

アポロ計画で得られた“月震”波形の基礎的な分析

仲野 健一 ^{*1}

地球と同様に月においても震動現象が発生する。これを月震と言う。NASA アポロ計画で得られた月震波形には長い継続時間と強い散乱等の性質が知られているが、地震工学的な観点で構造物の耐震性等への影響は未だ十分検討されていない。本報告においては、まず月震波形データの取得・波形処理手順を整理し、経時的な周波数特性の推定などを通じて震動特性を分析した。その結果、浅発月震では多くのイベントで概ね 3-6Hz の周波数帯域にエネルギーが集中していること、月震の最大速度 PGV の距離減衰特性は地震に対する既往の距離減衰式と矛盾していないことがわかった。また、それらの知見に基づいて月面開発における構造物等への月震の影響について考察した。

キーワード：月震、加速度波形、波形処理、周波数分析、経時特性

1. はじめに

月は地球に住む我々にとって最も身近な天体である。ラスコーを含む欧州旧石器時代の壁画では、動物図像に付された点・線等が太陰暦に対応し、繁殖・出産期など季節現象を月単位で記録した可能性が指摘されている¹⁾。当該研究には方法論や統計処理に反論もあるが^{例えば2)}、古くから月が我々の営みのあらゆる場面で関心を集める対象であったことは間違いない。

科学史における歴史的プロジェクトの1つとして、月に人類が初めて降り立った NASA (National Aeronautics and Space Administration) によるアポロ計画がある^{例えば3)}。近年、月面における水や堅穴(および地下空洞)の発見^{4),5)}、民間企業の宇宙産業への参入活発化^{例えば6)}等により、人類は再び月を目指し月面開発を本格的に進める時代が到来している。安藤ハザマにおいては「ルナ・ジオフロント構想」を掲げて 2040 年代に月地下居住空間の実現を目指している⁷⁾。

アポロ計画においては5か所にパッシブな月震観測拠点が設置され、3地点では1977年まで観測が継続された⁸⁾。その結果、月においても地球と同様に高頻度に震動現象が存在することが確認された⁸⁾。これを一般に月震(Moonquakes)と呼ぶ。月震が発生するということは、月面開発において、月震による影響を少なからず受けるということを意味している。したがって、月震の影響がどの程度存在し得るのか把握することは極めて重要である。

本稿においては、月震波形データを収集し、その基本的な性質を分析する。その後、地震の振幅レベルを推定

する地震動予測モデル GMM (距離減衰式) と月震波形データを比較する。そして、月面での人間活動を見据えて、構造物への月震の影響について地震工学的観点から考察する。

2. 月震波形データの取得と波形処理方法

2.1 検討対象とする波形データ

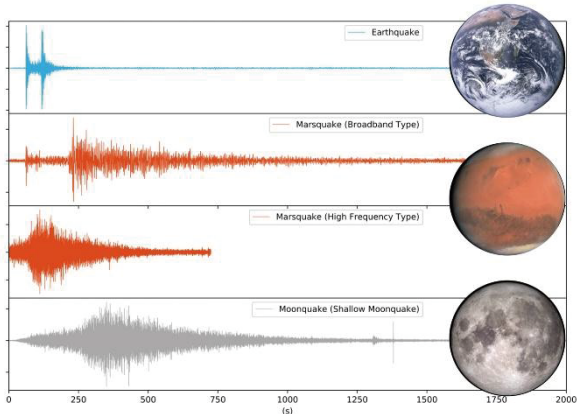
アポロ計画において取得された月震波形データ^{9),10)}は IRIS/DMC (Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center) において公開されている。近年、Nunn et al.¹¹⁾によりアポロ計画で得られた波形データ^{9),10)}の見直しが行われ、イベント時刻などのエラーが修正された高品質のデータセットが公開された。本稿では彼らのデータセットを参照する。

図-1に地球、火星、月で観測された震動波形の比較¹²⁾を示す。一般に震動波形は震源の規模や観測点固有の特性に左右されるはずであるが、相対的に月震波形は極めて長い継続時間を有していることがわかる。

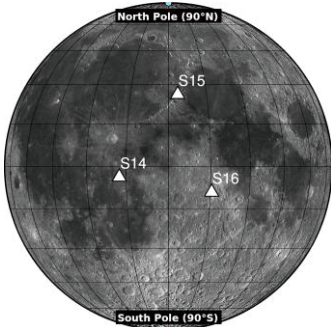
図-2に月震観測拠点(S14, S15, S16)位置を示す。S14, S15, S16はそれぞれアポロ宇宙船の着陸位置から離れていない地点に設置されている¹³⁾。月面写真は USGS の公開データ^{14),15)}を利用し、地球を向いている月の表側が見えるように月面座標における緯度、経度が0の位置を中心となるようにした。図の最上部が北極点、最下部が南極点に対応する。表-1には各観測点の緯度経度情報を示す¹⁶⁾。

本稿では、紙面の都合から、Onodera¹⁷⁾が Nunn et

*1 建築研究部



図－１ 地球、火星、月で観測された震動波形の比較¹²⁾



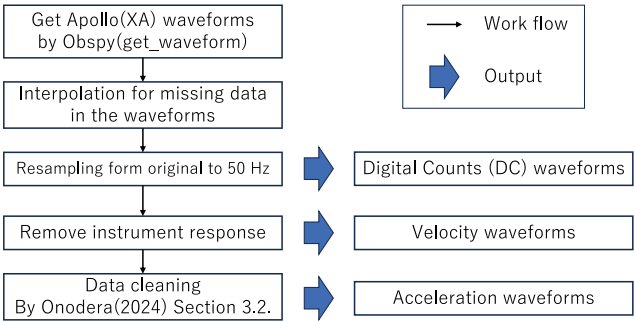
図－２ 月震観測拠点位置

表－１ 観測拠点位置情報

Station for Passive Seismic Experiment	Lat. (N)	Lon. (E)
S14 (Set by Apollo 14)	-3.64408	342.52233
S15 (Set by Apollo 15)	26.13174	3.63803
S16 (Set by Apollo 16)	-8.9759	15.4986

al.¹⁰⁾ のデータセットを元に新たに評価した浅発月震カタログ (Table A1) のうち, S15 地点で得られた月震波形を対象にする. S15 においては長周期域を対象とした計測機器 (LP) と短周期域を対象とした計測機器 (SP) が設置されたが, ここでは短周期域を対象とする SP を採用する. また, 同センサは上下動成分のみが観測されている (以下, SPZ と呼ぶ). SPZ は約 1.5Hz ～ 10Hz 程度までの範囲で感度が高く, 地震計応答特性として概ねフラットな特性を有している.

