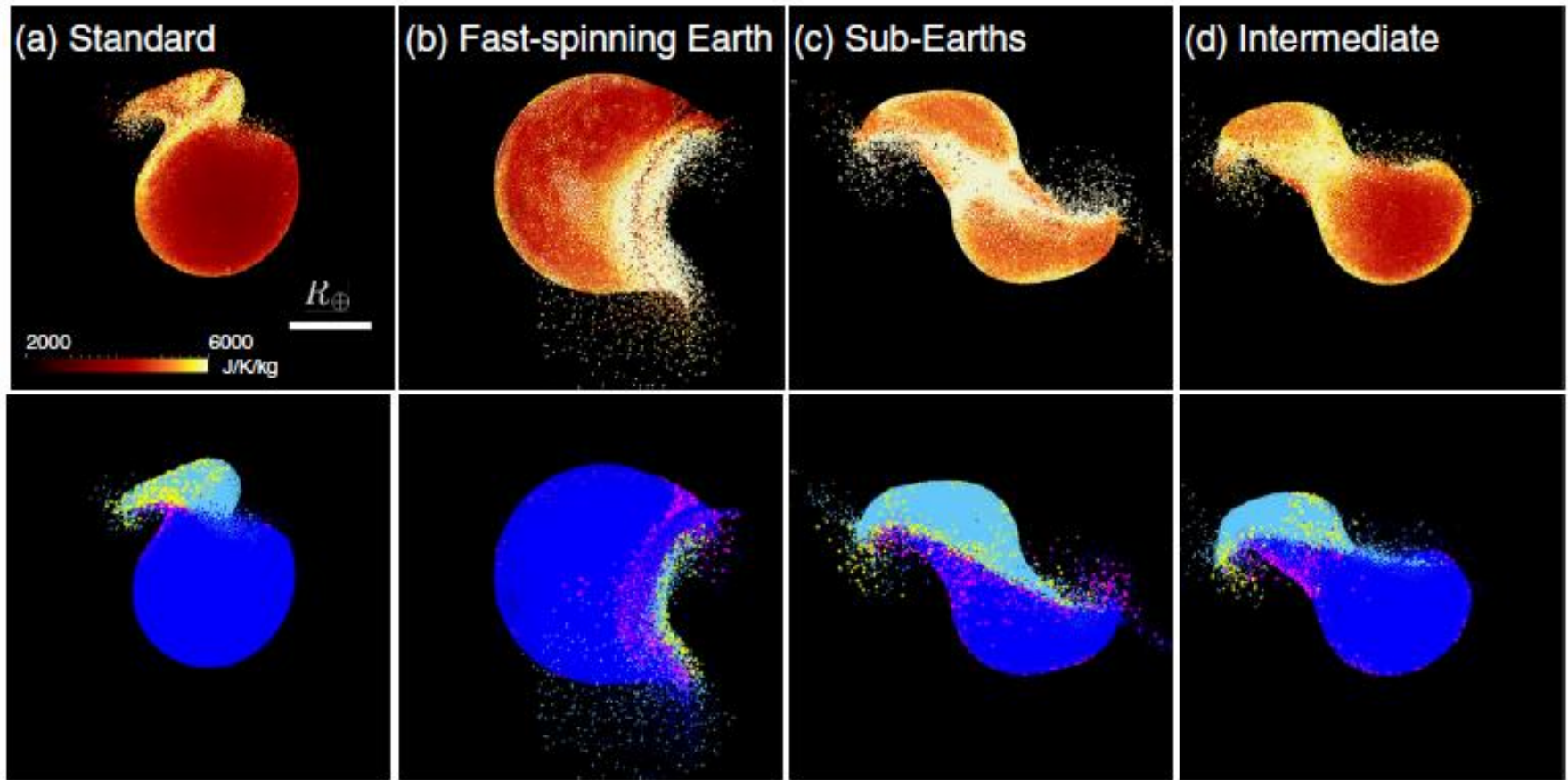
- Objective 3: Understand impact phenomena on the planetary body.
-
- Objective 4: Development hard landing system for the in-situ geophysical observation on the Moon.

Science objectives

- Objective 1: Understand physical condition of the giant impact to form the Moon.
 - Objective 2: Understand thermal evolution of the Moon.
 - Objective 3: Understand impact phenomena on the planetary body.
-
- Objective 4: Development hard landing system for the in-situ geophysical observation on the Moon.

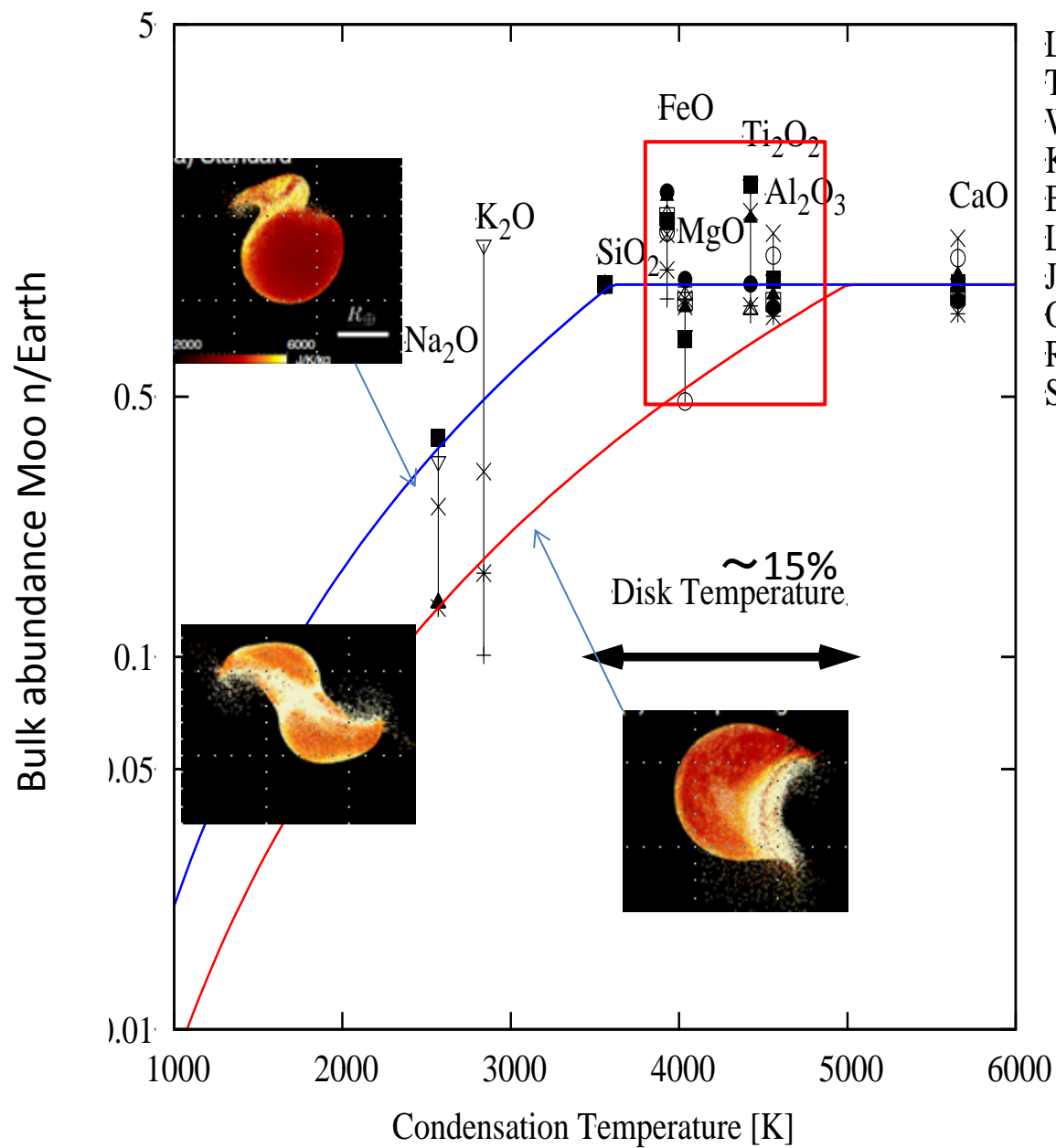
- Objective 1: Understand physical condition of the giant impact to form the Moon.
 - > determine crustal thickness, , upper mantle velocity by seismic observation
 - >->determine bulk chemical composition of “key” elements
 - >->->representative refractory (Al ,Mg,Fe)
(<->sample anal., mantle-core structure,,,,,,,,)

Lunar Forming Impacts



	γ	M_T	b	v_{imp}	T_{spin}
(a) Standard	0.13	1.02	0.75	1.0	0
(b) Fast-spinning Earth	0.045	1.05	-0.3	20 (km/s)	2.3
(c) Sub-Earths	0.45	1.04	0.55	1.17	0
(d) Intermediate	0.3	1.00	0.6	1.0	0

All models satisfies dynamical constraints, next questions are thermodynamical and geochemical constraints.



