

アポロ月地震データ公開システムの開発

山田 竜平^{*1}, 山本 幸生^{*1}, 桑村 潤^{*2}, 中村 吉雄^{*3}

Development of an online retrieval system of Apollo lunar seismic data

Ryuhei YAMADA^{*1}, Yukio YAMAMOTO^{*1}, Jun KUWAMURA^{*2}
and Yosio NAKAMURA^{*3}

Abstract

The NASA Apollo missions from 1969 to 1977 provided the first-ever seismic data from a planetary body other than the Earth. Forty years after the acquisition of these lunar seismic data, lunar scientists continue to analyze them and derive new results related to lunar geophysics. However, the users often find the data difficult to obtain and analyze because at present not all data are publicly available and archived with a convenient interface, and also because the format of the archived data is unfamiliar to many seismologists. To alleviate this difficulty, we have developed a retrieval system for the Apollo seismic data that enables the user to obtain the data and metadata necessary to use them properly. To accomplish this, we first collected most of the Apollo lunar seismic data and information required to analyze them. Then, we built a relational database consisting of the decoded lunar seismic data and an application to access the database on the World Wide Web. Using the database and application, one can search and obtain the required lunar seismic data online. This new data retrieval system will allow more people to access the existing lunar seismic data; and we anticipate that future analysis of the archived data will generate significant progress towards better understanding of the Moon and the solar system.

Keywords: Apollo, lunar seismic data, moonquake, data archive, database, retrieval system

概 要

1969年から1977年にかけてNASAのアポロミッションで得られた月地震データは地球以外の天体で得られた最初の地震記録である。このデータは、取得以来40年経った現在でも解析が続けられており月の地球物理学研究において主要な役割を果たしている。一方で、得られた月地震データセットの全てが、現在のデータ公開機関でアーカイブされ、公開されているわけではない。また、多くの公開データのフォーマットが一般の地震学で使用されるものと異なるため、現状、ユーザーが必要なデータと情報を取得し、解析研究を行うのに敷居の高さを伴っている。そこで、本研究では、これまでよりも容易にユーザーが要求する月地震データとそのメタデータを取り出し、解析に供することができるApollo月地震データ公開システムを開発した。この開発のため、まず我々はほとんど全ての月地震データのアーカイブとデータ解析に必要となる情報の収集と整理を行った。そして、デコードしたデータから構成されるリレーショナル型データベースとデータベースへアクセスするアプリケーションを開発し、Web上でユーザーが要求する月地震データを検索して取得できるようにした。本研究で開発した公開システムを通して、より多くのユーザーが月地震データにアクセスできるようになり、解析研究を通して、月惑星科学を更に進展させていくことが期待される。

¹ 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

² 日本 PostgreSQL ユーザ会 (Japan PostgreSQL User Group)

³ テキサス大学 (The University of Texas at Austin)

1. はじめに

1969年7月21日、NASAのアポロミッション（Apollo 11号）において、宇宙飛行士の手により月面に地震計が設置され、地球以外の天体で初めての地震観測が行われた。以降、Apollo Lunar Surface Experiment Package (ALSEP)の一つとして、1972年12月12日まで Apollo12, 14, 15, 16, 17号と月面への地震計の設置が実行された^{e.g., 1)}（図1）。

NASAのアポロミッションにおいては、受動と能動の二種類の地震観測が行われた。そのうち受動観測では、Passive Seismic Experiment (PSE)と Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE)の一部の実験が行われ、能動観測では Active Seismic Experiment (ASE)と LSPEの一部が実行された。受動観測のうち PSE では、Apollo 11号で約20日間観測が行われたのに加え、Apollo 12, 14, 15, 16号で設置した地震計により一辺約1100kmの三角ネットワークを構築して（図1）、1977年9月30日まで連続受動地震観測を行っている。PSEで用いられた地震計は三成分の長周期地震計(LP)と垂直成分のみの短周期地震計(SP)より構成され、月の地震活動を捉える事に初めて成功した。（地震計の特性については2）等を参照。）この観測で得られたデータは現在でも解析が行われており、このデータを通して月で起こる地震イベントの種類や活動度、月の内部構造についての多くの知見を得ることができている^{e.g., 3), 4)}。

一方、能動観測のASEはApollo 14, 16号、LSPEは17号で実施された。これらの観測では固有周波数約7.5Hzの geophone のアレーと人工震源を用いて、月面深さ1km程度までの浅部の構造が調べられている⁵⁾。人工震源としては、Apollo 14号では Thumper, 16号では Thumper と Grenade, 17号では爆薬 (Explosive Package) が用いられた。

受動観測のLSPEは17号の能動観測時に設置した geophone アレーで、一時期受動観測を行った実験である (Passive Listening Mode)⁶⁾。

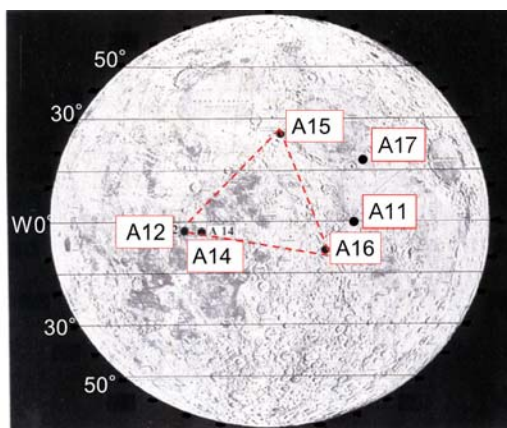


図1. Apollo 地震観測点配置⁷⁾

各黒点が各 Apollo サイトの地震観測点、図の赤点線は 1972 年 4 月 21 日～1977 年 9 月 30 日の間で連続観測を行った三角ネットワークを示す。