表－２に本検討で用いた月震イベントリストを示す. 同表にはイベント名称 (Event name), 波形切り出し時刻 (Start time; UTC), 各イベントの震源距離 km (HypoDis_min は推定下限値, HypoDis_ave は平均値, HypoDis_max は推定上限値), 地震モーメント M_0 , 応力降下量 $\Delta\sigma$ を示す¹⁷⁾. モーメントマグニチュード M_w については, Onodera¹⁷⁾ では短周期域の振幅値に基づく実体波マグニチュード M_b が推定されているため, Scordilis¹⁸⁾ の経験式により M_b からモーメントマグニチュード M_w に変換したものを使用する. なお, 検討対象の月震波形については, 目視で極めて強いノイズの影響が疑われる波形を除いている (その結果 28 波形を検討に用いる). また, 表－２には検討に用いた 28 波形について後述の手順で求めた加速度波形の最大振幅値



図－３ 月震波形データ取得および波形処理手順

PGA (m/s^2) と最大速度値 (m/s) を併記している. ただし, ここでの最大振幅値は後述の図－４に示す 30 分間の波形データの最大値を参照した.

２．２ 波形分析のためのデータ処理

図－３に, 月震波形データ取得および波形処理手順を示す. 図中の細い矢印は処理のフローを, 太い矢印は出力される波形種類を示している. まず, 月震波形データの取得は ObsPy^{19), 20)} によって, IRIS/DMC¹⁰⁾ から stream 形式で取得する. その後, 欠落データが -1 となっているのでそれを 0 に置換してからデータ補間を行う (ここでは線形補間). そしてオリジナルのサンプリング周波数を扱いやすいように 50Hz にリサンプリングし, 後述のウェーブレット変換による経時的な周波数分析に使用するため Digital Counts (DC; AD 変換後かつ物理値変換前の計測データ) として出力する. 続いて, より詳細な検討に供するため地震計応答特性の除去を行い物理単位に変換する. SPZ は速度計であるから地震計応答特性を除去した波形は速度波形 (m/s) となる. そして, 1 階微分により加速度波形 (m/s^2) を求めるが加速度波形は地震計特性の補正の影響を強く受けるため, ノイズ処理を施す必要がある. ここでは Onodera¹⁷⁾ にならってノイズ処理を行う. この方法は, まず時刻 t における当該波形 $S_{sp}(t)$ の絶対値 $|S_{sp}(t)|$ とその標準偏差 $S_{ems}(t)$ を求め, 次にタイムウィンドウ 20 秒間の指数関数の重み付け移動平均 $S_{ema}(t)$ ²¹⁾ を求める. そして, 標準偏差 $S_{ems}(t)$ と閾値 N_{ths} ($N_{ths} = 5$ とする) の積に比べて, $|S_{sp}(t)|$ と重み付け移動平均 $S_{ema}(t)$ ²¹⁾ の差の絶対値が大きい場合に当該時刻の振幅値はノイズと判定し, その場合には重み付け移動平均 $S_{ema}(t)$ ²¹⁾ に置き換える¹⁷⁾. この操作は 3 回繰り返せば適切な波形が得られるとされている. ただし, Onodera¹⁷⁾ では Digital Counts (DC) の段階でノイズ処理を行っており, どの段階で適用するかは目的によって使い分ける必要がある. ここでは元波形を目視で確認するので, ノイズ処理は加速度波形のみに

表－２ 月震イベントカタログ¹⁷⁾ と月震波形の最大加速度 PGA 及び最大速度 PGV

Event name	Start time (UTC)	Referenced to Onodera(2024)						Mw	Acc (m/s ²)	Vel (m/s)
		HypoDis min(km)	HypoDis ave(km)	HypoDis max(km)	M0 (N.m)	Δσ (Mpa)	Mb			
KO-SMQ-1_S15	1971-11-30T01:07:57	1333	1545	1757	2.1E+15	36.6	5.5	5.7	4.954E-05	1.565E-07
KO-SMQ-2_S15	1972-01-05T22:42:33	1333	1545	1757	7E+13	9.8	4.7	5.0	1.561E-05	3.982E-08
KO-SMQ-3_S15	1972-06-02T16:49:07	1515	1727	1939	8.5E+14	20	5.3	5.5	2.853E-05	7.563E-08
KO-SMQ-5_S15	1972-06-24T12:27:49	2243	2591	2939	1.4E+15	13	5.3	5.5	6.550E-05	6.506E-08
KO-SMQ-8_S15	1973-05-09T11:02:13	1939	2227	2515	2.6E+14	6.2	4.8	5.1	7.805E-06	1.164E-08
KO-SMQ-9_S15	1973-06-17T12:59:43	788	909	1030	2.2E+14	6.2	4.8	5.1	1.746E-05	5.687E-08
KO-SMQ-11_S15	1973-08-24T04:07:35	697	818	939	1.7E+14	8.2	4.8	5.1	7.993E-05	2.586E-07
KO-SMQ-12_S15	1973-09-14T04:31:37	545	651	757	1.9E+14	3.4	4.7	5.0	1.271E-05	3.262E-08
KO-SMQ-16_S15	1973-12-12T08:39:31	2545	2969	3393	5.9E+14	28.3	5.3	5.5	1.452E-05	2.811E-08
KO-SMQ-17_S15	1973-12-26T07:37:04	969	1136	1303	1.5E+14	2	4.5	4.9	8.058E-05	2.898E-07
KO-SMQ-19_S15	1974-06-21T19:17:30	818	954	1090	1.4E+14	2.5	4.6	4.9	8.570E-06	2.056E-08
KO-SMQ-21_S15	1974-08-30T10:47:49	909	1061	1213	1.5E+14	4.4	4.7	5.0	1.250E-05	2.894E-08
KO-SMQ-23_S15	1974-12-04T03:43:17	1455	1667	1879	4.6E+14	4.1	4.9	5.2	2.242E-05	6.763E-08
KO-SMQ-24_S15	1975-01-29T09:57:38	1878	2151	2424	4E+14	5.1	4.9	5.2	1.755E-05	3.585E-08
KO-SMQ-25_S15	1975-03-19T03:05:53	1273	1470	1667	1.1E+15	13	5.2	5.5	1.037E-05	3.534E-08
KO-SMQ-26_S15	1975-03-23T21:10:13	1637	1879	2121	8.3E+14	14.5	5.2	5.5	1.432E-05	3.316E-08
KO-SMQ-28_S15	1975-10-31T04:03:28	2515	2954	3393	5.9E+14	7.6	5	5.3	1.076E-05	2.860E-08
KO-SMQ-29_S15	1975-11-21T16:10:49	1606	1833	2060	4.2E+14	7.4	5	5.3	1.434E-05	2.895E-08
KO-SMQ-30_S15	1976-01-02T12:28:19	1000	1167	1334	4.2E+14	20.2	5.1	5.4	2.489E-05	5.731E-08
KO-SMQ-31_S15	1976-01-18T13:20:35	1030	1197	1364	2.1E+14	3.7	4.7	5.0	1.322E-05	3.983E-08
KO-SMQ-32_S15	1976-02-13T20:44:14	788	909	1030	3.4E+14	5.9	4.9	5.2	2.492E-04	6.332E-07
KO-SMQ-35_S15	1976-06-23T19:26:18	1090	1257	1424	2.1E+14	6.2	4.8	5.1	1.060E-05	2.132E-08
KO-SMQ-36_S15	1976-07-24T17:24:10	1242	1439	1636	4.3E+14	3.9	4.8	5.1	8.017E-06	1.554E-08
KO-SMQ-37_S15	1976-08-07T00:18:59	1060	1227	1394	1.7E+14	2.9	4.6	4.9	1.425E-05	1.953E-08
KO-SMQ-38_S15	1976-08-07T15:19:07	1848	2121	2394	2.8E+14	4.9	4.8	5.1	2.298E-05	5.526E-08
KO-SMQ-43_S15	1977-06-18T15:37:25	909	1045	1181	2E+14	6.2	4.8	5.1	1.265E-05	2.333E-08
KO-SMQ-44_S15	1977-06-28T02:13:40	1151	1333	1515	1.9E+14	3.4	4.7	5.0	9.221E-06	2.904E-08
KO-SMQ-45_S15	1977-07-02T02:01:29	1606	1848	2090	6.5E+14	11.4	5.1	5.4	1.571E-05	7.566E-08