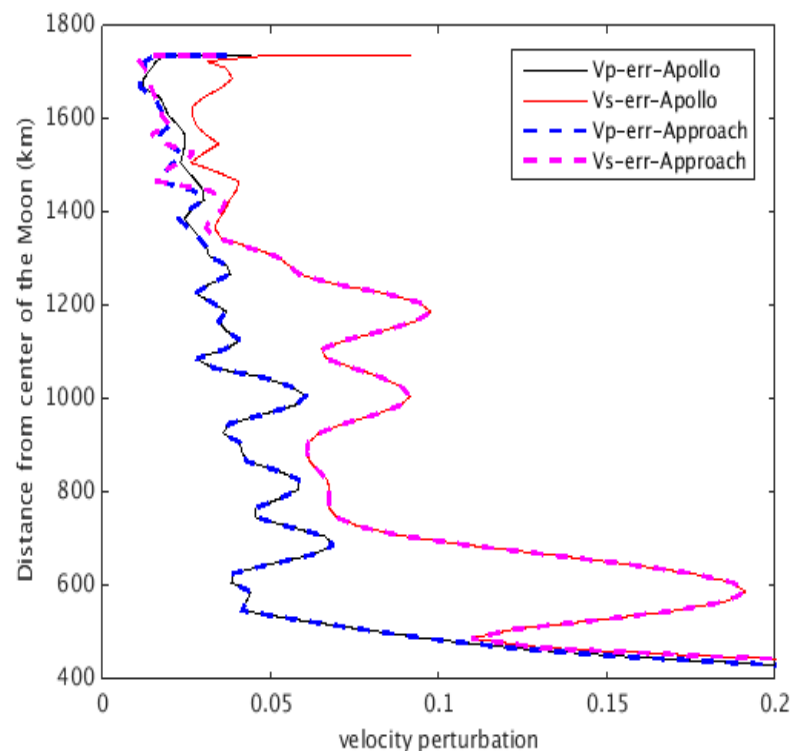
Longhi (2006).
 Taylor (1982).
 Warren (2005).
 Khan et al. (2006).
 Buck and Toksoz (1980).
 Lognonne et al. (2003).
 Jones and Delano (1989).
 O'Neill (1991).
 Ringwood (1979).
 Snyder et al. (1992).

月内部構造の決定精度 (Apollo12号サイトでの観測例)

○月内部平均構造の誤差

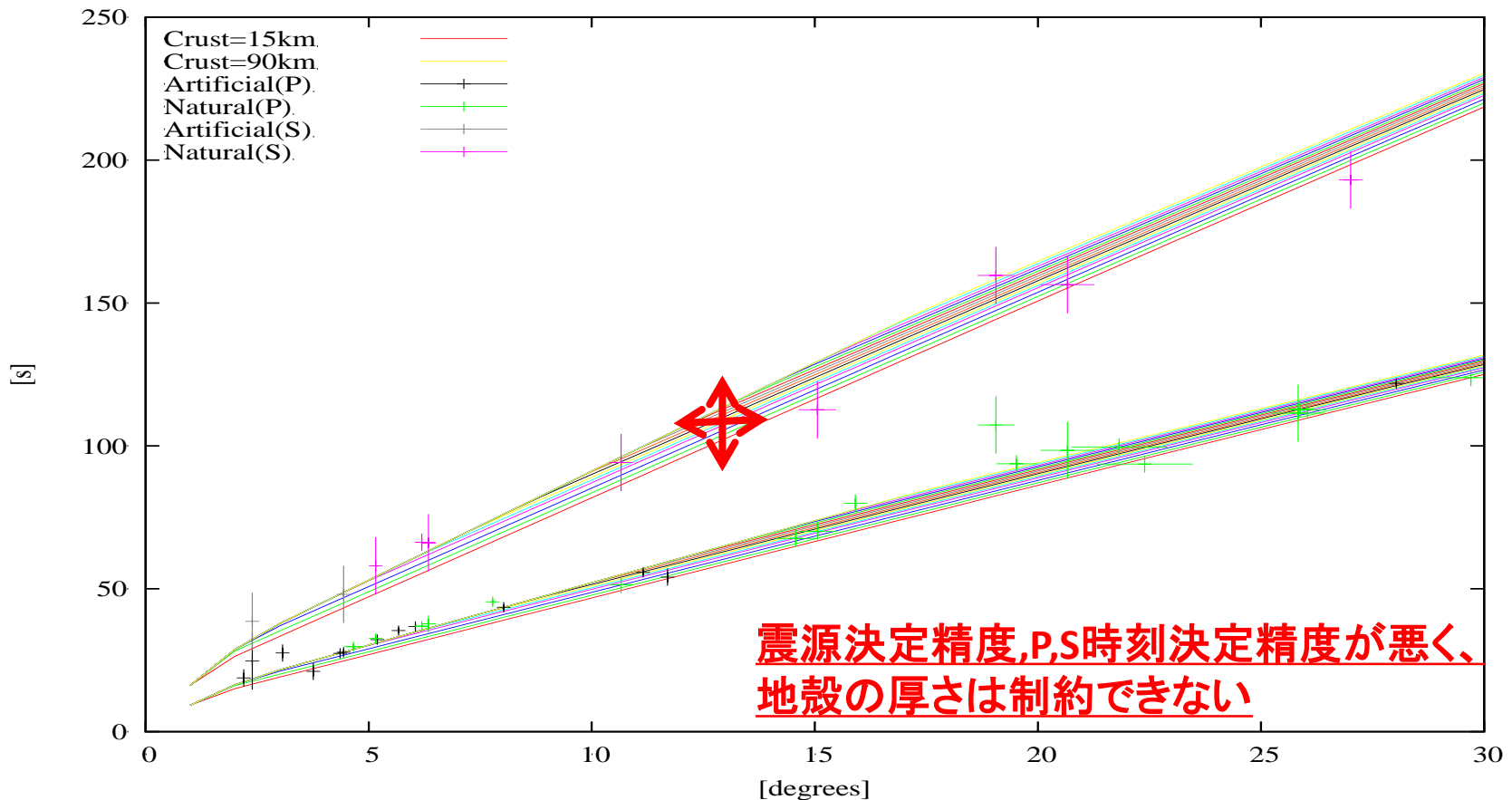
	観測前		観測後
地殻厚さ	28.6 (%)	➡	17.6 (%)
地殻密度	8.9 (%)	➡	7.4 (%)
コアサイズ	9.4 (%)	➡	9.2 (%)
コア密度	23.0 (%)	➡	22.6 (%)

○マントル速度構造誤差



- ・ 地殻厚さの誤差を半減
- ・ 上部マントル深さ約300km程度までの速度誤差の改善

現状認識: Example of Current Travel Time Analyses



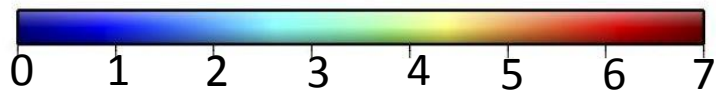
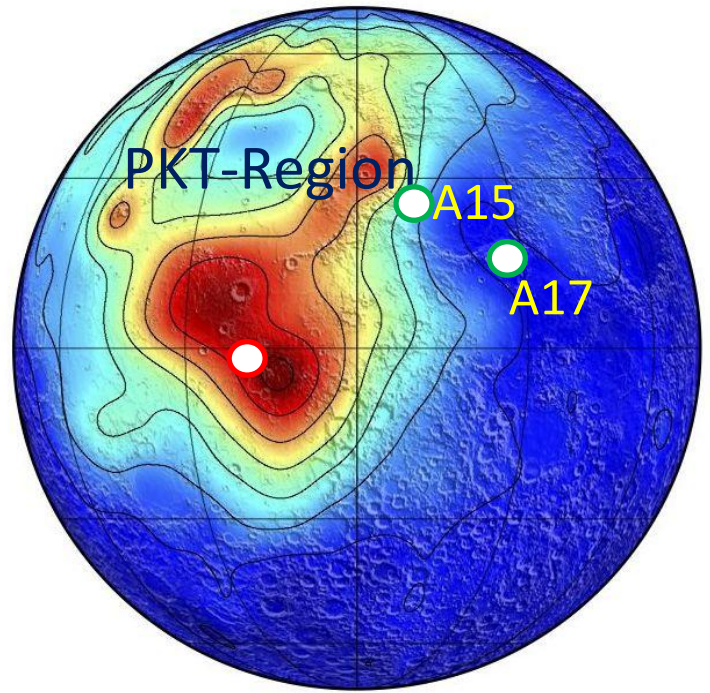
Travel time curve constructed from Apollo data do **NOT** have sufficient resolution to resolve crustal thickness.