一方、PSE, ASE, LSPE とは別に Apollo 17号では LSG (Lunar Surface Gravimeter)⁸⁾、月重力計が設置された。この重力計は月面での特性調整に失敗して、計画時の目標であった重力波の検出を行えなかったが、固有周波数約1.9Hzの under damping の地震計として振舞っていた⁹⁾。最近の研究では LSG で解析に使用できる程の S/N の月地震イベントが検出されている事を確認している¹⁰⁾。

PSE, ASE, LSPE 及び LSG で得られた地震観測データは、いまだ唯一の月面地震観測データであり、月の geophysical データとしての科学的価値は極めて高い。そして、現在に至るまで新しい科学的知見を生み出しつづけている^{e.g., 11)}。

本研究では、将来の日本の月地球物理探査計画を見据えて、月面地震データの新たなアーカイブ、データ解析の拠点を構築するため、現存するほぼ全ての Apollo 月地震データの収集と、解析に必要な Apollo 月地震観測に関する情報の整理を行った。そして、ユーザーが容易に月地震データを取得し、解析に用いることができるようにデータベースとアプリケーションの開発を行った。本論文では、本研究で行ったアーカイブ、開発の概要とその結果について述べる。

以下、2. で Apollo 月地震データのアーカイブの現状とその問題点について述べる。そして、3. で、本研究で行ったアーカイブ、システム開発とその結果について報告を行い、4. で今回開発した公開システムの課題について議論する。

2. Apollo 月地震データのアーカイブ状況

始めに、Apollo の観測で得られた月地震データが、どのような経緯で展開され、現状、どのようにアーカイブ、公開されているかを記載する。

2-1. Apollo データ取得経緯

図2にアポロ月地震データの取得経緯と展開状況の概略図を示す。図2で示すよう、ALSEPで得られた月面での観測データは直接地球上の各通信局に送られ、14トラックのレンジテープに記録された。記録されたレンジテープは、NASAのJohnson Space Center (JSC) に送られた後に、CDC3200 Computerにより処理され、Digital computer compatible テープ¹²⁾が作られた。その後、Digital computer compatible テープはUnivac 1108 Computerで処理され、観測機器ごとにPIテープに分けられて各PIの管理の下でアーカイブされた。一方で、1973年4月以降、処理手順が変更され、CDC3200のみを用いて、Archived ALSEP 24-hour time-edited save tapes (ARCSAV tapes)¹³⁾が作成された。ARCSAVテープには、一つの観測点ごとにALSEPの全ての観測機器のデータが24時間分ずつ集約されている。また、ARCSAVテープが作成されると共に、PIテープもCDC3200によって作成されるようになった。

1976年3月1日以降、観測が6年以上継続しJSCのデータ処理のコストが逼迫してきたため、より小型で高性能な計算機設備があるテキサス大学(UT)にALSEPデータの処理は移された。通信局からのレンジテープはテキサス大学に直接送られ、そのデータは「Work Tape」と呼ばれるディジタルテープに記録された。この処理はALSEPの観測が終了する1977年9月30日まで続けられている。

