

LUNAR-A中止後のペネトレータ

田中 智¹, 白石 浩章¹, 早川 基¹, 藤村 彰夫¹,
月内部構造探査ワーキンググループ

(要旨) 2007年2月にLUNAR-A計画が中止となつてから4年が過ぎた. その間もペネトレータの開発を続け, 最後の試験と臨んだ2010年8月のペネトレータの貫入衝撃認定試験にて耐衝撃技術の確立を無事確認することができた. LUNAR-A計画の中止の際に日本惑星科学会にはペネトレータ技術の有用性と計画中止後の開発継続を訴えていただいた. 本報告書ではペネトレータを用いた月内部構造探査計画であったLUNAR-Aの中止の後, 衝撃耐性技術の確立迄のペネトレータ開発の経緯を紹介する. また, 本報告をもってペネトレータの開発に期待を寄せ辛抱強く応援していただいた日本惑星科学会の皆様への感謝の念を伝える.

2007年2月第17号科学衛星(LUNAR-A)計画の中止が決まった. しかしLUNAR-A計画で開発を進めていた高速貫入型のプローブシステムは計画それ自体の中止にも関わらずその高い有用性が認められ, その後も開発が進められてきた. その後の開発が進められたのも日本惑星科学会においてペネトレータの持つ科学的な価値と開発の必要性を認めていただき声明文という形で御提出していただいたおかげである. プロジェクトの中止という前代未聞の逆境の中, 暖かく御支援していただいた日本惑星科学会の皆様にはこの場を借りて厚く御礼申し上げたい.

開発を進めてきたペネトレータは2010年度に実施した貫入衝撃試験において耐衝撃技術を無事確立した. 1990年に宇宙理学委員会にてLUNAR-A計画が宇宙科学研究所(ISAS)のミッションとして選定されて以来実に20年の歳月が流れた. 本報告ではLUNAR-A計画の中止後の経緯をお伝えし, 耐衝撃技術を確立するに至る迄の開発チームの活動と今後のミッション化に向けての展望を簡単に紹介する. 誠に不十分なことと思うが, この報告をもって皆様の御支援への感謝の意を表したい.

LUNAR-A中止後の経緯を報告する前に, 事情をよくご存知でない方のために簡単にペネトレータと

LUNAR-A計画について紹介する. ペネトレータは, 月や惑星の表面に地震計などの観測ネットワークを展開する上で有力なツールである. ペネトレータは長さ80cm程のペンシル型の観測装置でLUNAR-A計画では, 短周期の地震計と熱流量計を搭載し, 月の地震(月震)と地殻熱流量を計測する目的で開発が進められた. 月面上に観測機器を設置する場合, 着陸機に搭載し, 人手もしくはロボットアームなどを利用して月面に設置する方法が考えられる. アポロ着陸船は人が設置した代表例である. それに対し, ペネトレータは軌道からの離脱モーターは持つものの, 減速することなくほぼ自由落下で月面に衝突貫入することで観測装置を設置する. 月面の場合, 貫入時の衝突速度は300m/s程にもなる. 着陸機に必要な燃料や着陸制御機構はペネトレータでは不要であるため, 1機あたりの総量を軽く小さくすることができる. ゆえに同じ運搬能力のロケットで一度に複数機のペネトレータを運ぶことが可能になる. 地震計測などネットワークであることが本質的に価値のある探査において, 比較的低コストかつ短時間でネットワーク観測を実現できる装置としてペネトレータは高い価値を持っている. 人類はアポロ探査以降, 地球外に地震計や熱流量計などの計測器のネットワークを実現していない. アポロ計画は冷戦時代の国家競争という背景の下, 膨大な国家予算を10年以上も継続投入して始めてなし得た成果であった. も

1. 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
tanaka@planeta.sci.isas.jaxa.jp

し日本がペネトレータを完成することができれば、アポロと同等以上の規模の観測ネットワークを一科学衛星程度の予算でしかも一度に手に入れることができる。これは大変魅力的なプランであった。