Previous studies used other sources of information
(e.g. ASE, receiver function; Nakamura, 1983; Lognonné et al., 2003)

- Objective 2: Understand thermal evolution of the Moon.
 - > method:heat flow observation (at PKT)
 - >-> abundance of radioactive elements(Th,U)
 - >->thermal state of interior
 - (<-> sample anal,electrical conductivity)

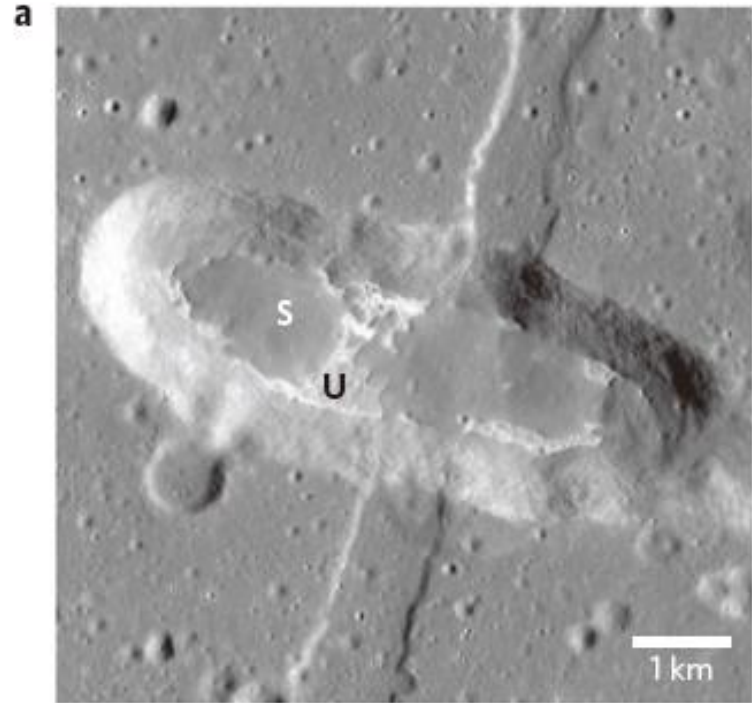
PKTの熱流量を観測し月の熱史を制約する

○ APPROACHでの仮観測点



Thorium abundance (ppm)

Th含有量マップ[Yamashita et al., 2012]



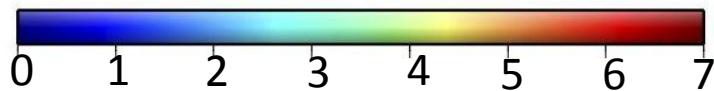
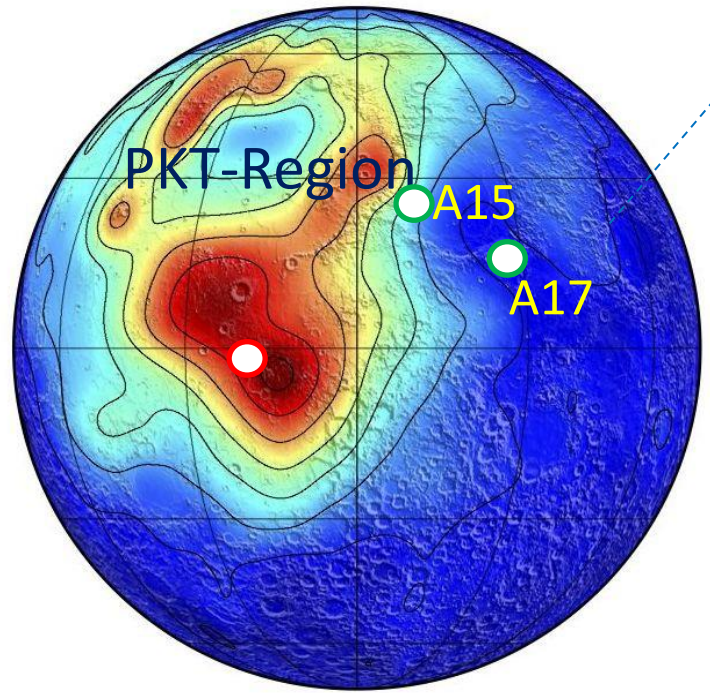
IMPが非常に若い年代であることが示唆。
現在も月内部は溶融状態？

Braden et al.,(2014)

This document is provided by JAXA.

PKTの熱流量：月の熱史を制約する

○ APPROACHでの仮観測点



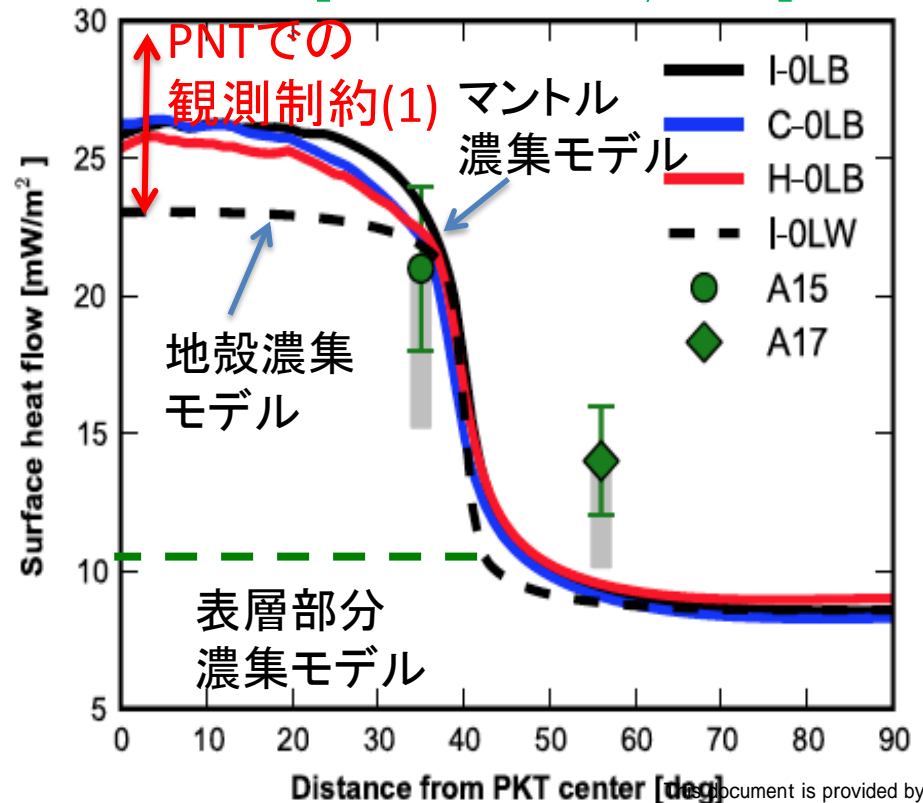
Thorium abundance (ppm)

Th含有量マップ[Yamashita et al., 2012]

マントルからの寄与を調べる上で

Crisium盆地も興味深い観測点
(地殻厚さ=0kmの盆地)

PKTからの距離と熱流量との関係
[Leuville et al., 2013]



- Objective 3: Understand impact phenomena on the planetary body.