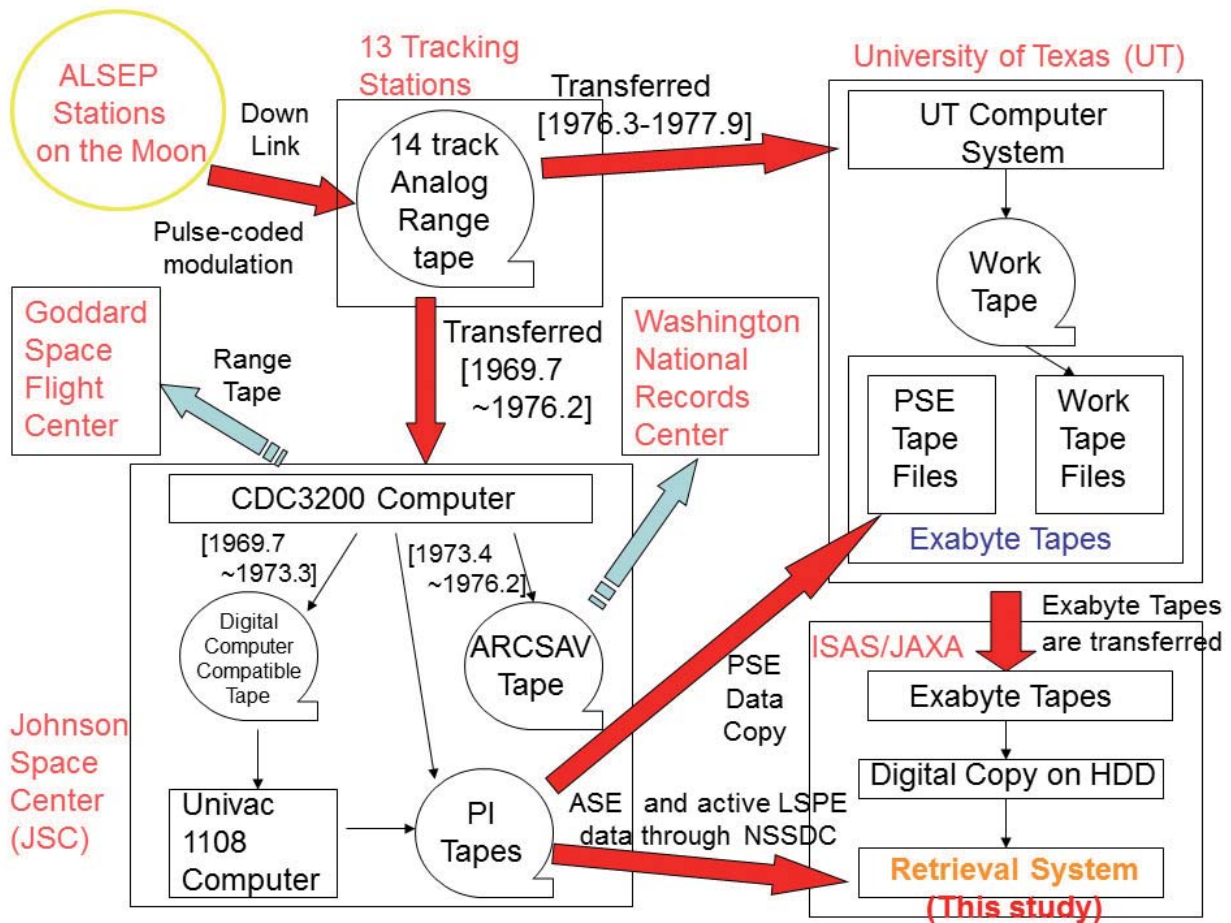


図2. Apollo データの取得経緯と展開状況

1990年代になり、記録媒体の縮小化とデータアクセスの容易さのため、PSEデータとWork Tape中のデータは全て8mmビデオカセットテープ(Exabyteテープ)にリフォーマットされ、記録された。この処理はテキサス大学において、宇宙科学研究所(ISAS)の協力の下で行われた。

ExabyteテープではPSE TapeファイルとWork Tapeファイルの二種類に分けて記録が行われている(図2)。PSE Tapeファイルには1969年7月21日から1976年2月29日までのPIテープ(PSE Tape)に記録されたPSEのデータがコピーされており、Work Tapeファイルには1976年3月1日以降のWork Tape中の全データが記録された。Work TapeにはPSEのみでなくALSEPの全観測機器のデータがコピーされている。また、Work Tapeファイルには通常のNormal-Bit-Rate Work Tapeファイルの他にHigh-Bit-Rate Work Tapeファイルが作られた。High-Bit-Rate Work Tapeファイルには17号の受動観測のLSPEデータ(Passive Listening Mode)が記録されている。

Exabyteテープは作成後、ISASに全て移され、HDD上にそのデジタルデータがコピーされた。

2-2. 現在のアーカイブと公開状況

現在、全てのExabyteテープはISASの下で管理、アーカイブされている。一方で、そのデジタルコピーは世界中に流布され、各研究機関で、その一部または全体が独自の形式でアーカイブされているが、公式に公開してデータを配布している機関は米国のNational Space Science Data Center(NSSDC)とIncorporated Research Institutions for Seismology(IRIS)のみである。

しかしながら、NSSDCではALSEPの多くの観測機器のデータを一定期間分アーカイブしているが、そのデータの多くが各観測機器担当の研究者により個別に処理されたものであり、データのフォーマットが不明瞭で、解析処理に困難を伴う。

一方、IRISにおいては、Exabyteテープのデータフォーマット(Exabyteテープデータのフォーマット情報については¹⁴⁾を参照)とSEEDフォーマットでデータを展開している。ExabyteフォーマットのデータはUTからISASへ送られたものと同じで、PSEについては全期間のデータが揃っているが、能動観測のデータは無く、受動観測のLSPEとLSGのデータはWork Tapeに収録されている1976年3月以降のデータに限られている。SEEDフォーマットデータはApollo 12, 14, 15, 16号のPSEデータのみ存在し、11号、17号のSEEDフォーマットデータはアーカイブされていない。また、特にExabyteデータは独自のフォーマットであるため、解析処理を行うのにユーザー自身でのフォーマット情報の収集とデコード処理が要求される。

このような現状から、これまでは一般のユーザーが要求する月地震データを選択的に入手し、解析に使用するのに敷居の高さを伴っていた。

そこで、本研究では、新たなデータアーカイブ、データ解析の拠点構築を目指して、Apollo月地震データを一括管理し、かつより多くのユーザーが容易に要求するデータとメタデータを入手し、解析研究へ使用できる新しいデータ公開システムの開発を行った。

3. データ公開システムの開発

本研究では、公開システム開発として、以下の4項目を目的とした。

- [1] 現存する全ての月地震データセットを一つの場所にアーカイブする。
- [2] ユーザーがデータ解析に必要な情報を収集し整理する。
- [3] ユーザーが容易に解析に使用できる形式でデータを格納し、かつ要求するデータを検索可能なリレーショナル型データベースを開発する。
- [4] ユーザーがインターネットブラウザを通してデータベースにアクセスして、データベースの機能を活かせるアプリケーションを開発する。

以下に、本研究で実際に実行したデータアーカイブ、情報収集整理、データベース開発、アプリケーション開発の結果について述べる。また、図3に本研究で開発した月地震データ公開システムの構造について示す。この公開システムには、

