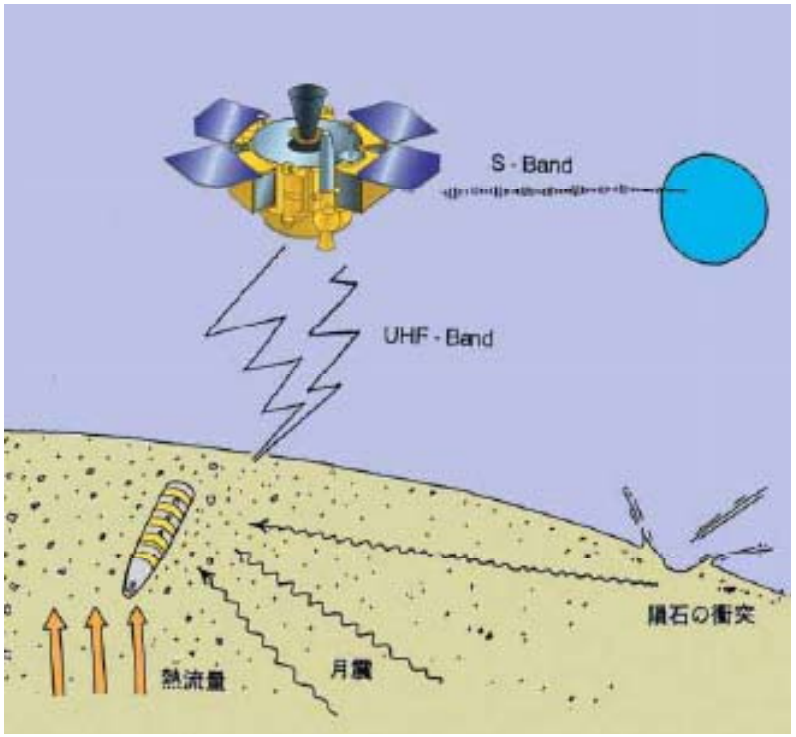
月ペネトレータの技術開発の成果と今後に向けた利活用についての展望

田中智、後藤健、白石浩章、早川基、
小松敬二、藤村彰夫、村上英記、小林直樹

ISAS／JAXA、高知大

ペネトレータ:



・ペネトレータは高速（300m/s程度）で貫入することにより月・惑星表層物質内に設置される。「ハードランダー」である。地震観測や熱流量など月惑星内部構造探査の主力機器として期待されている。
・軽量のために一度に多くのプローブを搭載できる可能性を有している他、惑星表層は一般に断熱的な環境のために熱制御が比較的容易（必要ない）なのも大きなメリットの一つである。
・ペネトレータの貫入衝撃は、6,000Gから10,000Gに及び、確認方法も含めて未開、未踏の技術が多い。

(2)開発経緯　（平成19年以前）

時期(年)		実施内容	打上げ予定(年度)
1983	昭和58	宇宙科学研究所に月探査作業部会設置	
1990	平成2	宇宙理学委員会でLUNAR-A計画を次期ミッションとして選定	
1991	平成3	プロトタイプモデル(PM)製作開始	1995(平成7)
1992	平成4	打上げ延期(M-Vロケット開発の遅れのため)	1997(平成9)
1994	平成6	フライトモデル(FM)製作開始	
1997	平成9	打上げ延期(ペネトレータ分離機構改修等のため)	1999(平成11)
1998	平成10	打上げ延期(ペネトレータ貫入認定試験においてポッティング材にクラック発生のため)	2002(平成14)
2000	平成12	打上げ延期(ASTRO-E打上げ失敗のため)	2003(平成15)
2002	平成14	打上げ延期(MUSES-C打上げ延期のため)	2004(平成16)
2003	平成15	ペネトレータ貫入認定試験において各機器の耐衝撃性は確認。ただし、タイマーシーケンスに異常発生。(11月)	
		打上げ延期(米国製スラスタ推薬弁リコールに伴う改修のため)(12月)	未定
2004	平成16	総点検実施(課題:通信系ロバスト化、タイマーシーケンス異常対策)(2～7月)	
		宇宙開発委員会へ今後の対応方針を報告(8月)	
		LUNAR-A計画検討委員会(外部評価)、LUNAR-Aペネトレータ開発の今後の対処策に関する技術確認会(JAXA内評価)を実施(8～11月)	
2006	平成18	ペネトレータ貫入試験においてペネトレータの耐衝撃性をほぼ確認(6月)	
		ナーフエンジニアオフィス評価を実施(9月)	

宇宙開発委員会　推進部会資料(2007年1月)より

ペネトレータ開発の経緯（平成19年以降）

平成19年01月： SAC中間評価、LUNAR-A計画の中止、ペネトレータ開発は続行

平成20年02月： サンディアでの実機(相当)の貫入試験(QT)を実施。

平成20年05月： ペネトレータ**不具合原因究明チーム**設置

不具合原因の特定および対策の決定

（**月震計**のはんだづけ不良、**通信系**デジタル部のポッティング材内クラック発生
それら以外の不具合はなく、不具合部分を補修することで完全動作を確認）

平成21年01月： SAC懇談会、不具合対策の開始

●**月震計**不具合対策：

線径の異なる導線は個別にはんだ付け

・対策確認の試験実施

・O.K.