ペネトレータを用いたミッション構想の科学的な価値が認められ、1990年にはISASの宇宙理学委員会にて理学ミッションとして採択された。月の深部構造に迫る大胆なミッションとして大きな期待を背負いペネトレータとLUNAR-Aの母船の開発が進められた。開発が進むにつれ、積載量、通信性能などが当初の見積もりよりも小さいことが分り、ペネトレータの本数も3台から2台、地震計も3成分から2成分と性能の縮小を余儀なくされた。また実際の貫入に際しては機軸と進行方向が斜交する迎角が付いた衝突となることも分り、その実証試験のため迎角が付いた衝突実験が可能な米国のサンディア国立研究所で試験を行わなければならなくなった。国内で実証試験ができなくなったことは輸出認可などの煩雑な事務手続きの必要性を始め費用的、時間的に大きな痛手となった。一方LUNAR-Aのサイエンスチームには「地震計2台2成分、フロッピー1枚のデータで月のコアを探るという当初の科学目標を達成できるか」という課題が与えられ、ほとんど絶望的な中、月震波の波形計算の成果によって辛うじてその実現可能性を示すことができた。

LUNAR-A計画を進めるにあたって次々と生じた問題に対して開発チームは迅速な対応を続けたにも関わらず、1995年の当初の打ち上げ予定を延期したのを始め以降も相次ぐ不具合や打ち上げロケットの改修など外的な要因のために6度の打ち上げ延期を余儀なくされ、2007年2月にとうとうプロジェクトの中止が決定した。LUNAR-A計画の中止はペネトレータ開発の断念を示唆したが、それによる惑星科学や地震学の発展に与える影響が大きいと判断した日本惑星科学会、日本地震学会から相次いでJAXA理事長宛にペネトレータの科学的な価値と開発の継続を訴えていただいた。そのおかげもありペネトレータの開発自体は継続することが決まった。

LUNAR-A計画の中止が確実視されるようになった2006年11月にロシア側から日本のペネトレータをロシアの次期月探査計画Luna-GLOBに搭載しないかとの打診があり、ロシア側との協議の場を持った。検討の末、ペネトレータを即時完成させ2012年打ち上げ予

定のロシアの衛星に搭載することを目指すことにした。2007年3月にはISAS理学委員会に「月内部構造探査WG」としてワーキンググループ設立提案を行なった。メンバーはLUNAR-A計画に携わった研究者のうち30代、40代の世代が中心となり、4機のペネトレータと1機の着陸機によるネットワーク観測を行ない月の地殻から中心核までの一次元内部構造モデルを構築するという計画を提案した。月内部構造探査WGは宇宙理学委員会にて承認され、ペネトレータ技術を完成させミッションに繋げる活動が再開することになった。

ロシア側との交渉も2006年11月の初回以降、2007年11月、2008年2月と交渉を重ねいよいよペネトレータの完成を待つばかりの状態であった。そして2008年2月25日米国サンディア国立研究所にて最終確認として位置づけた貫入衝撃認定試験に満を持して臨んだ。その結果次第でLuna-GLOB計画において日本のペネトレータが実現するかどうかの大きな判断が下される重要な試験であった。大きな期待がかかる中実施した貫入試験であったが、その結果は無惨なものであった。貫入後のペネトレータとの通信リンクがうまく確立せず、さらに地震計のセンサーにも異常が見られた。

帰国後、早速その不具合調査が始まった。2008年5月にはJAXA内にペネトレータ認定試験不具合原因究明チームが設置された。ペネトレータは高い耐衝撃性を実現するために空隙をエポキシ樹脂で充填している。このため、製造に時間がかかるだけでなく、不具合が生じた場合の原因調査のための検査も手間がかかる。最終的には分解して内部を確認するのだが、それによって失われる情報もあるためX線による透過診断など非破壊の検査を十分に行なう必要がある。非破壊検査の後、いよいよ切断して不具合の原因の特定を行なう。3ヶ月に渡る詳しい調査の結果、不具合の原因が分かって来た。通信確立ができなかった原因はコンデンサーの一つに充填材のクラックが伸展し破壊が生じたことであった。そのためコンデンサーの容量が変化し異常な発振現象を引き起こしたことが明らかとなった。通信性能を上げるためにデータ処理系に追加した構造変更が潜在していた問題を顕在化させた結果であった。一方、地震計は信号線を接続する部分でのハンダ付け方法に問題があることが分った。2008年