-> simultaneous observation of natural impact flush and seismic observation

(<->lab. Experiment, simulation, earth impact craters, artificial impact experiment on the planetary body)

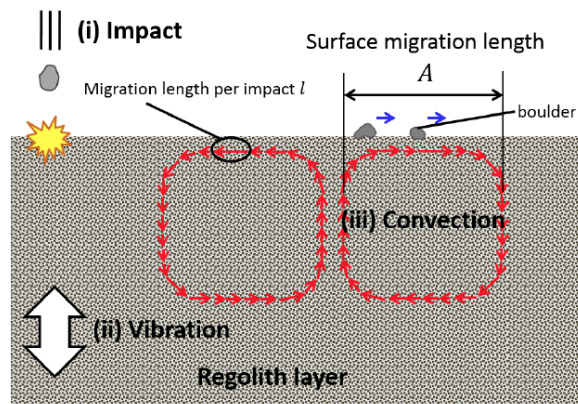
惑星衝突現象に伴う地震を同時観測する



$\sim 10^4 - 10^5 \text{ J}$



想像した衝突クレーターの想像図。NASA 72311を改変。



$\sim 10^6 \text{ J}$

Yamada+2016

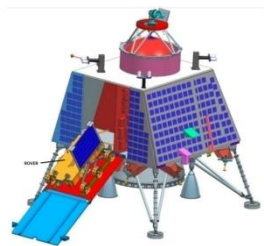


$\sim 10^7 - 10^{10} \text{ J}$

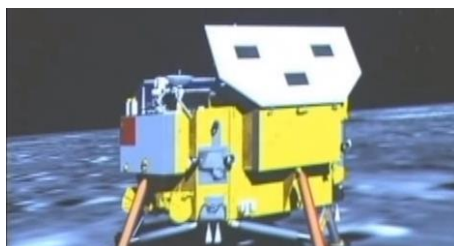
衝突発光→クレータ生成→地震波伝搬
→レゴリスのリサーフェシング過程を実現場で観測

- Objective 4: Development hard landing system for the in-situ geophysical observation on the Moon.
-> penetrator deployment
(<->soft lander,geophysical obs. by orbiter)

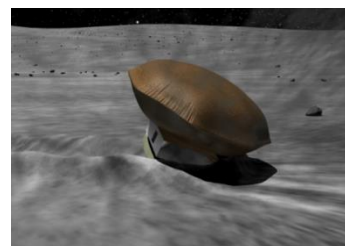
月探査これからの10年間: 直接(着陸)探査(技術)の新展開



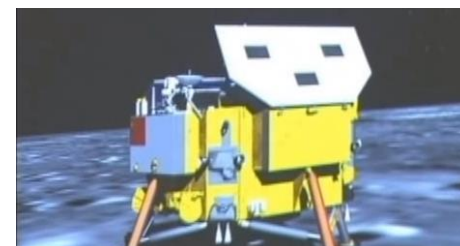
Chandrayaan-2(2018)
Lander+rover



Chang'e4,(2018)
Far-side landing



OMOTENASHI(2019)
Cubesat landing

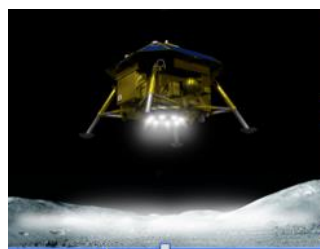


Chang'e5,(2019)
Sample return

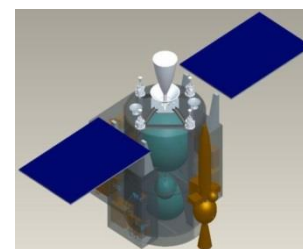
2017 ~ 2022



SLIM(2020)
Precision_landing



SELENE-R?(202?)
Polar landing



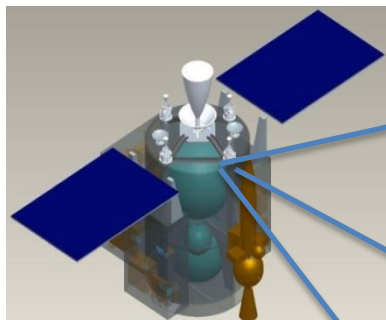
APPROACH(2025)
Penetrator landing

2020 ~ 2027

ペネトレータ技術を用いた 惑星内部構造探査の展開

観測項目	水星 地震、熱流量	月 地震、熱流量	小惑星 近地球 地震	火星 地震、熱流量	木星衛星 地震、熱流量
	地震、熱流量	地震、熱流量	地震	地震、熱流量	地震、熱流量
センサ技術	APPROCH	APPROCH	APPROCH	APPROCH	APPROCH
耐衝撃性技術	APPROCH	APPROCH	APPROCH	耐低温技術	耐低温技術
耐温度技術	APPROCH	APPROCH	APPROCH	新規(耐低温)	新規(耐低温)
運用技術	APPROCH	APPROACH	新規(アクティブ地震観測対応)	APPROACH	新規(アクティブ地震観測対応)
通信技術	APPROACH	APPROACH	APPROACH	APPROACH	APPROACH
投下技術	APPROCH	APPROCH	新規(加速)	新規(EDL)	新規(EDL)
その他			アクティブ地震源 (基礎開発)		アクティブ地震源 (基礎開発)

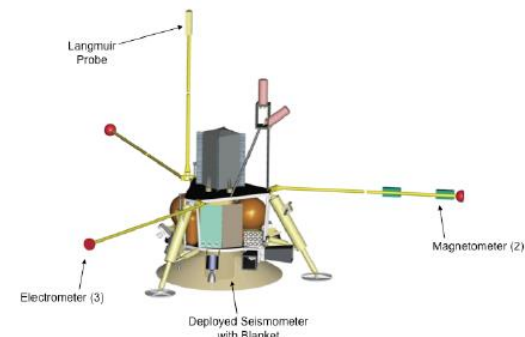
ルナーA型ペネトレータ技術ではカバーできない新規技術
共通技術であるが再開発が必要でありかつ性能向上できる技術



小型衛星による
ペネトレータ実証
(APPROACH)

LGNとの協働実現、
Insightの成果などで「月」
か「火星」を判断

国際協働



中型規模衛星による
ペネトレータ「月」もしくは「火星」の内部構造
本格的な科学探査(ペネトレータ4機以上)

APPROACH2での
小型化実績と国際
協力を前提に展開

国際共同



DS2 (NASA)の例

超小型ペネトレータによる
月惑星探査サブペイロード
(国際協力を前提に展開)

実績に基づいて
強力な技術連携
が可能になる

国際協力

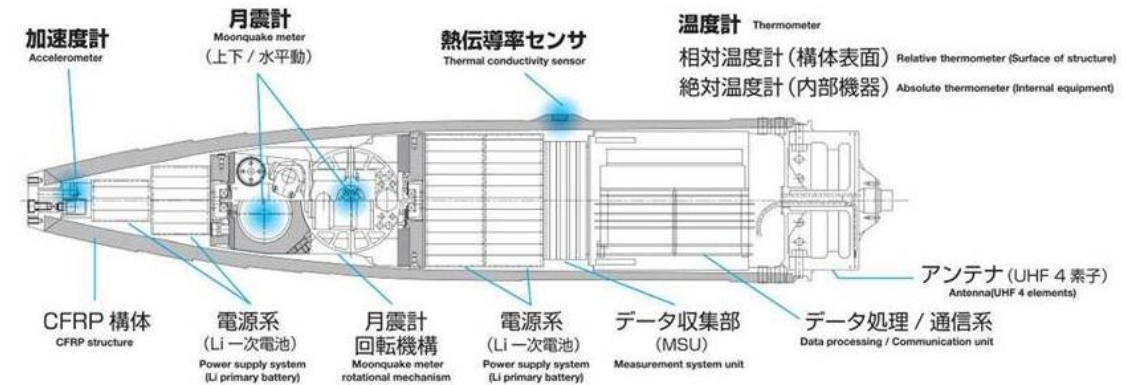


ユーロパペネトレータ
(英国,NASA)