適用した。

3. 月震波形の経時的周波数分析

本章では前章で取得した月震波形データについて基礎的な分析を実施し、その性質を確認する。ここでは、月震波形の形状の確認とともに経時的な周波数分析を行う。経時的な周波数分析にはウェーブレット変換を用いる。

図－４に、表－２に示す月震イベント群の月震波形とウェーブレット変換波形による経時的な周波数分析結果を示す。本稿ではOnodera¹⁷⁾の切り出し開始時刻から30分間の波形データを用いた。各図上段パネルは月震波形であり、振幅値は規準化しているが同図中に最大値を併記している。下段パネルにはウェーブレット変換波形を示しており、横軸は切り出した波形の開始時刻を0とした際の経過時間s、縦軸は周波数Hz、カラーコンターはウェーブレット変換で得られた振幅値を最大値で規準化

したものである。したがって、カラーコンターが暖色になるほど振幅値が大きく、寒色になるほど振幅値が小さい。なお、ウェーブレット変換前には1-10Hzで4次バターワースフィルタを施している（0位相処理を併用）。各図をみれば、イベントによらず概ね3-6Hzに振幅値が大きい領域があり、その領域の出現する時間帯は上段の波形の振幅値が大きい時間帯と整合している。同様の結果は先行研究でも得られている¹⁷⁾。一方、図－4(3)のKO-SMQ-32_S15のように継続時間の短い月震波形もあり、その場合は10Hz以上の高周波数成分の寄与も大きい。これらのことから、例えば月面で仮設構造物や精密機器などを設置・固定する場合、これらの周波数帯域に共振周波数が存在しないような配慮が必要であると考えられる。また免震ゴムのように繰り返し振動による影響が懸念される材料にも注意が必要である。ただし、表－２に示した月震イベントに限った分析であること、計測装置の検出限界も存在することから、この周波数帯域だけ注

意すればよいということではない点に留意されたい。

月で発生する震動現象のうち、2Hz 程度以上の短周期域に注目した計測機器 (SP) で捉えられる月震は、Type-0 ～ Type-8 までの 9 種類に分類される¹⁷⁾。Type-0 は自然現象以外の要因で生じた信号、Type-1 ～ Type-4 は月面探査等で月面に放棄された月面探査機や切り離されたロケットブースターの一部など人工物 (Lunar Module ; LM) の温度変化によって生じる月震、Type-5 は月表面の温度変化 (月には大気がないため太陽光があたり約 100 度を超え、夜間には冷やされてマイナス 100 度程度に達する) に起因する月震、Type-6 は隕石衝突に由来する月震、Type-7 は浅発月震、Type-8 は分類が困難な信号である。また、Type-1 ～ Type-4 はさらに細かく分類できる。Type-1 と Type-3 は熱膨張と熱収縮の両者もしくは片方によるもの (区別できないもの)、Type-2 は熱収縮によるもの、Type-4 は熱膨張によるものとされている¹⁷⁾。なお、数 Hz 以下の低振動数域 (長周期域) を対象にした計測機器 (LP) で捉えられる月震の種類として深発月震がある。深発月震は、月と地球の位置関係に起因して生じる潮汐力の差異によって周期的に発生している^{例え 22)}。また、波形の形状が極めて似通っているケースが散見されることから、波形の形状でいくつかのグループに分けられることもわかっている^{例え 22)}。このことから、月震波形が極めて似通っている深発月震の発生場所が特定の領域で繰り返し発生していることが指摘されている^{例え 22)}。月震波形の特徴として継続時間が地震に比べて長いことがわかっている。このことは、月の地下深部 100km 程度までの上部地殻を構成するレゴリス層 (表層数 m ～数十 m 程度に堆積している粉状ではなく、10km 程度より深部にある破碎帯としてのレゴリス層) において、地球に比べて 10 倍程度散乱が強いことが原因とされている^{例え 23)}。震動現象においては、伝播距離が長いほど震動の振幅値の低減に強く影響する幾何減衰と、震動伝播に伴い媒質において媒質の震動が熱エネルギーへ変換される内部減衰、および、進行方向だけではなく他の方向へも震動が拡散する散乱減衰の 3 種類の減衰効果を考える必要がある。震動の継続時間が長くなることは散乱減衰が主要因である。このことは、震動が拡散されることで、特定の観測地点においては 1 つの方向だけではなくさまざまな方向 (伝播経路) から震動が時間差を持って到達することで結果的に震動が長時間続くためと考えられる。