・ペネトレータ貫入試験（ΔQT）にて最終確認

●**通信系**不具合対策：

シールドケース内部の内向きのエッジをすべてなくす

・対策確認の低温試験実施

・対象外としていたRF部にもクラック発生

・デジタル部、RF部のクラック対策開始

・低温試験にて「クラック無し」を確認したため、
ペネトレータ貫入試験（ΔQT）にて最終確認

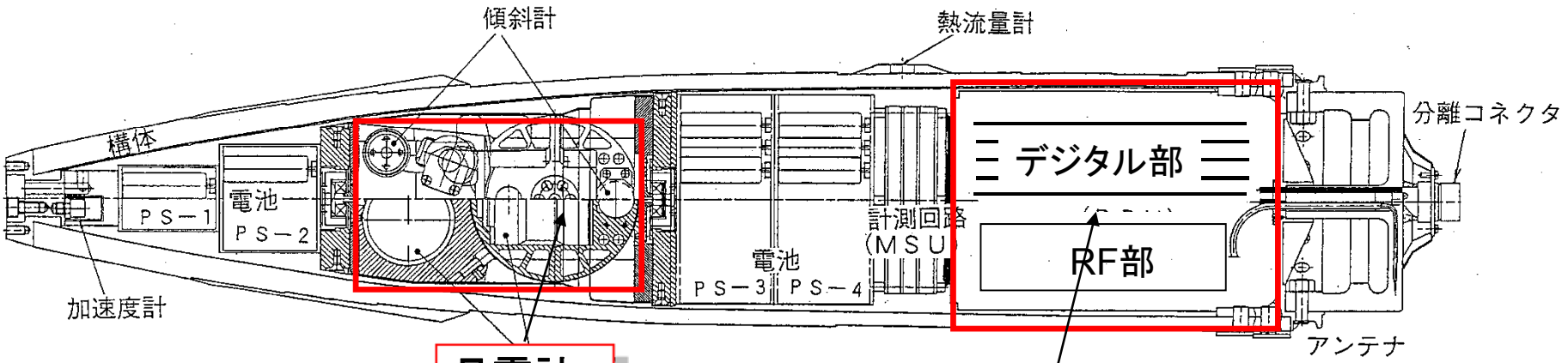
平成22年05月： 低温試験（最終）

平成22年05月： 貫入機体の製造

平成22年08月： **ペネトレータ貫入試験(ΔQT)の実施**

貫入試験（QT）（平成20年2月実施）で発生した不具合

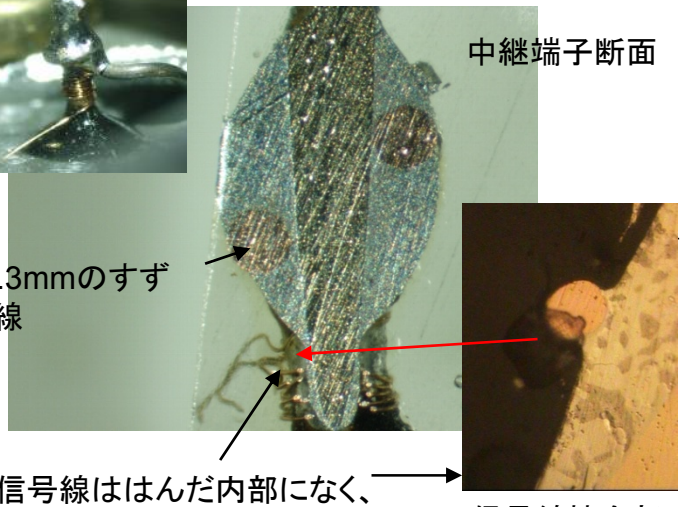
以下の2件（月震計、通信系）の不具合が発生
不具合部分を補修し、動作させたところ、正常に動くことを確認