<http://darts.jaxa.jp>

よりアクセスする事が可能である。

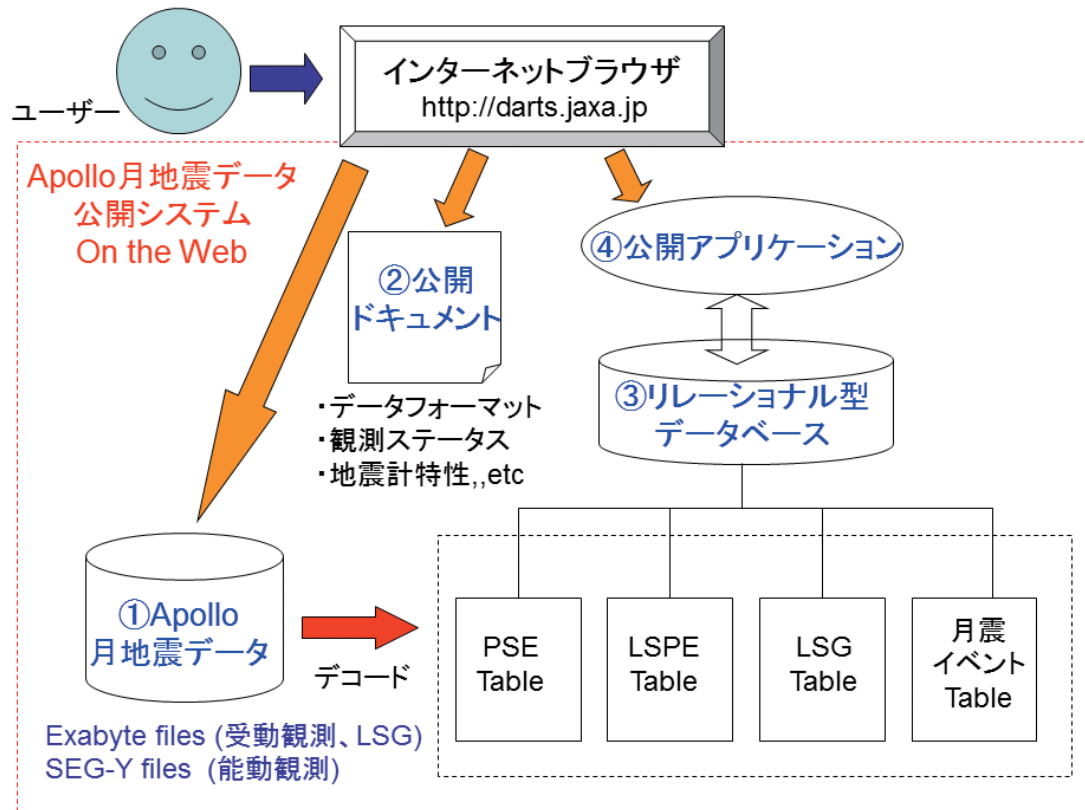


図3. アポロ月地震データ公開システムの構造

月地震データ公開システムはアーカイブした Apollo 月地震データと、データ解析に必要な情報をまとめた公開ドキュメント、アーカイブデータより作成したリレーショナル型データベース、データベースにアクセスできる公開アプリケーションより成る。公開システムは Web サーバー上に構築され、ユーザーはインターネットブラウザを介して、データベースへのアクセス、及びアーカイブデータ、公開ドキュメントの情報の取得が可能である。

表1. アーカイブデータ表

本研究でアーカイブしたデータの種類とそのデータの観測期間を示す。受動観測データ、及び LSG データはそれぞれリレーショナル型データベースの中に組み込まれている。データ不足期間はデータの行方が不明なため、本研究でアーカイブできなかったデータ期間を示している。

観測種別	観測サイト	観測期間 (Day of Year)	データ不足期間
受動観測	PSE	11	1969/202-1969/214
			1969/231-1969/237
		12	1969/323-1977/273
		14	1971/036-1977/273
		15	1971/212-1977/273
		16	1972/112-1977/273
	LSPE	17	1976/228-1977/115
			1973-1975 の一部期間 計 40 日程度
能動観測	ASE	14	1971/037
		16	1972/112, 114
	LSPE	17	1972/350-1972/353
LSG	17	1976/061-1976/227	1972/346-1976/060
		1977/115-1977/273	

3-1. 月地震データアーカイブ

本研究でアーカイブしたデータを表1にまとめる。

本研究でアーカイブした受動観測データの内、PSE データは Exabyte の PSE Tape ファイルのデータと Normal-Bit-Rate Work Tape ファイル中の PSE データのデジタルコピーである。この PSE データは ISAS にアーカイブされていた Exabyte フォーマットデータであるが、一部欠如しているデータもあり、不足分は UT から提供されたデータで補った。

同様に受動観測データである LSPE の Passive Listening Mode のデータも High-Bit-Rate Work Tape ファイル中に格納されている 1976 年 8 月 15 日～1977 年 4 月 25 日の期間のデジタルデータを取り出してアーカイブした。

能動観測データについては、Apollo 14, 16, 17 号の全ての実験データを Matthew Brzostowski 博士より提供を受けた。博士は NSSDC にアーカイブされていた ASE と能動観測の LSPE のデータを読み取る事に成功し、SEG-Y フォーマットにリフォーマットを行っている¹⁵⁾。我々はこの SEG-Y フォーマットの能動観測データをアーカイブした。

更に、我々は Normal-Bit-Rate Work Tape ファイル中に記録されていた LSG データについてもアーカイブを行った。LSG データは Work Tape ファイル中に記録されている 1976 年 3 月 1 日以降のデータを取り出し、アーカイブしている。