地震工学の観点で図-4 の各波形を見れば、複数のイベントに基づく波動が 30 分間のウィンドウで一緒に観

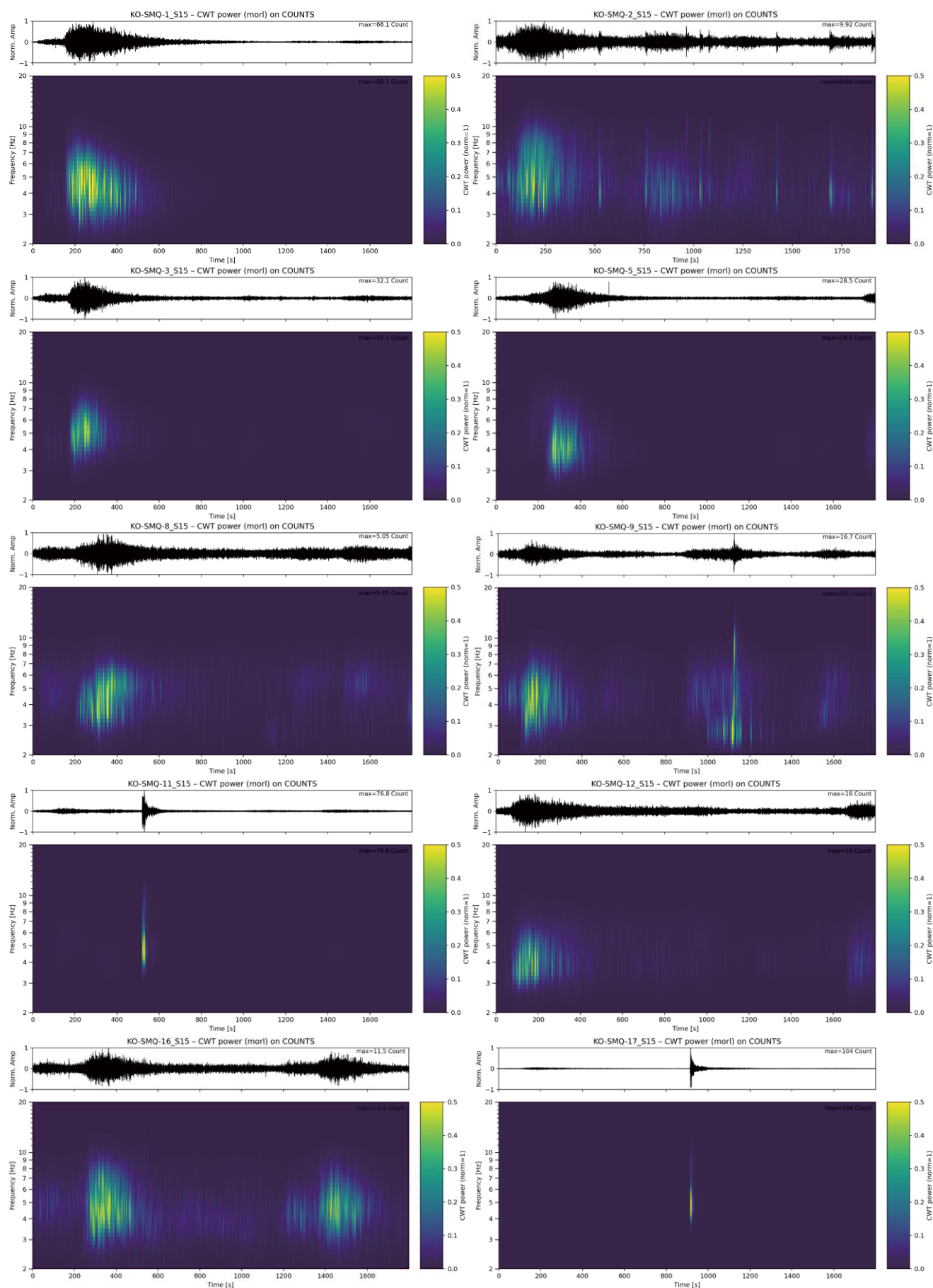
測されているように見える。Onodera¹⁷⁾に従えば、表-2 のイベントは浅発月震 (Type-7) として同じカテゴリに分類されているが、震源における破壊現象のメカニズムが各イベントで共通なのか、破壊プロセスについて地震と差異があるのか等を判断することは現時点では難しい。この点は本稿では踏み込まず今後の検討課題としたいが、S15 地点においては月震発生頻度が高い (月震波形による影響を受けやすい) ことを意味している可能性もある¹⁷⁾。

4. 地震と月震の距離減衰特性の比較

地震工学分野においては、建設地点で想定され得る地震動強さがどの程度かということがしばしば議論になる。このことは、構造設計実務において構造設計用の地震外力を設定する必要があるため、外力に対して安全な構造物を設計する上で重要である。日本においては建築基準法で設計用外力の算定手順が規定されているので、大臣認定を必要とする超高層建物や免震建物についてのみ案件ごとにサイト波策定の場面で個別に設定する必要がある。月面における構造物の建設に際してこのような枠組みを直接適用できるとは考えないが、いずれは制度化されるであろう。その時までには、最新の科学的な根拠に基づいた判断を個別に行うことになると思う。

特定の建設地点において地震動強さを推定する場合には司・翠川²⁴⁾の GMM (距離減衰式) が一般に用いられる。この GMM では地表地盤相当における最大加速度 PGA と岩盤相当における最大速度 PGV を求めることができる。また、同 GMM の作成においては断層最短距離で概ね 300km までのデータを用いている。表-2 に示したように、月震の震源距離は最大で約 3,000km と極めて長い値¹⁷⁾が見積もられているので GMM の適用限界を超えている。そのため、今回得られた月震データに対して GMM の適用性を定量的に議論することは本来避けるべきである。しかしながら、月震に関するデータが極めて限定されている現状においては、核・マントル・地殻という主な内部構造は地球と類似していることから、地震に対して作成された GMM と月震波形データの対応関係が矛盾しないのであれば、月震に対しても、観測事実に基づいて地震動強さの目安とする試みには意味があるものと考えられる。

図-5 に、司・翠川²⁴⁾の GMM による推定最大速度 PGV (m/s) と表-2 の月震データの観測最大速度 PGV (m/s) の比較を示す。同図の実線は元データの適用範囲内、点線は適用範囲外を意味する。丸印シンボルは月震データ



図－4 月震波形 (Digital Counts) とウェーブレット変換波形の比較 (1)