中継端子外観

端子部のはんだ付け不良

中継端子断面



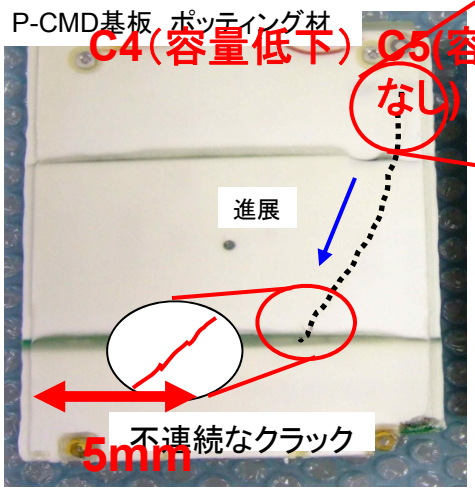
線径0.3mmのすず
メッキ線

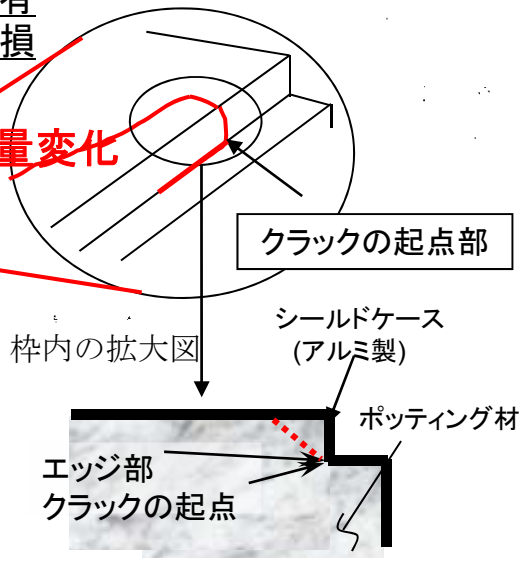
20μm信号線ははんだ内部になく、
表面に露出しているのみ

20μm信号線接合部
の拡大写真

搭載機器、電子部品に向かう（有害な）クラックが生じ、部品を破損

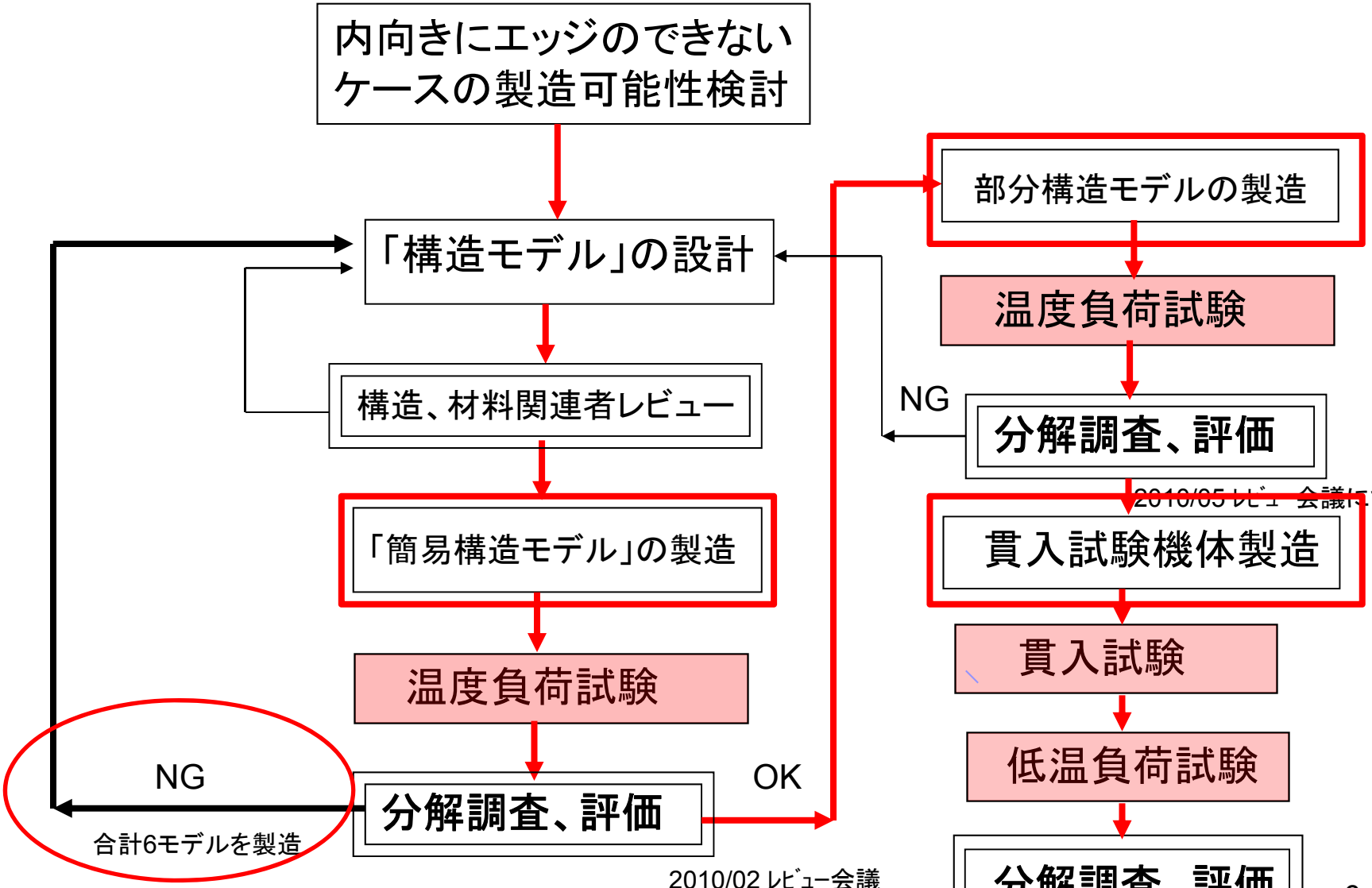
P-CMD基板、ポッティング材





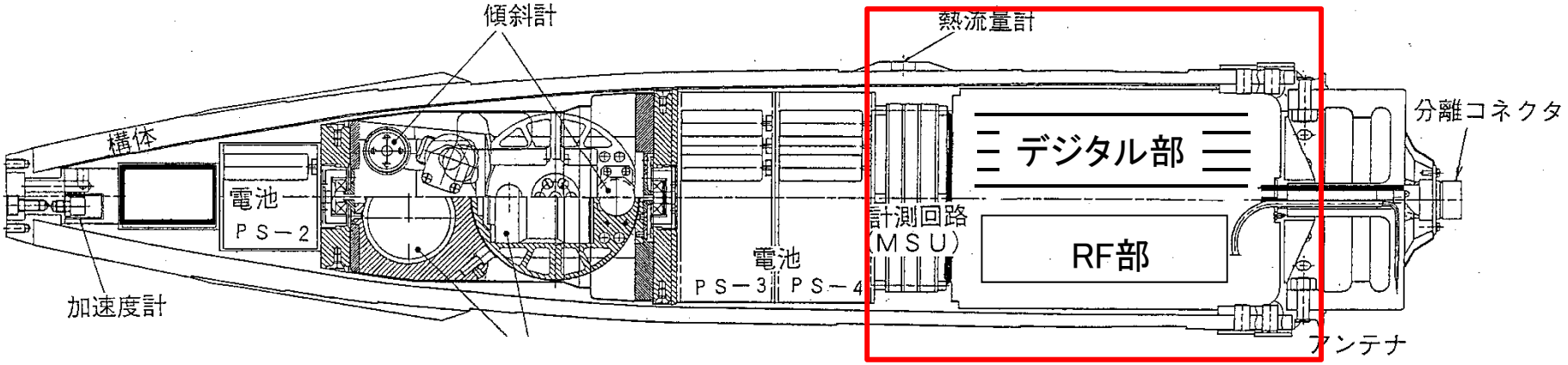
＜クラック起点部の断面＞

通信系不具合対策の効果の確認プロセス



ﾚﾋﾞｭｰ会議：宇宙研の材料、構造、電気などの専門家で構成

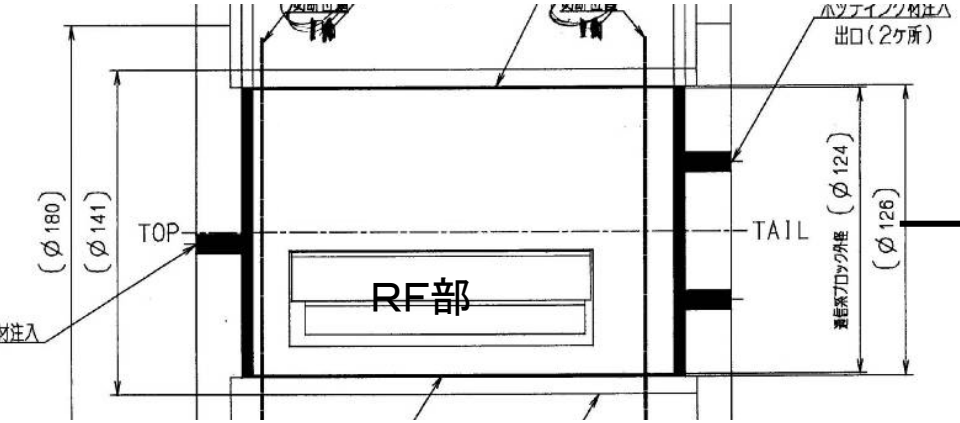
ペネトレータの構成概略と試験コンフィギュレーション



（たらい試験）