本研究では、PSE と能動観測データについては月面で観測されたデータの全てをデジタル形式でアーカイブする事ができた。一方、LSPE での受動観測、重力計での観測は 1976 年以前でも行われているが、これらの記録を収録した ARCSAV テープ、Digital-Compatible テープ、PI テープ（図2）は、現在アーカイブされているとされる機関でも所在が不明であり、現在、データの発掘が試みられているところである¹⁶⁾。これらの不明データは本研究でもアーカイブできなかったため、不足分としてその期間も表1に記載してある。

上記したアーカイブデータに関しては Exabyte ファイル、または SEG-Y ファイルをユーザーは公開システム上から、直接入手する事が可能である（図3）。

3-2. Apollo 観測情報整備

アーカイブされたデータを解読して、必要な情報を取り出し、科学的に意味のある成果を解析より導き出すには、一般にデータフォーマットの情報、観測ステータス情報、観測センサー、記録系の特性情報が必要となる。これらの情報は例えば、過去の NASA アポロミッション当時のドキュメント^{e.g.,12)}、解析者各個の研究論文等^{e.g.,2)}に記載されているが、それら全ての情報を集約したものは存在しない。

そこで、本研究では Apollo ミッションのドキュメントや研究論文などから、データデコード、データ解析研究に必要とされる情報を抽出し、公開システム上の Web ページ中、もしくはオリジナルのドキュメント中に整備した。

本研究で集約した情報は

- ・ Exabyte データフォーマット
- ・ Exbyte ファイルデータ格納情報
- ・ Apollo 月地震観測ステータス
- ・ Apollo 地震計、記録系特性

である。観測ステータスは PSE, ASE, LSPE, LSG で、観測期間中どこでどのような観測が実行されたかを整理している。月地震計、記録系特性は PSE, ASE, LSPE, LSG それぞれに対して、可能な限りの情報を収集し、整理した。上記の情報は必要に応じて、公開システム上の Web ページまたは、オリジナルドキュメントから取得する事が可能である。

3-3. データベース開発

公開システム上にあるフォーマット情報を用いれば、ユーザーはアーカイブした Exabyte ファイルをダウンロード、デコードして、観測データを取り出す事が可能である。その一方で、本研究ではユーザーが必要なデータを検索して、容易に要求するデータを取得できるようにするため Apollo 月地震データのリレーショナル型データベースを開発した。

表2に本研究で開発したデータベースの仕様を示す。本研究でのリレーショナル型データベースは Postgre-SQL を用いて作成した。このデータベースには Exabyte フォーマットデータをデコードした後の一部のデータを格納している。図3には本研究で作成したデータベースシステムの構造も示している。図3に示すよう、このリレーショナル型データベースは以下の各テーブルから構成される。

- ・ PSE テーブル
- ・ LSPE テーブル
- ・ LSG テーブル
- ・ 月地震イベントテーブル

これらのテーブルには全て絶対時刻の情報を格納しており、データベースの機能を用いて、絶対時刻情報を相互参照すれば、互いのテーブルをリンクさせてデータを取得する事も可能である。以下、各テーブルに格納されているデータの概要について述べる。

表 2. リレーショナル型データベース仕様

RDBMS	PostgreSQL 8.4.7
OS	CentOS 5.6 (Linux)
レコード数	13.8 億レコード
サイズ	545GB
DB テーブル	PSE, LSPE, LSG, 月地震イベント

3-3-1. PSE テーブル

PSE テーブルは以下の各列より構成される。

- ・ ファイル ID
- ・ 観測データ（各センサー、成分ごと）
- ・ 絶対時刻情報
- ・ Apollo ステーション情報
- ・ 地上局情報
- ・ フレームカウント
- ・ エラーフラグ
- ・ 時刻差情報（及び時刻エラーフラグ）

ファイル ID は Exabyte テープの各データファイルのファイル番号に相当する¹⁴⁾。観測データには各ステーションでの長周期地震計の三成分 (LPX, LPY, LPZ)、短周期地震計の垂直成分 (SPZ) のデータに加え、長周期地震計に用いられたフィードバック回路の出力を記録した各 3 成分のデータ (tidal_X, tidal_Y, tidal_Z) と地震計に取り付けた温度計出力のデータを別個に格納した。時刻情報は Exabyte データの各データフレームに書かれたタイムスタンプの値を取り出している。Exabyte フォーマットでは 1 フレームが 640bits より構成され、1060bps の速度でサンプリングされているため、1 フレームの時間長は 603.77ms となる。また、PSE データの各物理レコードは 90 フレームより構成され、0-89 までの値が付けられている。フレームカウントはその値を読み出したものであり、フレームカウントの値によって、各フレームに格納されるデータの種別は異なっている。

一方、エラーフラグと時刻差情報はオリジナルに作成したリストである。エラーフラグは Exabyte フォーマットデータのヘッダー情報¹⁴⁾で、本来あるべき値と異なる値が入っているときにフラグを立てるようにしている。これは、エラーフラグの立つレコードが正しい物理情報を記録していない可能性があるからである。また、時刻差情報は、本来フレーム間の時刻が 603.77ms であるのが正常であるが、フレーム間によってはその値を大きく超える時間差をもったものがある。ここでは、フレーム間の時刻差がある時間差以上であればフラグを立てるようにした。この時刻差エラーの発生率は観測ステーションや観測時間により異なるが、PSE データでは全フレーム中の 0.1% 程度のフレームにフラグが立っている。