Payload

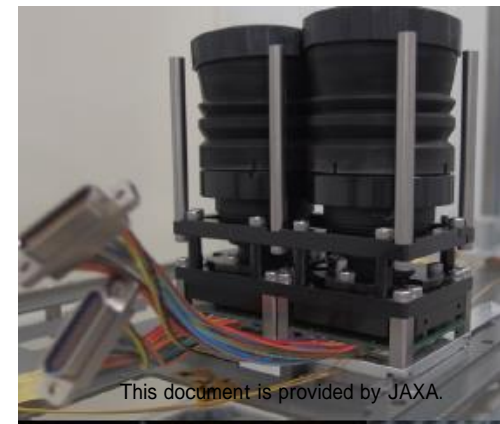
Penetrator

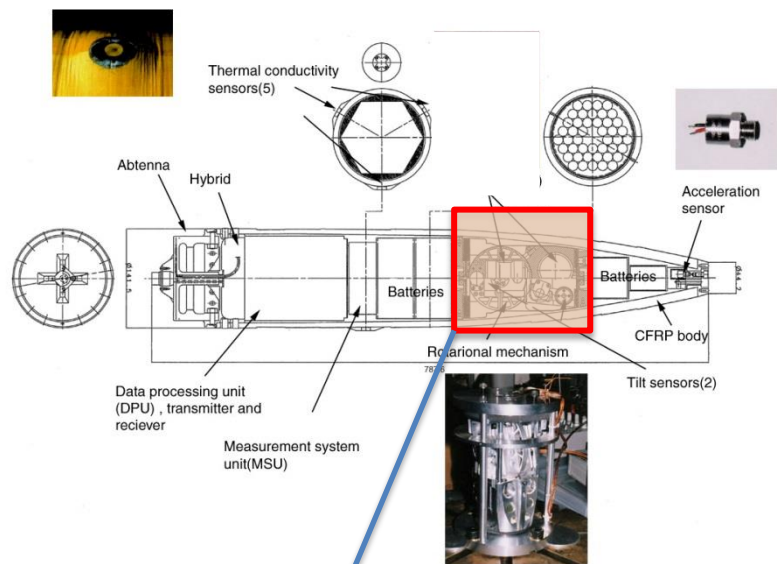
- Seismometer
- Heat flow probe



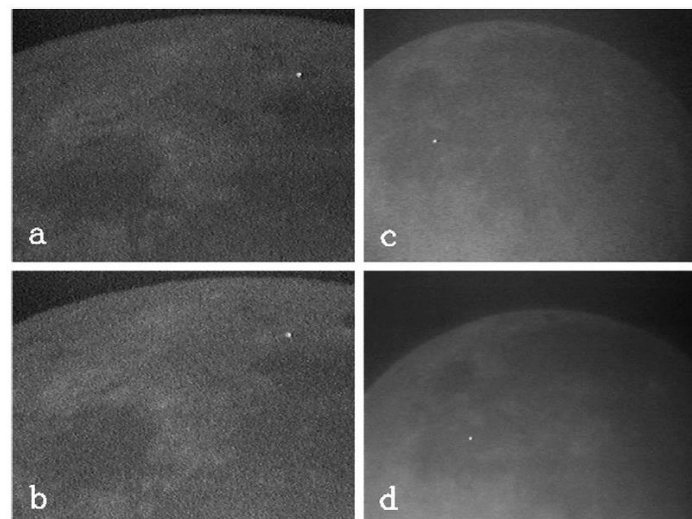
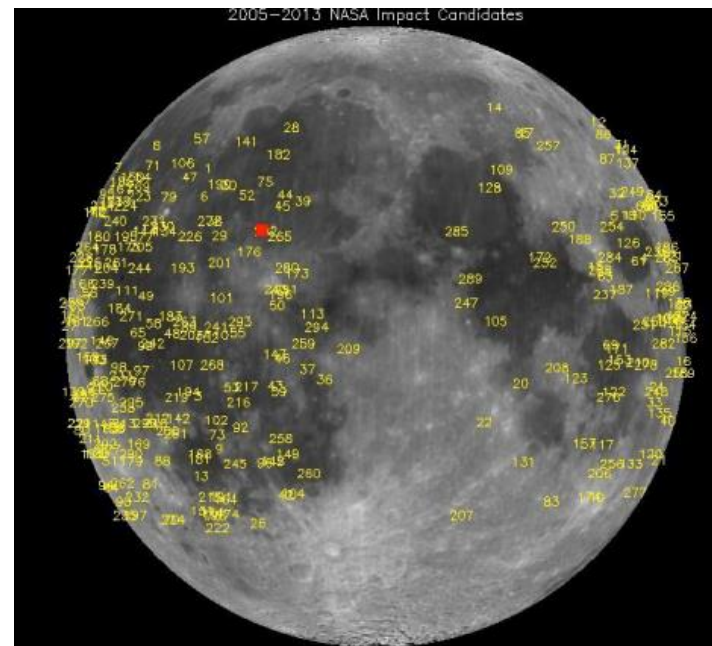
Satellite

- Impact flash monitoring camera
 - >revised DELPHINUS(EQUULEUS)