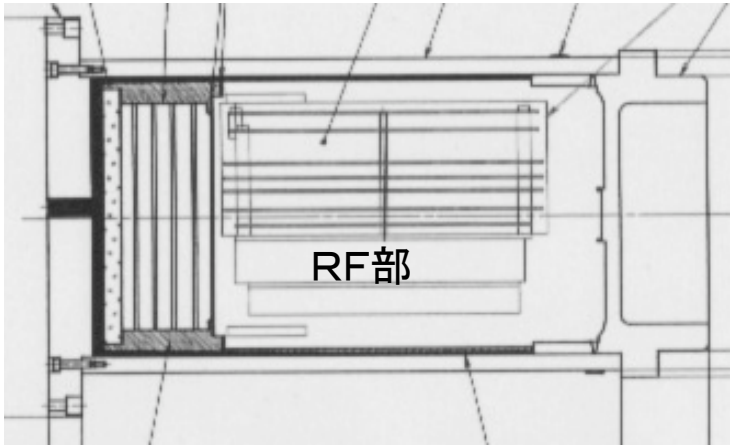
予備試験用簡易モデル

（デジタル部、MSUなし、両端蓋）



低温試験用構造モデル

（電子部品実装、配線なし）



ペネトレータ貫入試験（ΔQT）の評価結果まとめ

- **試験項目は2機ともすべて問題なく実施された。**
  - 低温試験（-5℃）
  - 貫入試験（米国サンディア国立研究所にて実施）
    （迎角8.6度、速度310~342m/s、－5℃）
  - 低温試験（-30℃）
  - CT撮影（上記試験の前後に実施）
  - 分解調査

- **評価結果**
  - ポッティング材に搭載機器に不具合を生じる可能性のある「有害なクラック」は発生しないことが2機とも確認された。
  - 月震計の端子部分のはんだ付け部の断線、導通不良が32か所のすべてにおいてないことが確認された。

  以上により、2008年の貫入試験で発生した不具合が克服され、ペネトレータの技術が完成した。