これらのエラーフラグ情報は現在アーカイブされているデータから、信頼できない情報を除去する、あるいは月面で観測された正確なサンプリング、正確な物理値にデータ値を補正する際に有用となる。本研究のデータベースに格納したデータではこのデータ除去とデータ補正の処理は行っていないが、将来的に実施する際、このエラー情報が参照できる。

本研究では、PSE と同様の構成で LSPE (Passive Listening Mode) と LSG のテーブルも作成した。能動観測のデータは一イベント当り数十秒程度の長さであるので、特にデータベース内に格納してはいないが、公開システム上から SEG-Y フォーマットデータと CSV データ（アスキーデータ）の両方でダウンロードできるようにしている。

データベース内の観測データは、全て CSV データとしてダウンロードできるため、ユーザーはデータベースより検索して取得したデータをデコードする事なく、もしくは必要なフォーマットに変換して、解析に使用する事が可能である。

3-3-2. 月地震イベントテーブル

Apollo-PSE の長周期地震計 (LP) で検出された月の地震イベントは¹⁷⁾により識別、分類、カタログ化されて以降、新しい地震イベントが加えられるにつれ更新されてきた。本研究では、最も新しい月地震イベントカタログ¹⁸⁾の情報を基にデータベースの表を作成した。月地震イベントテーブルは以下の各列より構成されている。

- ・ イベント番号

- ・ イベント発生時刻
- ・ イベント種別
- ・ イベント震源位置
(既知のイベントのみ)
- ・ 深発月震震源番号

イベント番号は18)によって識別されたイベント全てに割り当てられ、約13060個存在する。イベント種別は、大きく深発月震、浅発月震、隕石衝突、短周期イベント(熱月震) e.g., 3)に分けられる。その中で震源位置(緯度、経度、深さ)が研究者によって決定されているものはその情報を論文から引用して格納している e.g., 19)。特に深発月震は地球-月-太陽の位置関係(潮汐力)に依存して同一震源位置で繰り返し発生する事が知られている e.g., 3)。この深発月震の震源位置はそれぞれ震源番号が割り当てられ、A1~A451まで分類されている 20)。このテーブルには深発月震で震源位置が識別されているものは、その震源番号も組み込んでいる。

このように、月地震イベントのテーブルとPSEテーブルを一つのデータベース内に入れる事により、例えばある震源で起こったと識別される地震イベントをその発生時刻を参照してPSEテーブルから検索を行えば、一括して一つの震源イベントのデータを取得する事も可能となる(例えば、アポロの観測でもっとも活発であったA1震源では7年半の観測で約440個の地震イベントの発生が識別された)。

3-4. アプリケーション開発

本研究で開発したデータベースにインターネットブラウザを通してアクセスできるようデータベース公開アプリケーションの開発も行った。開発したアプリケーションでは、誰でもデータベースの機能を利用できるよう、SQLのようなコマンドライン方式での操作ではなく、視覚的にデータの検索、取得ができるようにしている。

図4に開発したアプリケーションの表示画面例を示す。このアプリケーションはFlashとPHPを用いて作成した。ユーザーは表示画面上の操作でデータベースに格納された地震データの波形、数値の閲覧、取得が可能である。図4において、①でデータ表示、取得期間の開始時刻の指定、②で波形表示するデータの観測ステーション、センサー、観測成分の選択ができる。③の画面では①で指定した開始時刻から②で指定したセンサーとその観測成分のデータを波形として見る事ができる。④では最低1時間から最大1日のデータを閲覧できるようにしている。もし、③の表示画面に月地震イベントテーブルに含まれるイベントが表示される場合、テーブルに格納されている情報(発生時刻、震源位置、イベントタイプ、深発月震震源番号)が⑤の位置に表示される。