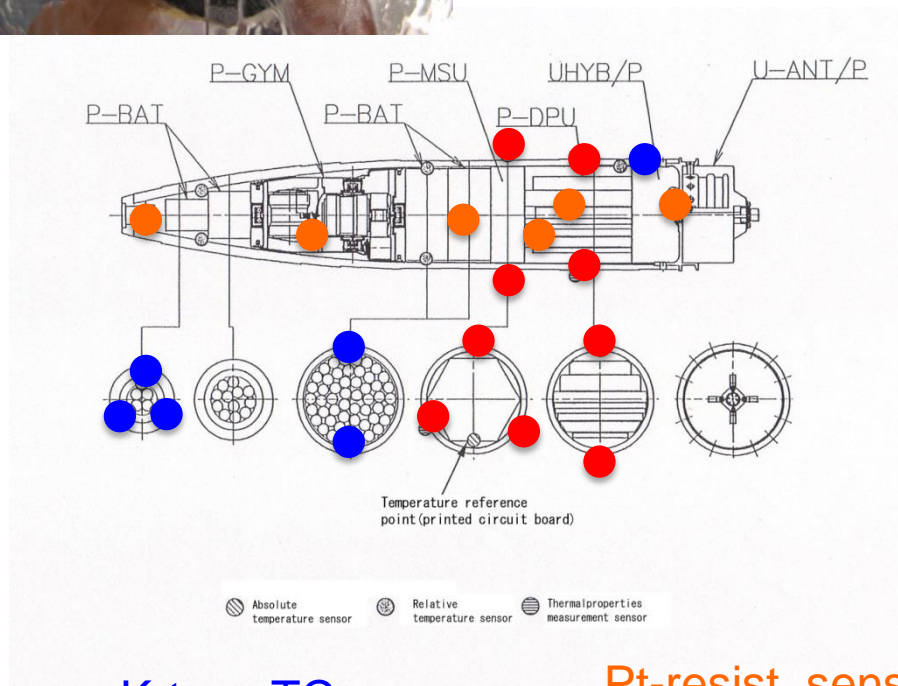


+



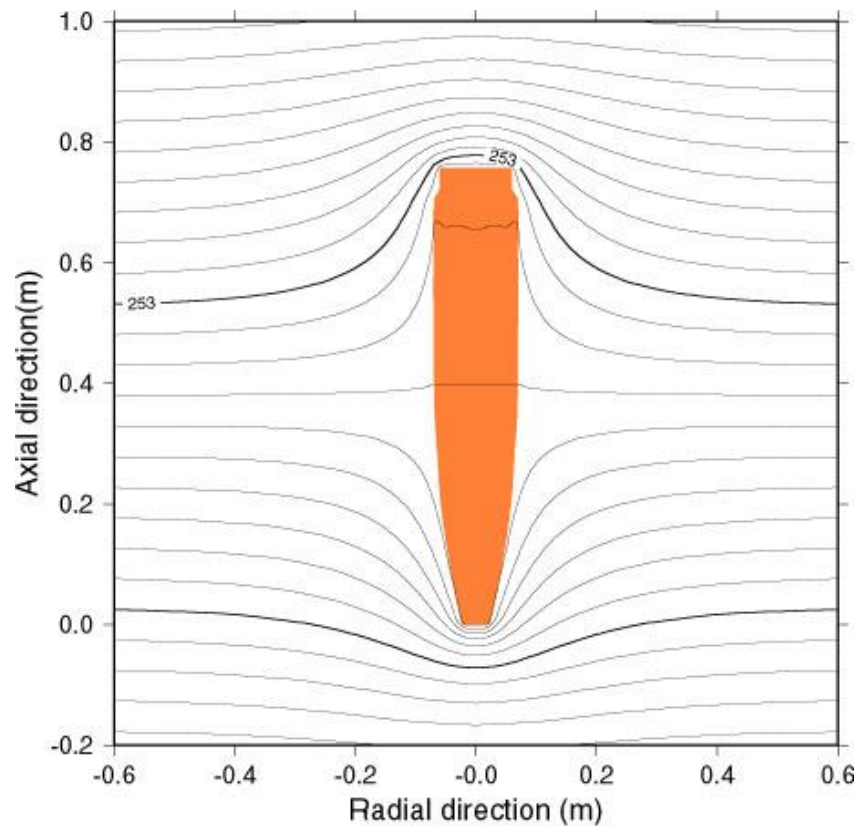
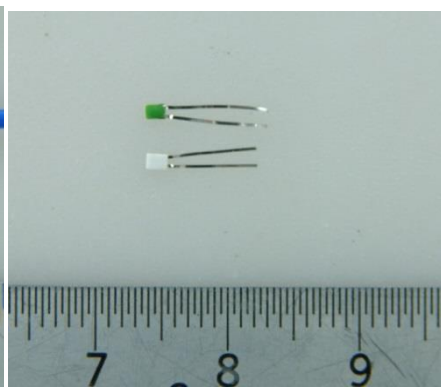
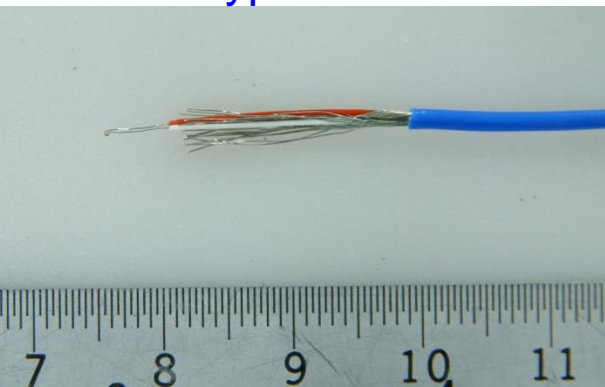


Thermal conductivity sensor



K-type TC

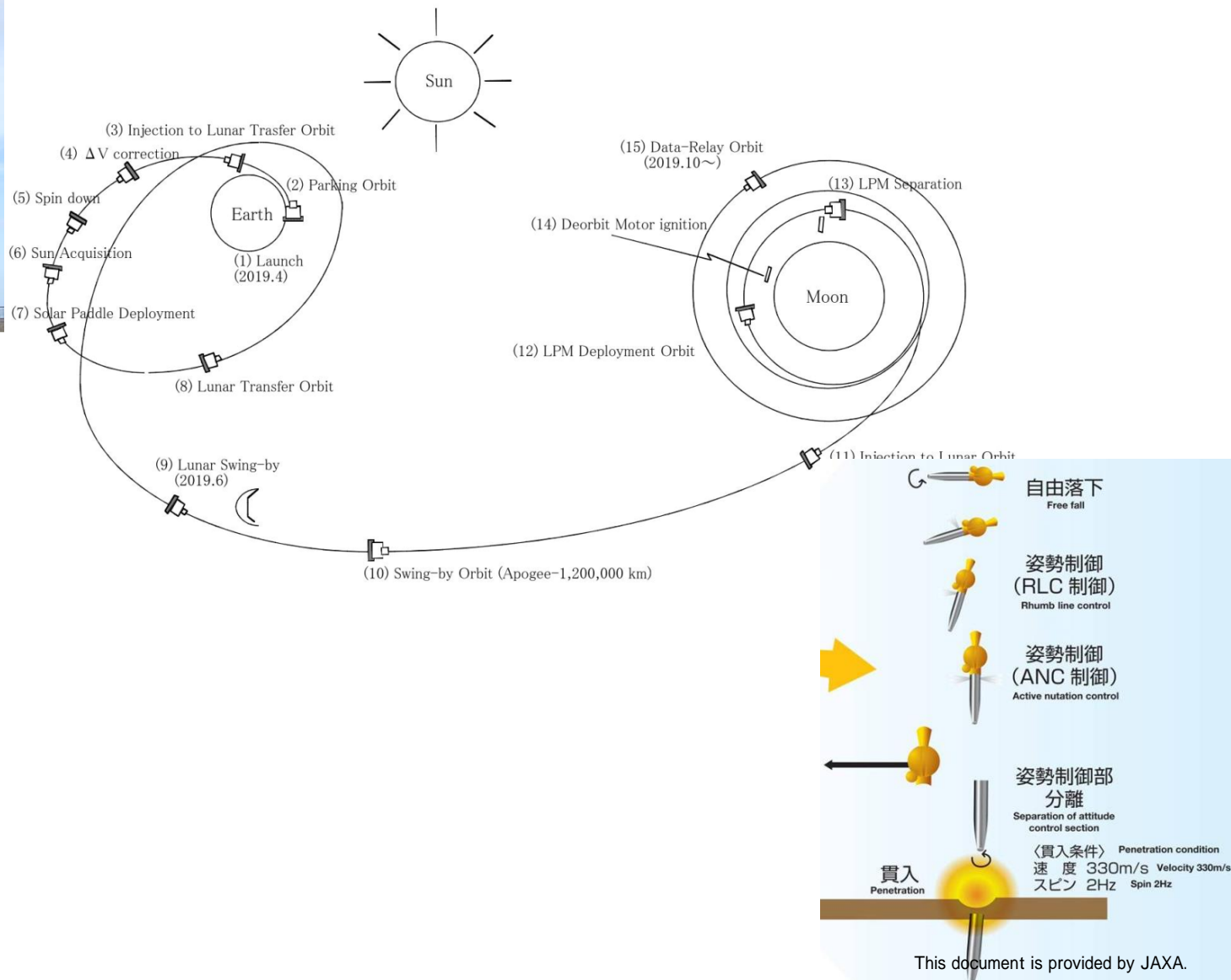
Pt-resist. sensor



Precise thermal modeling
+
Simulation

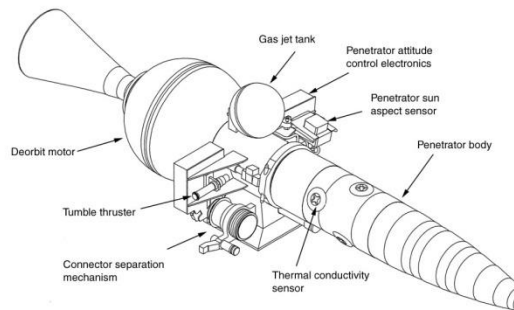


Mission Overview

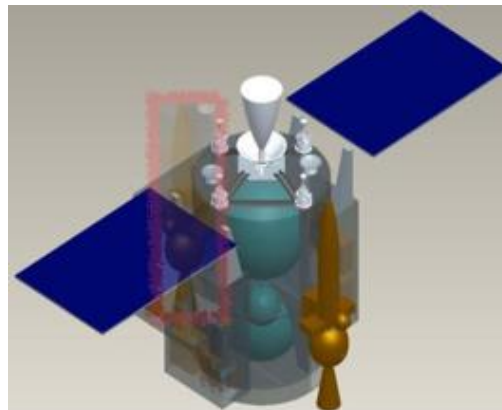


Flight System

- Penetrator : 45kg(L-A相当)



- Relay satellite
500kg



構成要素	ペネトレータ1本 衛星軽量化新規技術 (SLIM 衛星技術)
電源系	32 kg(2 翼、20Ah)
S 帯/UHF 帯通信系	13kg
衛星マネジメント系	5kg
姿勢制御系	6kg
熱計装	1.5kg
構造系	58kg
電気/機械計装	23kg
分離機構 I/F	5kg
ペネトレータ	45kg
推進系	62kg
衛星ドライ重量	241kg
モニターカメラ	15kg
衛星総重量	545kg