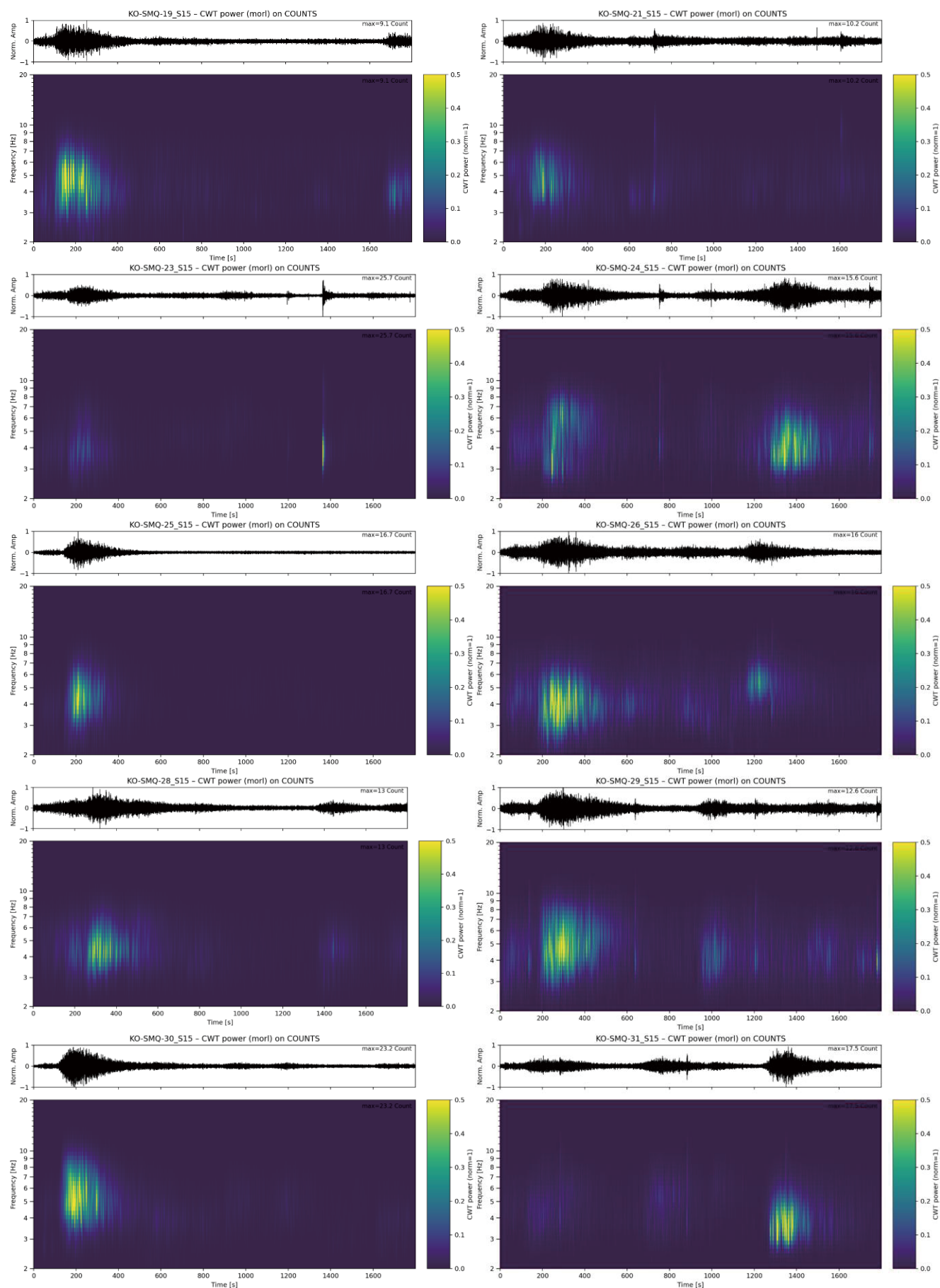
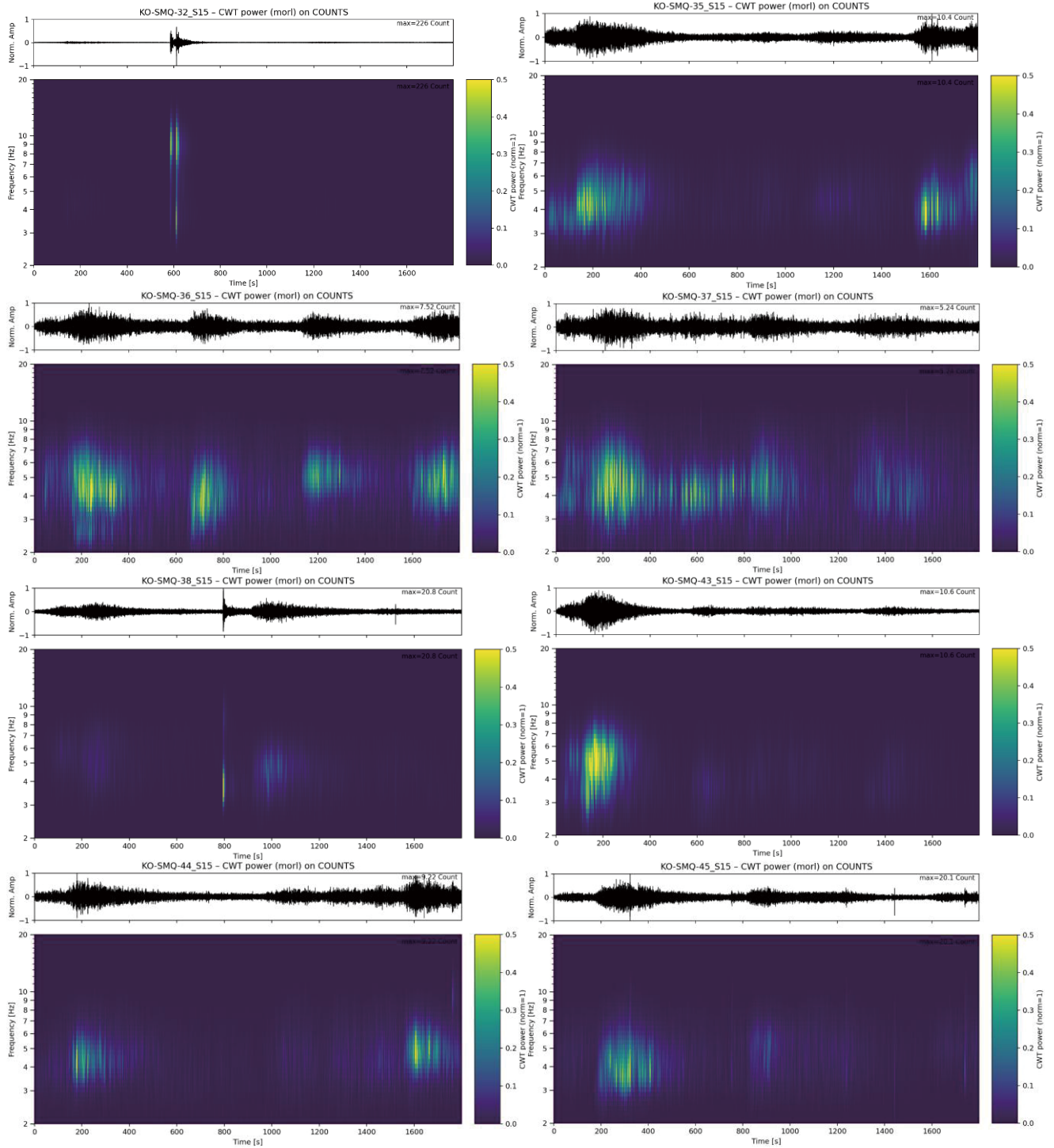
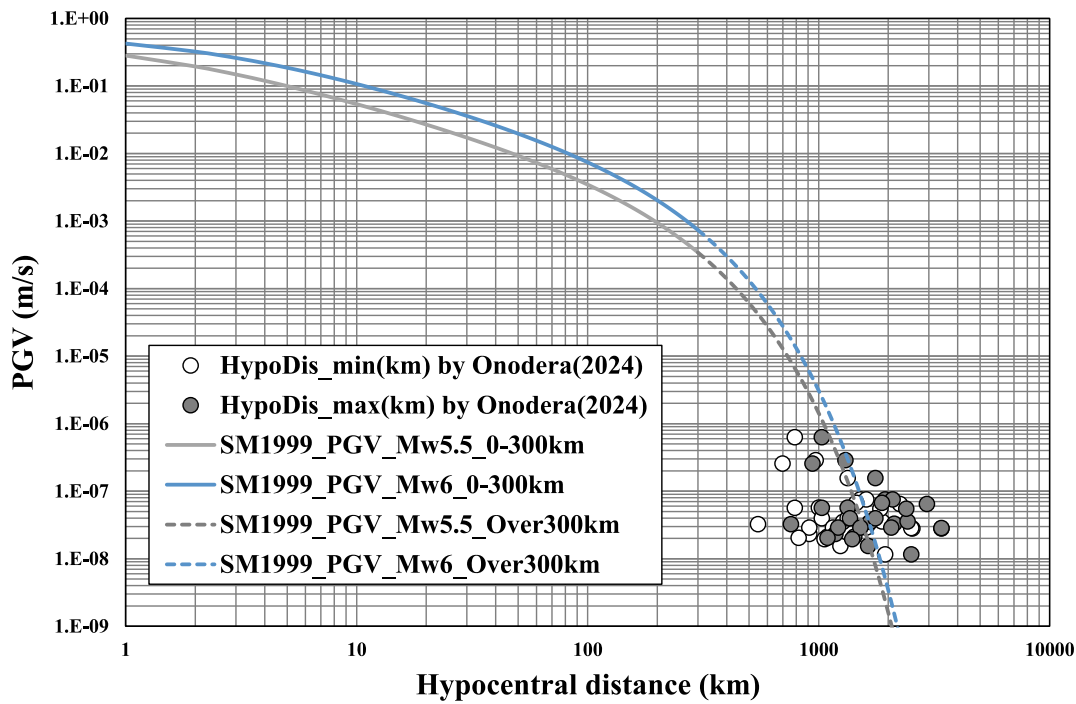