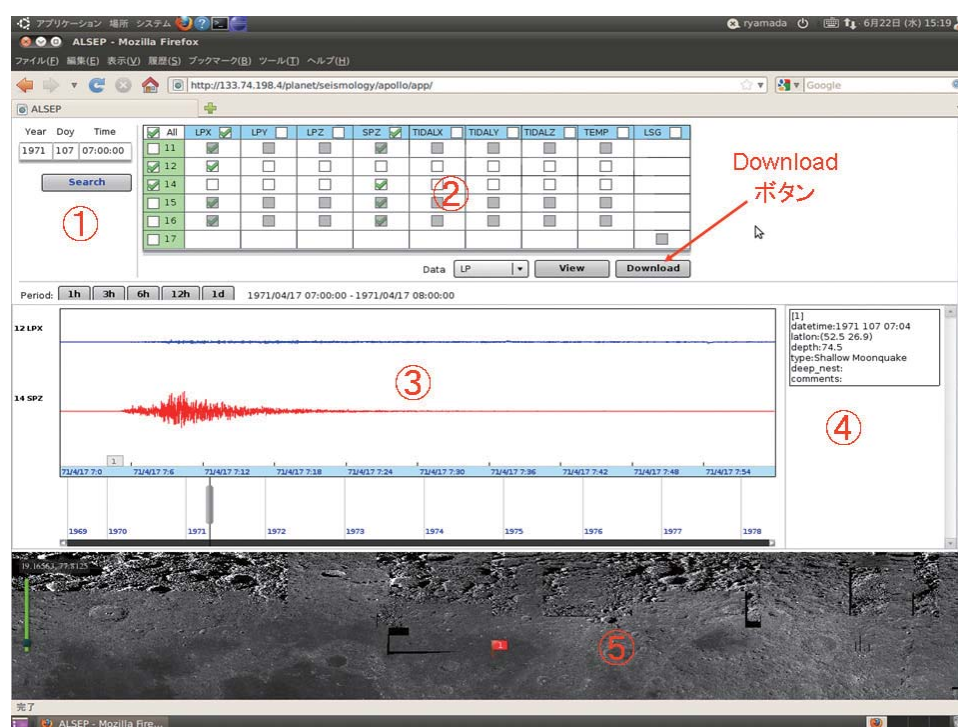


図4. データベース公開アプリケーション表示画面例

また、⑤には日本の月探査衛星「かぐや」の地形カメラで取得した月面画像を表示しており、④で表示した月地震イベントの震央位置が月面地図上にプロットされるようになっている。

このように、ユーザーは実際自分が取得したいデータを閲覧しながらダウンロードする事が可能である。データは最大で1時間分、全てのサイトのデータを一度に取得することができる。

これまでの Exabyte ファイルでは一ファイルで約1日分のデータを格納しており、特定の観測ステーション、指定の時刻や指定イベント、希望する観測成分のデータを取り出すのに、ファイルの探索とデコード処理を行う必要があった。本研究で開発したデータベースとアプリケーションを使用する事により、ユーザーはより容易に希望するデータの閲覧と取得が可能となった。

4. 議論

4-1. 絶対時刻参照について

3-3, 3-4 で記載したよう、本データベースでは絶対時刻を参照して、データの検索と取り出しができるようになっており、この絶対時刻は地球でデータを受信した通信局での標準時刻に基づいて JSC でつけられたものである。この時刻付けの際、データを受信する通信局が切り替わるときに、二つの通信局で同時にデータが受信されるために、一部ではあるが JSC で同じ時刻を持ったデータが二重に記録される事が起こり得る。このような時間帯を含むデータを時刻指定でデータベースから取り出す際、二重にデータが取り出されることになる。

また、JSC での時刻付け時のエラーにより正確な時刻が記録されていない箇所も存在する。このようなデータは、時刻指定で取り出した場合、取得データの中から抜け落ちる可能性もあるので注意を要する。

一方で、これらの時刻付けで問題が起きている箇所は PSE テーブル中に作成した時刻エラーフラグより抽出する事が可能である。今後、この時刻エラーフラグを参照して、データベース中のデータの時刻補正を行っていく予定である。

4-2. データベース格納データについて

本研究ではデータベースを構築する際、検索速度の向上と容量圧縮のため、Exabyte ファイルに含まれる全ての情報をデータベース内に格納しなかった。例えば、各フレームで記録されている HK データやエンジニアリングデータ、または、ヘッダーの情報を参照したい場合は、公開している Exabyte ファイルデータを直接デコードして情報を取得する必要がある。この際、公開システム上で公開しているフォーマット情報が参照できる。

また、我々は Exabyte ファイルをデコードしなくても、ファイルの内容が見られるインターフェースも開発した。このインターフェースでは1フレームごとに収納されているデータ値や、ヘッダー情報を見ることができ、データベースからダウンロードしたデータの確認やデコード前のクイックルックとして利用できる。このインターフェースも公開システム上からアクセス可能にしている。

4-3. データフォーマットについて

本公開システムではデコード前の Exabyte ファイル、SEG-Y ファイルとデータベースに格納したデコード後のアスキーデータ (CSV ファイル) を公開している。データベース内に格納しているデータは SAC や SEED、及び WIN フォーマットといった海外、及び国内の地震学者の間で標準的に使われるフォーマットに変換してはいるが、ユーザーは必要に応じて、取り出したアスキーデータを使用したいデータフォーマットに変換する事は可能である。今後、この公開システム中においても、SAC や SEED、WIN 等に変換した Apollo 月地震データをアーカイブする事も検討している。

5. まとめ

これまで NASA の Apollo ミッションで得られた月地震データについては、要求するデータを取り出し、解析に使用するまで、一般のユーザーには敷居の高さを伴っていた。そこで、本研究では、Apollo の月地震データを、ユーザーがより容易に取得し、解析に用いることができるようにするため、月地震データのアーカイブ、解析に必要な情報の収集と整備、データベース、公開アプリケーションの開発を行い、新しい月地震データ公開システムを構築した。

この開発過程において、まず我々は ISAS、UT 及び NASA で保管されていたデータから LSPE と LSG の一部区間を除く Apollo 月地震データの全セットの収集を行った。また、これまで分散していたデータフォーマット情報、観測ステータス、地震計、記録系の特性情報を収集し、公開システム上の Web ページ、及びドキュメント中に整理した。

次に、アーカイブした Apollo の能動地震観測データを全デコードしてリレーショナル型データベースを構築した。このデータベースは PSE の全データを格納したテーブルに加え、High-Bit-Rate 及び Normal-Bit-Rate の Work Tape ファイルに記録されていた LSPE (Passive-Listening-Mode) と LSG のデータ、更に月地震イベントの情報をまとめたテーブルも加えた。これらのテーブルは相互参照することが可能であり、要求する時間、イベントタイプ、震源位置の観測データを検索して取り出す事が可能である。格納されたデータは今後、時刻補正などの処理を行う必要はあるが、少なくとも現状でこれまでと同等以上の確かさでデータを扱う事は可能である。