12月に原因究明調査結果と対策案がまとまり、調査委員会はその役目を終えた。

充填材が原因となった不具合は1998年にも生じたことがあった。その当時の調査結果から破壊の原因となる歪は低温時の熱歪みによる影響の方が衝撃時のものよりむしろ大きいことが分っていた。従って衝撃試験を行なう前に熱応力を負荷することである程度状況を模擬できると判断した。充填材や搭載機器の構成を改良しては低温試験を繰り返す作業が毎日のように続いた。事故以来一年半の月日が流れたが、なかなか熱歪みに耐える技術は確立できなかった。対策として取った最終案はクラックの発生を防止するのではなく、「安全」なクラックを発生させることで応力を解放し重要な搭載機器部分を守るという方式であった。2010年5月に熱構造モデル低温サイクル負荷試験を実施し、搭載機器の破損の可能性を与えるクラックがないことが確認できた。また、地震計の信号線のハンダ付けに対しては日本溶接協会やセイコーインスツル株式会社の方々にご指導を仰ぎ、確実に信頼性の高い接合方法を確立することができた。

そしてついに2010年8月にペネトレータの熱構造モデル2機をサンディア国立研究所にて貫入させる試験に臨むことになった。今回の試験は今後もペネトレータの開発を続けるか否かを判断する最後の試験であった。製造の際のばらつきがあるため同一仕様の機体を2機製造した。そして2機とも機器に影響を及ぼすクラックが存在しないことが「成功」の条件という厳しい判断基準で臨んだ。十分な検討と準備を行なって来たといえど、結果としての成功は実際に打ち込んでみないと分らない。これまで以上の緊張と覚悟で臨んだ試験であった。打ち込み試験は2機とも無事に終えたが、ペネトレータの回路基板に破壊が生じていないかなどの詳しい調査は帰国後に行なわなければならない。2ヶ月あまりの調査期間を得て、すべての分解調査を終了した。そして、2010年10月の実験結果のレビュー会で2機の貫入機体のどちらにも問題がないことを報告することができた。20年という長期に渡るペネトレータ開発において一つの区切りが着いた瞬間であった。

2011年1月の宇宙科学シンポジウムで一連の経緯と試験の成功を報告した。発表を担当した田中は冷静たんと努めて話をしたが、いつになく熱い発表となっ

た。発表直後に会場から湧き起こった拍手にこれまでの長い開発と最後迄諦めずに続けてきた努力が報われる思いがした。

しかし、試験は成功したものの結果が出るのが少し遅すぎた。3月に行われたロシアとの会合でLuna-GLOBには間に合わないことがわかり搭載を断念した。だが、その一方でロシア側からLuna-GLOB以降の月着陸帰還探査においてペネトレータの搭載提案をするよう助言をいただいた。望みが潰えたわけではない。

フル機能のペネトレータの完成には通信機能の向上等まだ開発の余地が残っているが、低温および衝撃耐性については技術確立を果たした。そしていよいよペネトレータを用いた月惑星内部構造探査の計画を再び開始する段階に入った。しかし20年という月日で失った信用を取り返しつつ、他のプロジェクト提案を退けてミッション化を実現するには相当な困難が予想される。それでも、開発チームではペネトレータの実現に向けた検討が始まった。ロシアの次々期着陸帰還探査機への搭載の可能性、日本の小型科学衛星計画において規模を小さくしたペネトレータ計画を工学実証試験として実施する可能性、月惑星探査で認められる前に地球利用、特に震災や火山災害などの災害時緊急配備装置としての実用利用に向けての可能性について検討を始めた。ペネトレータの実現まではまだまだ道のりは遠いが、不屈の思いで開発と計画を進めている。

以上、御報告申し上げたように皆様の御寛容と暖かい御声援を受けてここまでやって来ることができた。誠に感謝の念に堪えない。また、ペネトレータの可能性や将来性についてご理解いただき、是非とも開発チームに御参加いただきたい。今後とも御支援、御理解のほどよろしくお願い申し上げます。