（次に新たにミッションが立ち上がった際には、その要求条件のもとで設計、製造されたFM相当機体(ペネトレータとして観測、制御、通信機能および性能を有する機体)に対して、可能な限りのデータ取得を配慮しつつ、QT条件での貫入試験を実施する）

ペネトレータ技術開発成果のまとめ

- 耐衝撃性を確立するための「肝」は「クラックとの戦い」であった。クラック発生を無くす努力を踏襲してきたができなかった。1998年に発生した不具合の対策案としては却下された「適切な位置にクラックを誘導する」手法を採用して耐衝撃性を確保することに成功した。
- はんだづけ部分不良などによる不具合に端を発し、すべての「接合部分」に対する見直しを行い、信頼性を向上させた。
- 今後、仕様変更、コンフィギュレーション変更は多かれ少なかれ想定されるが、どの程度の変更でどういう確認をすべきかも含めた「勘」どころを含め、耐衝撃性を極力迅速にかつ経済的に確認する手順、道筋を確立した。

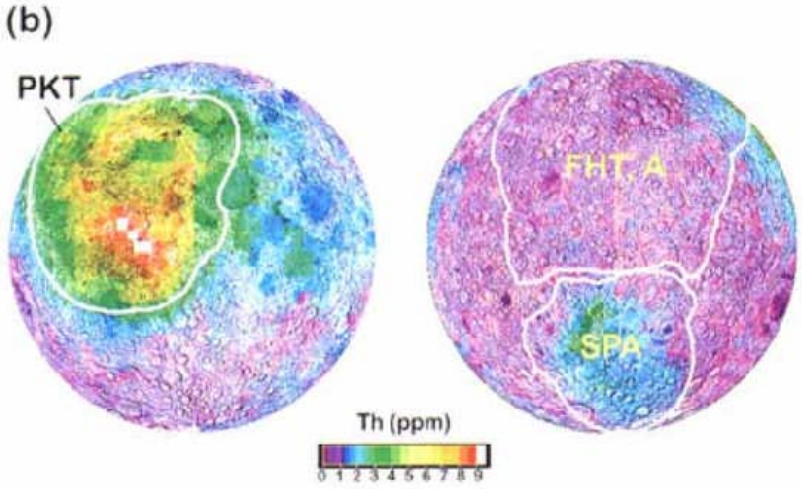
搭載機器を「モールド（充填）」することによって耐衝撃性を確保するタイプのペネトレータの完成