図-4 月震波形 (Digital Counts) とウェーブレット変換波形の比較 (2)



図－4 月震波形 (Digital Counts) とウェーブレット変換波形の比較 (3)



図－5 司・翠川²⁴⁾の距離減衰式と月震波形の速度振幅値の比較

表－3 本稿で整理した月震波形の特徴

月震波形の特徴	
卓越周波数	・ 3-6Hz程度にエネルギーが集中する月震イベントが多い ・ 継続時間の短い月震波形もあり, 10Hz程度の高周波数成分の寄与も無視できない
継続時間	・ S15での浅発月震イベントにおいては、数十分程度揺れが続く ・ 複数のイベントによる揺れの寄与の可能性はある
地震動強さ (PGV)	・ S15では震源距離が極めて遠いため観測記録のPGA, PGVは小さい ・ 司・翠川(1999)の距離減衰特性と月震波形のPGVは矛盾しない

の観測最大速度 PGV (m/s) であり、○は表-2 に示す Onodera¹⁷⁾ の震源距離範囲の下限値、●は上限値である。また、月震イベントは概ね Mw5-6 の範囲に収まっていることから、司・翠川²⁴⁾ の Mw は 5.5 と Mw6.0 の2種類を設定した（青色線が Mw6.0、灰色線が Mw5.5）。なお、司・翠川²⁴⁾ の GMM は水平成分であるのでその値を 0.5 倍して上下成分のそれとして扱う。図-5 の比較をみれば、観測データに明確な震源距離依存性は確認できないものの、司・翠川²⁴⁾ の GMM の点線は月震の PGV が分布する領域と重なっており、全体的には矛盾していないように見える。観測データは比較に用いた司・翠川²⁴⁾ の適用範囲外にプロットされているため、この結果を持って直ちに地震の距離減衰式の適用性が確認できたことにはならないが、地震と同様に月震の地震動強さ指標（PGA、PGV 等）を GMM によって目安として把握できる可能性があることが示唆される。

5. 議論

前章までに得られた知見を踏まえて、月面開発における構造物等への月震の影響について議論したい。なお、本稿では、浅発月震に区分される 28 波形のみに限って議論する点には留意されたい。

月震波形データに対してウェーブレット変換を適用して、経時的な周波数分析を実施した。その結果、概ね 3-6Hz の周波数帯域にエネルギーが集中していること、一部のイベントにおいては継続時間が短く 3-6Hz を含めて 10Hz 程度まで幅広い周波数帯域にエネルギーの集中が見られることがわかった。例えば鉄骨造建築物の固有周期については、さまざまな階数・種類の建物データから得られているので注意は必要だが、経験的に 0.03h（h は構造物の高さ m）で与えられるから、約 5-11m の構造物を月面に建てる場合は注意が必要である。また、卓越周波数が 10Hz を超える場合、構造物より設備機器に影響を与えることが懸念される（月面では様々な作業ロボットや装置をモニタリング技術等によって制御することが中心となると考えられることから、多くの精密機器の使用が想定される）。ただし、構造物や設備機器の振動応答を考える場合、基礎の固定状況に依存する点にも留意する必要がある。また、月では重力が 1/6 であるから自重も 1/6 となり、構造躯体としては地球に比べて細くできることが期待される。一方、構造物に作用する外力（慣性力）は、ニュートンの第 2 法則（運動方程式）に従えば、質量に対して作用するので重力の違いの影響は受けな