このデータベースにアクセスするためのアプリケーションも公開システム上に設置した。このアプリケーションでは、視覚的にデータベースの機能を利用でき、指定した時間、観測点、地震計成分のデータを画面上で閲覧しながら、データをダウンロードすることができる。また、このアプリケーション上では閲覧したデータ上に含まれる月地震イベントの情報も合わせて見ることができる。以上の開発により、ユーザーは取得したいアポロ月地震データを、インターネットブラウザを通して必要な分だけ閲覧、取得し、解析に用いる事が可能となった。

本研究での開発成果を通して、月地震データの新しいアーカイブ、解析拠点を構築する基盤を作成することができた。この拠点を通して、より多くのユーザーが月地震データを解析に用いることができるようになり、新しい科学的成果を見出すことによって、月の地震学や地球物理学の更なる発展が期待される。また、今回開発した月地震データ公開システムは、将来日本での実施が検討されている SELENE-2 やベネトレタミッションで得られる月地震観測データをアーカイブ、公開するうえでのモデルと成ることも期待される。

謝辞

本データベースを開発するに辺り、能動観測データ及びその観測情報を提供していただいた Matthew Brzostowski 博士、及び、論文執筆に際し、有用なコメントをいただいた Cliff Frohlich 博士に謝意を表したい。また、データのデコードやメタデータ収集に際し、多くの助言や情報を頂いた宇宙科学研究所、固体惑星グループの研究者の方々にも併せて感謝したい。

参考文献

- 1) N. Toksöz, A. Dainty, C. Solomon, K. Anderson, "Structure of the Moon," Reviews of Geophysics and Space Physics, 12, 1974, pp.539-565.
- 2) G. Latham, M. Ewing, J. Dorman, "Lunar structure and dynamics results from the Apollo passive seismic experiment," The Moon, 7, 1973, pp.396-420.
- 3) Y. Nakamura, G. Latham, J. Dorman, "Apollo lunar seismic experiment -final summary," Journal of Geophysical Research, 87, supplement, 1982, pp.A117-A123.
- 4) P. Lognonné, J. Gagnepain-Beyneix, H. Chenet, "A new seismic model of the moon: Implication for structure, thermal evolution and formation of the moon," Earth and Planetary Science Letters, 211, 2003, pp.27-44.
- 5) M. Cooper, R. Kovach, "Lunar near surface structure," Reviews of Geophysics and Space Physics, 12, 1974, pp.291-308.
- 6) R. Kovach, J. Watkins, P. Talwani, "Lunar Seismic Profiling Experiment," Apollo 17 Preliminary Science Report, NASA SP-330, 1973, pp.10-1 - 10-12.
- 7) A. Khan, K. Mosegaard, "An inquiry into the lunar interior : A nonlinear inversion of the Apollo lunar seismic data," Journal of Geophysical Research, 107, E6, 2002.
- 8) J. Giganti, J. Larson, J. Richard, J. Weber, "Lunar Surface Gravimeter Experiment," Apollo 17 Preliminary Science Report, NASA SP-330, 1973, pp.12-1 - 12-4.
- 9) J. Giganti, J. Larson, J. Richard, R. Tobins, J. Weber, "Lunar Surface Gravimeter Experiment final report," Contract NASA 9-5886, 1977, pp.1-21.
- 10) T. Kawamura, N. Kobayashi, S. Tanaka, P. Lognonné, J. Gagnepain-Beyneix, "Search for far-side deep moonquakes: Source determination of un-located deep moonquakes with Apollo 17 lunar surface gravimeter," abstract of 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010, #1766.
- 11) R. Weber, P. Lin, E. Garnero, Q. Williams, P. Lognonné, "Seismic detection of the lunar core," Science, 311, 2011, pp.309-312.

- 12) J. Bates, W. Lauderdale, H. Kernaghan, "ALSEP Termination Report," NASA Reference Publication, 1036, 1979.
- 13) Lockheed Electronics Company, Inc, "Apollo lunar surface experiment package archive tape description document," Contract NAS 9-12200, JSC-09652.
- 14) Y. Nakamura, "Catalog of lunar seismic data from Apollo passive seismic experiment on 8-mm video cassette (Exabyte) tapes," UTIG Technical Report No.118, 1992.
- 15) M. Brzostowski, A. Brzostowski, "Archiving the Apollo active seismic data," The Leading Edge, 28, 2009, pp.414-416.
- 16) S. Nagihara, Y. Nakamura, L. R. Lewis, D. R. Williams, P. T. Taylor, E. J. Grayzeck, P. Chi, G. K. Schmidt, "Search and recovery efforts for the ALSEP data tapes," abstract of 42nd Lunar and Planetary Science Conference, 2011, #1103.
- 17) Y. Nakamura, G. Latham, J. Dorman, J. Harris, "Passive seismic experiment long-period event catalog," Galveston Geophysics Laboratory Contribution No.491, 1981.
- 18) Y. Nakamura, G. Latham, J. Dorman, J. Harris, "Passive seismic experiment long-period event catalog," Galveston Geophysics Laboratory Contribution No.491, rev. ed., 2008.
- 19) J. Gagnepain-Beyneix, P. Lognonné, H. Chenet, D. Lombardi, T. Sphon, "A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy," Physics of the Earth and Planetary Interiors, 159, 2006, pp.140-166.
- 20) Y. Nakamura, "Farside deep moonquake and deep interior of the Moon," Journal of Geophysical Research, 110, E1001, 2005, pp.1-12.