利活用の展望（1）

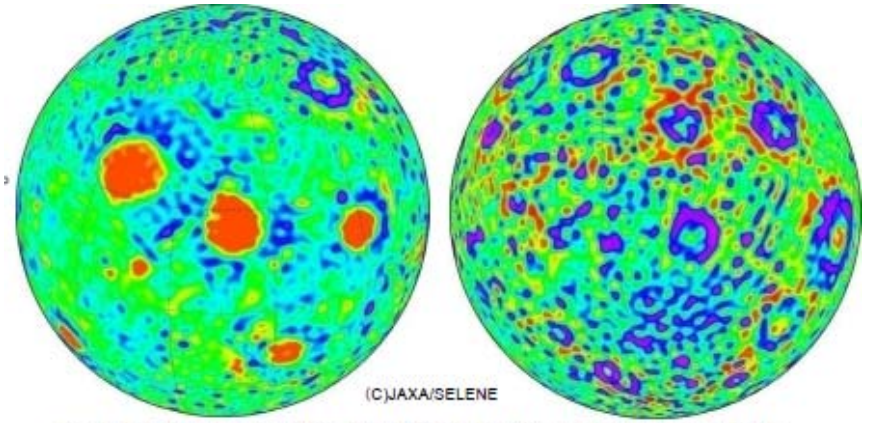
- 本WGの趣意である、ロシアの月探査ミッション：LUNA-GLOBへペネトレータを搭載を目指すためのスターティングポイントに立つことができた。

月ペネトレータの真骨頂は

- 月と表と裏は表面の物質分布だけでなくて、深い部分まで違いがある。このような2分性は月だけではない。これらの起源を明らかにすることが惑星のダイナミックな描像を理解する上で不可欠→広範囲にばらまけるペネトレータは重要。