い。したがって、慣性力によって構造物に生じるせん断力等は構造躯体以外のブレースで負担させる等の配慮が必要になる。

月震では継続時間が長いことから、繰り返しの震動による影響が懸念される構造物や装置等には注意が必要である。例えば免震構造物に使われる免震材料は繰り返しの地震動を受けると温度上昇等に伴う剛性低下による大変形挙動が指摘されており²⁵⁾、月面での温度変化や放射線が過酷であることから新材料の開発が求められる可能性がある。今回検討対象とした月震イベントでは 30 分程度までの継続時間のものがほとんどであるが、月震イベントによっては数時間以上も揺れが続くことが報告されており、月面での散乱を考慮した数値シミュレーションによる検討もなされている²⁶⁾。

地震動強さ指標については、表-2 の今回検討対象とした月震波形データの PGA や PGV は極めて小さい。一方、図-5 では司・翠川²⁴⁾ の GMM と月震波形の PGV の対応関係から、地震に対して構築された GMM を地震動予測の目安として利用できる可能性が示された。一方、本稿で取り上げた月震の振幅値は極めて小さいため、特に問題にならないのではと疑問を呈される可能性があるが、それは早計である。まず、現在は約 3 万イベントの月震が特定されており¹⁷⁾、本稿で検討に用いた月震データはあくまで一部であるため、包括的な議論のためにはさらなる研究が必要である。次に、観測点の地盤環境や波動の散乱の違いなどがあるが、一般に GMM による地震動予測式に従えば、もし震源距離が数十 km 以内の位置で同様の規模の地震が起こった場合には、構造物等に対して深刻な影響を与える可能性がある。このことは、表出している月の断層を対象として GMM に基づく経験的なメルカリ震度階の推定を行った Watters et al.²⁷⁾ において同様の指摘がなされている。前述のように構造物以外のモニタリング技術等を支える精密機器を月面で使用する場合には、たとえ低振幅震動であっても精緻な制御を行う際には影響は無視できず、それが地震よりも長く続くと考えれば何かしらの対処が必要であろう。

上述のように月震波形の特徴を抽出し、そこから月面開発における課題や対応策を整理した。しかしながら冒頭に述べたように現時点では月震データは限られた地点でしか得られていない。地震工学のうち、特に震動現象を扱う地震動分野については、観測事実すなわち観測データの収集が極めて重要で、理論的解釈とセットとなって発展していく。内閣府 宇宙政策委員会 宇宙科学・探査小委員会²⁸⁾ においては、月面地震計（月震計）ネッ

トワークの設置が議論されている。今後、月震データの蓄積に伴い、月の内部構造が詳細に明らかになるとともに、地震工学分野においても、月面開発においてどのような影響が起こり得るのかをより詳しく評価できるようになると期待される。

6. まとめ

本稿では、以下の知見を得た。

- ・月震波形データの取得とデータ処理手順を整理した。
- ・月震波形データに対してウェーブレット変換により、経時的な周波数分析を実施した。その結果、概ね 3-6Hz の周波数帯域にエネルギーが集中していること、一部のイベントにおいては継続時間が短く 3-6Hz を含めて 10Hz 程度まで幅広い周波数帯域で大きな振幅値が見られることがわかった。
- ・司・翠川²⁴⁾の GMM と月震波形データの PGV を比較したところ、GMM の距離減衰特性と矛盾していない結果が得られた。観測点の地盤環境や波動の散乱の違いなどがあるので月震の GMM として直接活用することはできないが、GMM に従えば、もし震源距離が数十 km の位置で同様の規模の地震が起こった場合には、構造物に対して深刻な影響を与える可能性がある。
- ・月震波形データの分析で得られた特徴を抽出し、月面開発における課題や対応策について議論した。その結果、前述の特徴に加えて、月震は継続時間が長いことから月面で使用する構造物や各種機器の振動特性によっては大きな影響が想定される。

以上のことは、あくまで S15 で得られる浅発月震の 28 の月震波形から得られた考察である。本稿では月震波形データの一部を用いた検討であったので、今後他の観測データについても丁寧な分析を継続していく予定である。