Synergies with other missions

- Kaguya(past)->global Th mapping, global crust thickness
- Gravity Recovery and Interior Lab(GRAIL)(past)
->global crust thickness
- Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO)(ongoing)
->Reduce Penetrator landing risk
->global heat flow map
- Impact monitoring(ongoing)
-> world wide collaboration of impact network observation
- Lunar Geophysical Network(plan)
->NASA new frontier 5, complementary observation
- *FARSIDE (M4)(past submitted)*
- *LUNETTE(Discovery) (past submitted)*

APPROACH Strength

- Addresses directly JSPS science objectives
 - two Cosmic vision
 - top decadal survey
- High TRL for all potential instruments, especially, penetrator system
- World wide international collaboration of planetary scientists
- International and nationwide outreach activity for impact flash ground observation

惑星科学科学会RFIより

- 太陽系における前生命環境の進化—生命圏の誕生・持続に至る条件の解明—(PreBiotic Environmental Evolutions, CHASE-PBEE) こそが、適切な科学目標

→ 月は、45億年前の原始地球で起きた天体衝突(ジャイアントインパクト)で形成され、地球生命誕生時の地表環境を議論する上で貴重なマグマオーシャンから固化した初期地殻が残されている(この結晶の固化過程の際に固相・液相間の元素の分配が生じ、地球生命の誕生に不可欠な栄養塩も液相濃集元素として地殻に取り込まれたと推定されている)

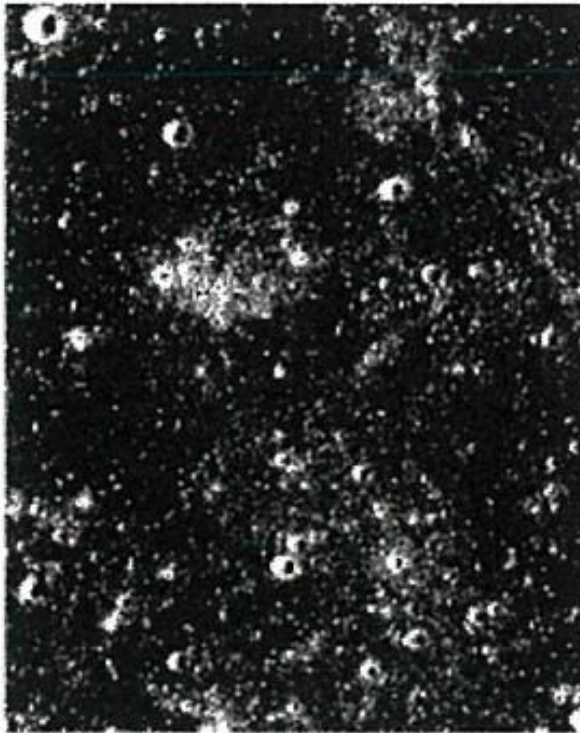
今後の予定(昨年度)

- サイエンス検討結果に基づいてミッション要求(根拠)文書を改訂→MCDに集約
- 「1機搭載案」を再検討し、トレードオフの詳細検討
→1機搭載案を決定
- コストの大幅な削減のための開発体制(システム)の見直し
→QTまでのペネトレータ開発をJAXA所掌ですすめるなど
- 海外との「協働」、「共同」、「協力」の促進
→衝突発光観測、惑星地震学者との協同
- 地球用ペネトレータ開発で製造技術の保持
→諏訪之瀬島(鹿児島県)で実地試験を完了

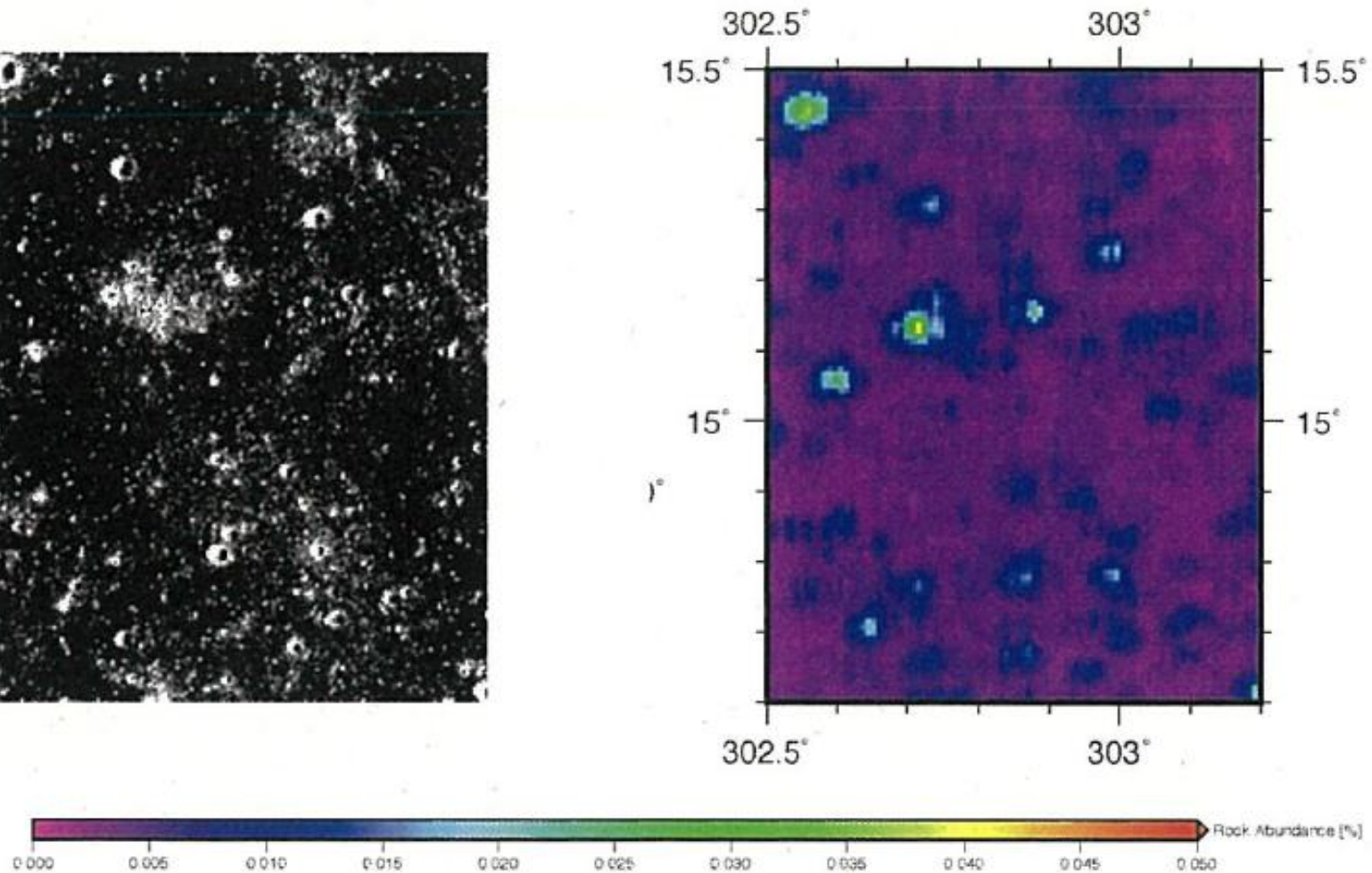
1 機搭載案について

- 外的で不可避な要因(ボルダーなどの存在)は十分少ない→LROの画像データ解析
- 技術的に確立に近い設計を踏襲できる
→コスト対応
- 地震計搭載を2成分にする科学的メリットは大きい
→地震計の広帯域化もあわせて搭載
- インパクトモニタカメラの搭載
→改良型DELPHINUS
- 将来の内部構造探査を加速するためにも迅速に遂行することを推奨
→アリゾナWSでの評価