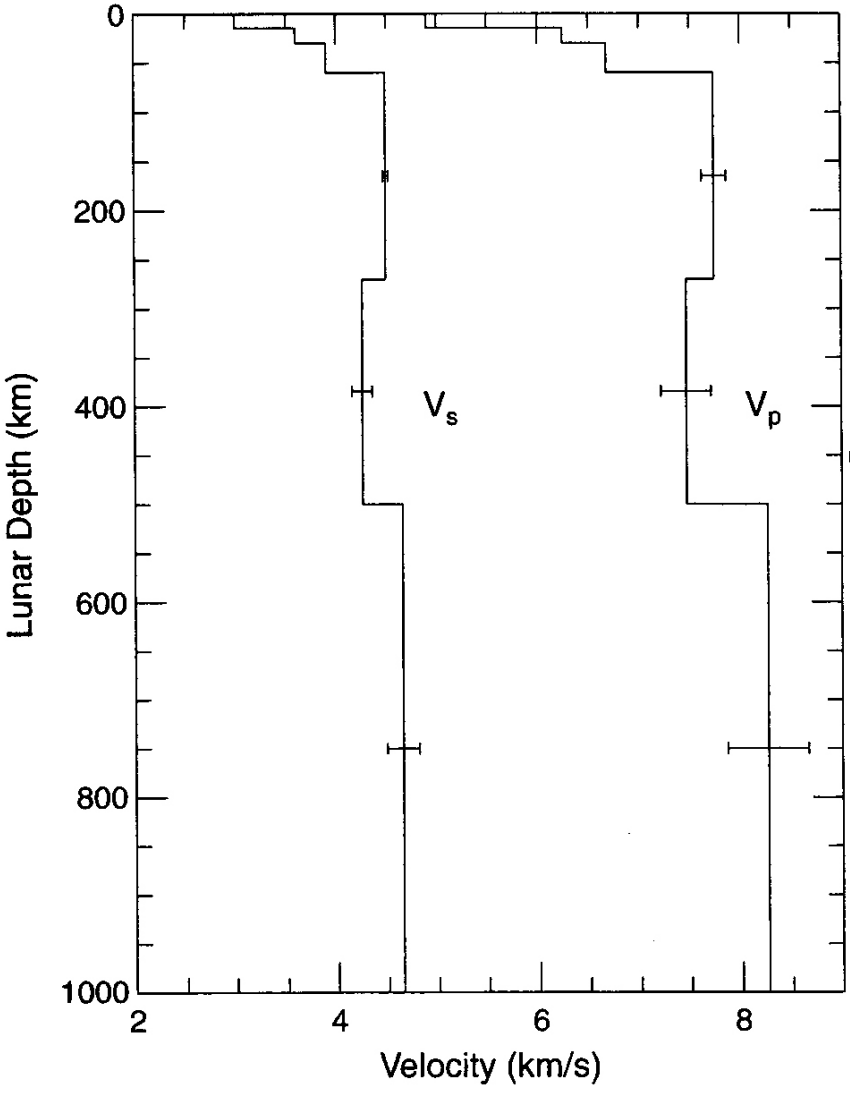


Th分布（LPによる）

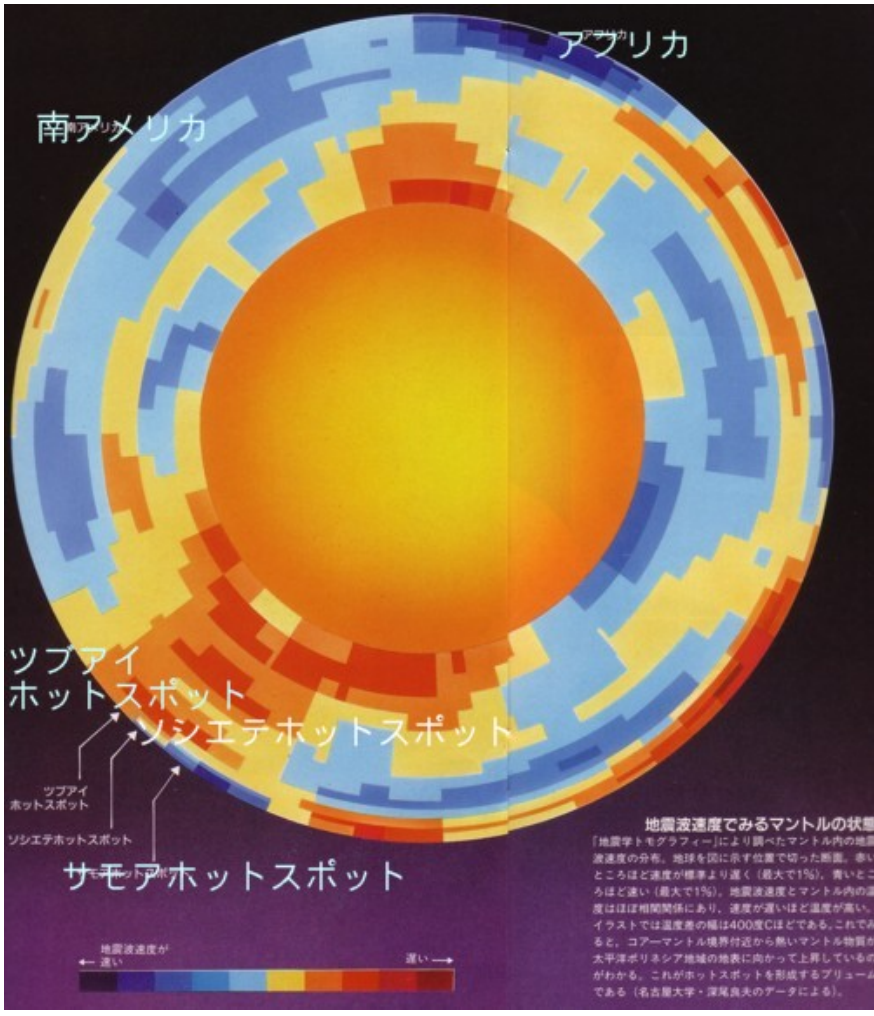


かぐや重力場モデル（SGM90d [3]）による重力異常図．左は月の表側を北東から見下ろした図．右は裏側を南西から見上げた図．赤色は重力が強い地域を，青色は弱い地域を表している。（処理・解析：　九州大学、国立天文台）

月の内部地震波速度構造：精度向上や中心までの構造を決めるだけでは到底足りない！



20years



ペネトレータ搭載性の比較

	LUNA-GLOB	LUNAR-A
構成	ランダー＋周回衛星＋ペネトレータ	周回衛星+ペネトレータ
母船姿勢制御	3軸姿勢制御	スピン安定
ペネトレータ搭載機数	4機	2機
ペネトレータ構成	ペネトレータ本体＋ キャリア（制御部）＋ DOM（減速モータ）	同左
ペネトレータ投入軌道	25km×200km	25km×200km
分離方式	LPM単体スピン後に分離	母船スピン状態で分離
母船側通信アンテナ	指向性アンテナ（ジンバル搭載）	オムニアンテナ

期待される科学成果（要約）

- 成功する機体数によってサクセスクライテリアは異なるがロシア側のランダー（極地域に着陸予定）による観測も含め最大５点での地震ネットワーク観測が可能になる。極－赤道地域の側線長さは2700kmであり（アポロ観測は1000km)、月中心までの速度構造および、月の主要な地質区分での熱流量値を明かにすることが可能になる。