謝辞

本稿の一部の作図にあたっては GMT²⁹⁾ を利用しました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Bacon, B., Khatiri A., Palmer J., Freeth T., Pettitt P., Kentridge R.: An upper palaeolithic proto-writing system and phenological calendar, *Cambridge Archaeological Journal*, Vol.33, No.3, pp.371-389, 2023, DOI:10.1017/S0959774322000415
- 2) Nowell, A., Bahn P., Le Quellec J-L.: Evaluating the evidence for Lunar calendars in upper palaeolithic parietal art. *Cambridge Archaeological Journal*, Vol.35, No.1, pp.38-55, 2025, DOI:10.1017/S0959774324000155
- 3) Jolliff, B., and Robinson, M.: The scientific legacy of the Apollo program, *PHYSICS TODAY*, Vol.72, No.7, pp.44-50, 2019, DOI:10.1063/PT.3.4249
- 4) Pieters, C., Goswami, J., Clark, R., Annadurai, M., Boardman, J., Buratti, B., Combe, J., Dyar, M., Green, R., Head, J., Hibbitts, C., Hicks, M., Isaacson, P., Klima, R., Kramer, G., Kumar, S., Livo, E., Lundeen, S., Malaret, E., McCord, T., Mustard, J., Nettles, J., Petro, N., Runyon, C., Staid, M., Sunshine, J., Taylor, L., Tompkins, S., and Varanasi, P.: Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1, *Science*, Vol.326, No.568-72, 2009, DOI:10.1126/science.1178658
- 5) Haruyama, J., Hioki, K., Shirao, M., Morota, T., Hiesinger, H., van der Bogert, Carolyn H., Miyamoto, H., Iwasaki, A., Yokota, Y., Ohtake, M., Matsunaga, T., Hara, S., Nakanotani, S., Pieters, Carle M.: Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol.36, No.L21206, 2009, DOI:10.1029/2009GL040635
- 6) 高田真一, 日高一義: 宇宙産業創出に向けた官民連携スキームに関する研究, *日本機械学会論文集*, Vol.90, No.939, 2024, DOI:10.1299/transjsme.24-00173
- 7) 安藤ハザマ: 安藤ハザマ 月での技術開発新構想「宇宙シェルター」と「ルナ・ジオフロント」-, <https://www.ad-hzm.co.jp/info/2025/20250603.php> (参照 2025-10-21)
- 8) Nakamura, Y., Latham, G., Dorman, J.: Apollo Lunar Seismic Experiment-Final summary, Vol.87, S01, pp.117-123, 1982, DOI:10.1029/JB087iS01p0A117
- 9) Nakamura, Y., Latham, G., Dorman, J., Harris, J.E.: Passive Seismic Experiment, Long Period Event Catalog, Final Version (1969 Day 202 - 1977 Day 273, ALSEP Stations 11, 12, 13, 14, 15, and 16), University of Texas Institute for Geophysics Technical Report No. 18 (originally published 19 June 1981, revised 2 October 2008), 2p plus appendices, <https://repositories.lib.utexas.edu/items/3c162b9a-ce04-4900-8f6e-63147eb7d4db> (参照 2025-10-21)
- 10) Nunn, C.: Apollo Passive Seismic Experiments [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks, 1969, https://doi.org/10.7914/SN/XA_1969 (参照 2025-10-21)
- 11) Nunn, C., Nakamura, Y., Kedar, S., and Panning, M.: A new archive of Apollo's lunar seismic data, *The Planetary Science Journal*, Vol.3, No.9, Issue 219, 2022, DOI:10.3847/PSJ/ac87af
- 12) 辻健, 川村太一: 地震学の火星への挑戦, ないふる, No.122, pp.2-3, 2020, <https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf->

- vol122.pdf (参照 2025-10-15)
- 13) NASA: Apollo 11 Seismic Experiment, <https://science.nasa.gov/resource/apollo-11-seismic-experiment/> (参照 2025-10-21)
 - 14) USGS: Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100m, https://astrogeology.usgs.gov/search/map/moon_lro_lroc_wac_global_morphology_mosaic_100m?utm_source=chatgpt.com (参照 2025-10-21)
 - 15) Robinson, M., Brylow, S., Tschimmel, M., Humm, D., Lawrence, S., Thomas, P.: Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview, *Space Science Reviews*, Vol.150, No.1, pp.81-124, 2010, DOI:10.1007/s11214-010-9634-2
 - 16) Wagner, R., Nelson D., Plescia, J., Robinson, M., Speyerer, E., Mazarico, E.: Coordinates of anthropogenic features on the Moon, *Icarus*, Vol.283, pp.92-103, 2017, DOI:10.1016/j.icarus.2016.05.011
 - 17) Onodera, K.: New Views of Lunar Seismicity Brought by Analysis of Newly Discovered Moonquakes in Apollo Short-Period Seismic Data, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.129, Issue.7, 2024, DOI:10.1029/2023JE008153
 - 18) Scordilis, E.: Empirical Global Relations Converting M_S and m_b to Moment Magnitude, *Journal of Seismology*, Vol.10, pp.225-236, 2006, DOI:10.1007/s10950-006-9012-4
 - 19) Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., and Wassermann, J.: ObsPy: A Python Toolbox for Seismology, *Seismological Research Letters*, Vol.81, No.3, pp.530-533, 2010, DOI:10.1785/gssrl.81.3.530
 - 20) Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., Wassermann, J.: ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem, *Computational Science & Discovery*, Vol.8, No.1, 2025, DOI:10.1088/1749-4699/8/1/014003
 - 21) Brown, R.: Exponential smoothing for predicting demand. Little Incorporated., 1956, <https://www.industrydocuments.ucsf.edu/docs/jzlc0130> (参照 2025-10-21)
 - 22) Bulow, C., Johnson, L., Bills, G., Shearer, M.: Temporal and spatial properties of some deep moonquake clusters, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol.112, Issue E09003, pp., 2007, DOI:10.1029/2006JE002847
 - 23) Gillet, K., Margerin, L., Calvet, M., Monnereau, M.: Scattering attenuation profile of the Moon: Implications for shallow moonquakes and the structure of the megaregolith, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.262, pp.28-40, 2017, DOI: 10.1016/j.pepi.2016.11.001
 - 24) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第64巻, 第523号, pp.63-70, 1999, DOI: 10.3130/aijs.64.63_2
 - 25) 日本免震構造協会: 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例, 245p, 2018.
 - 26) Onodera, K., Kawamura, T., Tanaka, S., Ishihara, Y., Maeda, T.: Numerical simulation of Lunar seismic wave propagation: Investigation of subsurface scattering properties near Apollo 12 landing site, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.126, Issue.3, 2021, DOI:10.1029/2020JE006406
 - 27) Watters, T., Weber, R., Collins, G., Howley, I., Nicholas C., Schmerr, N., and Johnson, C.: Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon, *Nature Geoscience*, Vol.12, pp.411-417, 2019, DOI:10.1038/s41561-019-0362-2
 - 28) 内閣府: 宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会, 第65回, <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kagaku/kagaku-dai65/siryou2.pdf> (参照 2025-10-15)
 - 29) Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W., and Tian, D.: The Generic Mapping Tools version 6, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol.20, No.11, pp.5556-5564, 2019, DOI:10.1029/2019GC008515

Basic analysis of moonquake waveforms from the Apollo missions

Kenichi NAKANO

Seismic phenomena on the Moon, known as moonquakes, have been recorded by seismometers deployed during NASA's Apollo missions, and these data are now publicly available. While the long duration and scattering-dominated nature of lunar seismic signals are well established, their implications for structural engineering in future lunar development have not been systematically assessed. In this study, we first review the acquisition and processing of Apollo seismic records and then analyze their characteristics with a focus on engineering-relevant metrics. The results show that shallow moonquakes exhibit dominant seismic energy in the 3–6 Hz band, consistent with earlier seismological findings, and further demonstrate that the distance attenuation of peak ground velocity (PGV) is broadly compatible with empirical attenuation relationships derived for terrestrial earthquakes. This consistency suggests that PGV, a standard engineering intensity measure on Earth, can also serve as a meaningful index for evaluating seismic demands on lunar structures. Based on these findings, we discuss the potential impact of moonquakes on future lunar infrastructure and highlight the need to integrate lunar seismology with earthquake engineering approaches.