かぐやTC画像



DEVINERによるRock Abundance Map

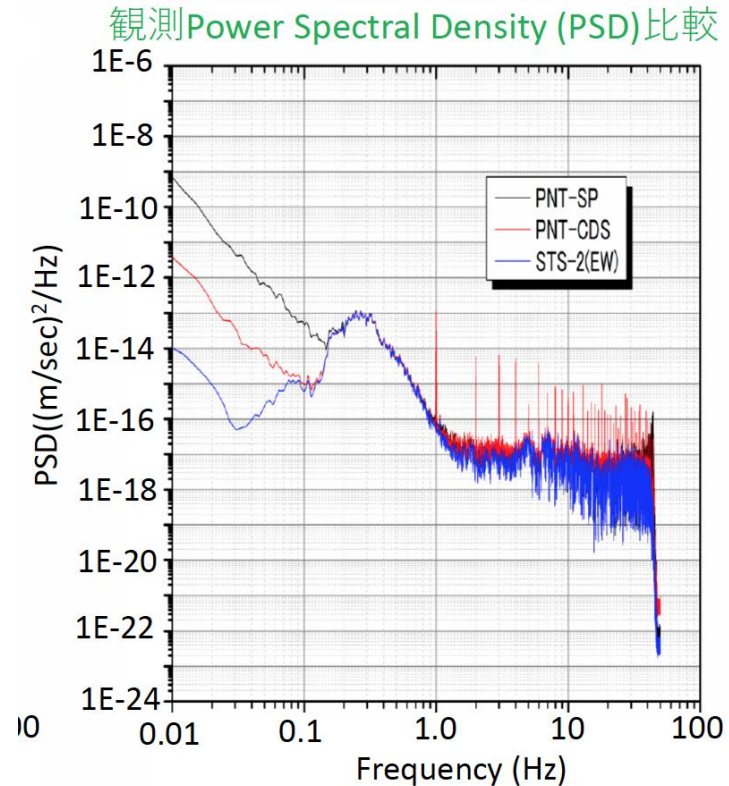
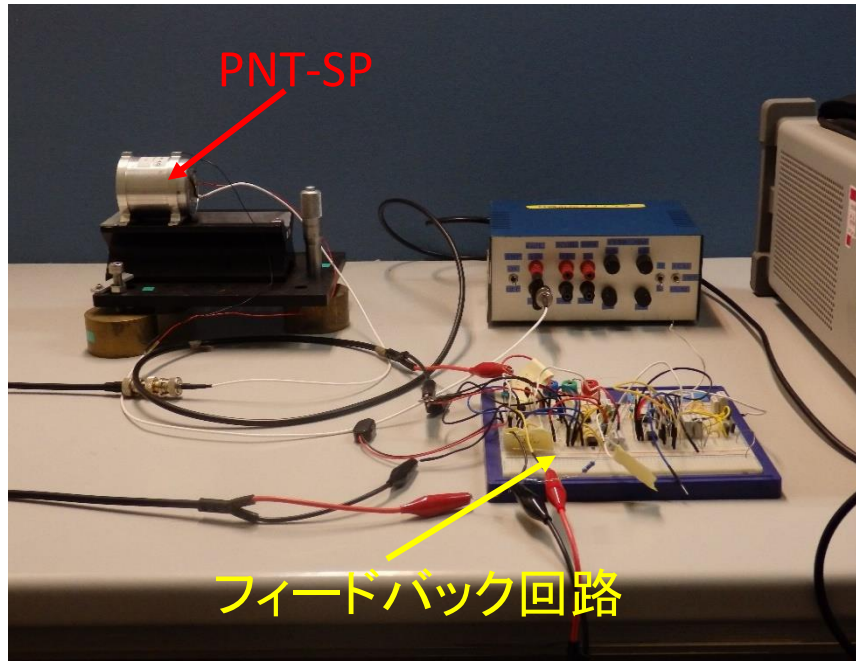


月惑星探査データ解析グループの協力のもと進めさせていただいています

This document is provided by JAXA.

センサーのグレードアップ: 月震計の広帯域化

PNT-BBの構成



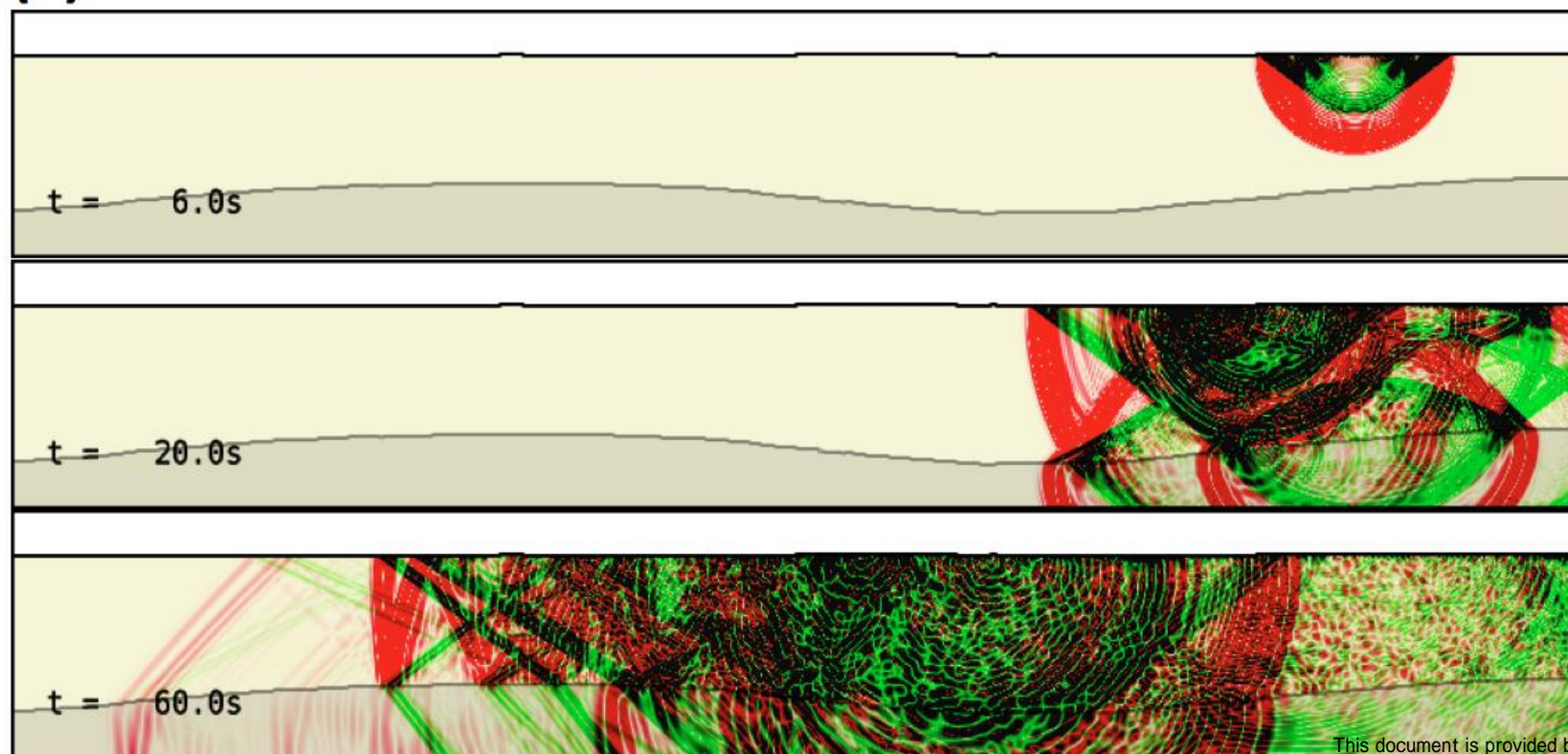
- 単体月震計(PNT-SP)に設計したフィードバック回路を接続することで長周期側の感度を増幅(固有周波数1.0Hz⇒0.05Hz)
- 単体月震計の構造は保持し回路を接続するだけなのでペネトレータに搭載可能

広帯域月震計の周波数応答をフィールド試験にて確認

数値シミュレーションを導入した月地震伝搬シミュレーション研究の導入

- 地震学者との連携で実現
- 内部構造を推定する時の波形解析法に有用

(b)



国内外との協働

- Lunar-impact flush observation

12/22@ISAS



- ISSI(International Space Science Institute)からの協力(サポーター)



Statement of ISSI international team on Moon seismology





まとめ

- APPROACHは、月惑星内部構造探査を切り開く挑戦的なミッション
- 「昨年度の課題」はすべて実施し、概ね成功
- MCD提出にむけて国際的な議論を経て提出に臨む