- 月震：月面設置機体数と期待される科学成果（ランダーは成功することを前提条件とする）

  ３点(ミニマム)：　月表側における速度構造（ランダー＋ペネトレータ2機）

  ４点　　：　月の裏側の地震活動

  ５点　　：　月の表、裏側の不均質性についての情報が得られる。

ミニマムサクセスによって中心核の大きさが決定、速度不連続構造が見いだされれば、月成因について決定的に重要な制約条件となる。

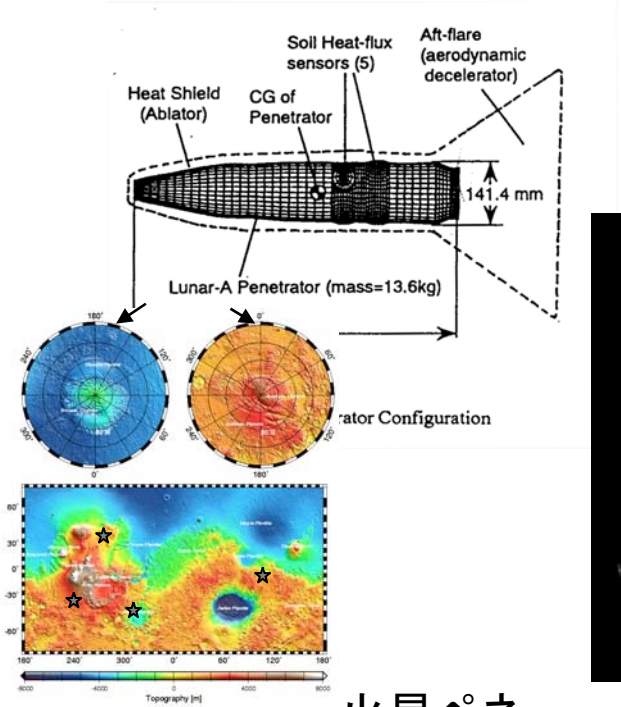
- 熱流量：これまでのアポロ観測による2地点の観測値は信頼性が低い。本ミッションによる多地点の熱流量観測により、平均的な熱流量値の決定が可能となり、温度構造、バルク組成推定の重要な制約条件となる。

利活用の展望(2)

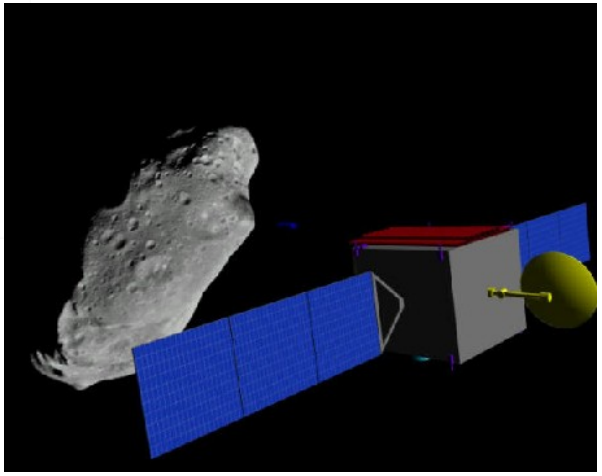
- 工学実証のスタンスに戻る。小型衛星による技術実証など。
- ただし、LUNAR-Aそのもののコンフィギュレーションでは活用しにくい。基本的には3軸制御衛星からの分離が必須。

利活用の展望(3)

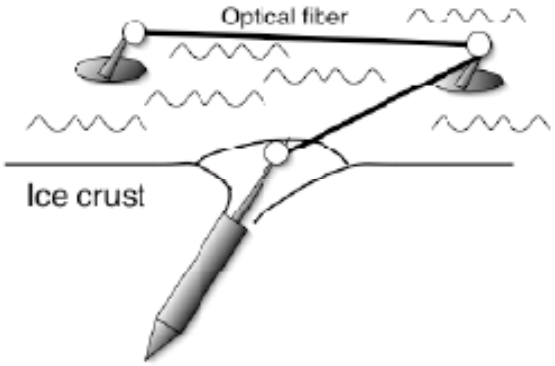
- 月以外の利用へ転換する。火星、小天体、外惑星などへの利活用可能性をさぐる。



火星ペネ



小惑星ペネ



Europaペネ

利活用の展望（番外）

- わが地球への利用。

砂漠ペネ
深海ペネ
密林ペネ
溶岩ペネ
. . . . . .

図4　ヘリコプターから投下されたペネトレータ
Fig. 4.　Penetrator released from a hovering helicopter.

図5　掘り出し中のペネトレータ
Fig. 5.　Penetrator body under excavation.

南極ペネトレータ（南極資料vol47,2003)

火山ペネトレータ（雲仙）(1996)

まとめ

- ペネトレータの技術的な完成に一区切りがついた。

- ペネトレータの利活用にむけた展開
  ・LUNA-GLOB：月での重要性はさらに上がっている
  - 工学試験実証（小型衛星など）
  - 月以外の天体への適用
- さらに実用性、利用価値の高いペネトレータの開発
  ・モールドタイプではない、「設計可能な」ペネトレータ
  - さらに利用応用性を広げたセンサーの開発
    （元素分析、鉱物分析、、、、）