

M-V型ロケット打上げに伴う地震動の観測

藤村彰夫, 早川雅彦, 山田功夫*

1. はじめに

M-V 打ち上げに伴う地面の振動計測を鹿児島宇宙空間観測所内 1ヶ所, 所外 4ヶ所の合計 5ヶ所で実施している。これらの計測は M-3 SII-8号機以降, M-V-4号機まで, 一部観測場所や地震センサーを増やしたものもあるが, 基本的には観測場所, 地震計センサー特性, 埋設条件, 計測系の特性などは同一で比較可能である。

2. 計測系

2.1. 地震センサーと設置条件

振動の検出には主として Mark-Products 社製の速度型上下動地震計 (Land Geophone L-22D) を使用した。地震計の仕様を表 1 に示す。この地震計は号機が変わっても比較できるように図 1 に示す場所に観測条件が同一になるように設置した。場外の観測点は音響計測との整合性を保つために同一の観測地点番号とした。

表 1 センサー仕様

センサ名称	Mark Products, L-22D
地震計タイプ	上下動, 速度型地震計
形状	直径60mm, 長さ50mm
重量	425g
感度	約0.8V/kine (1 kine = 1 cm/s)
固有周波数	2.0Hz
減衰定数	0.7

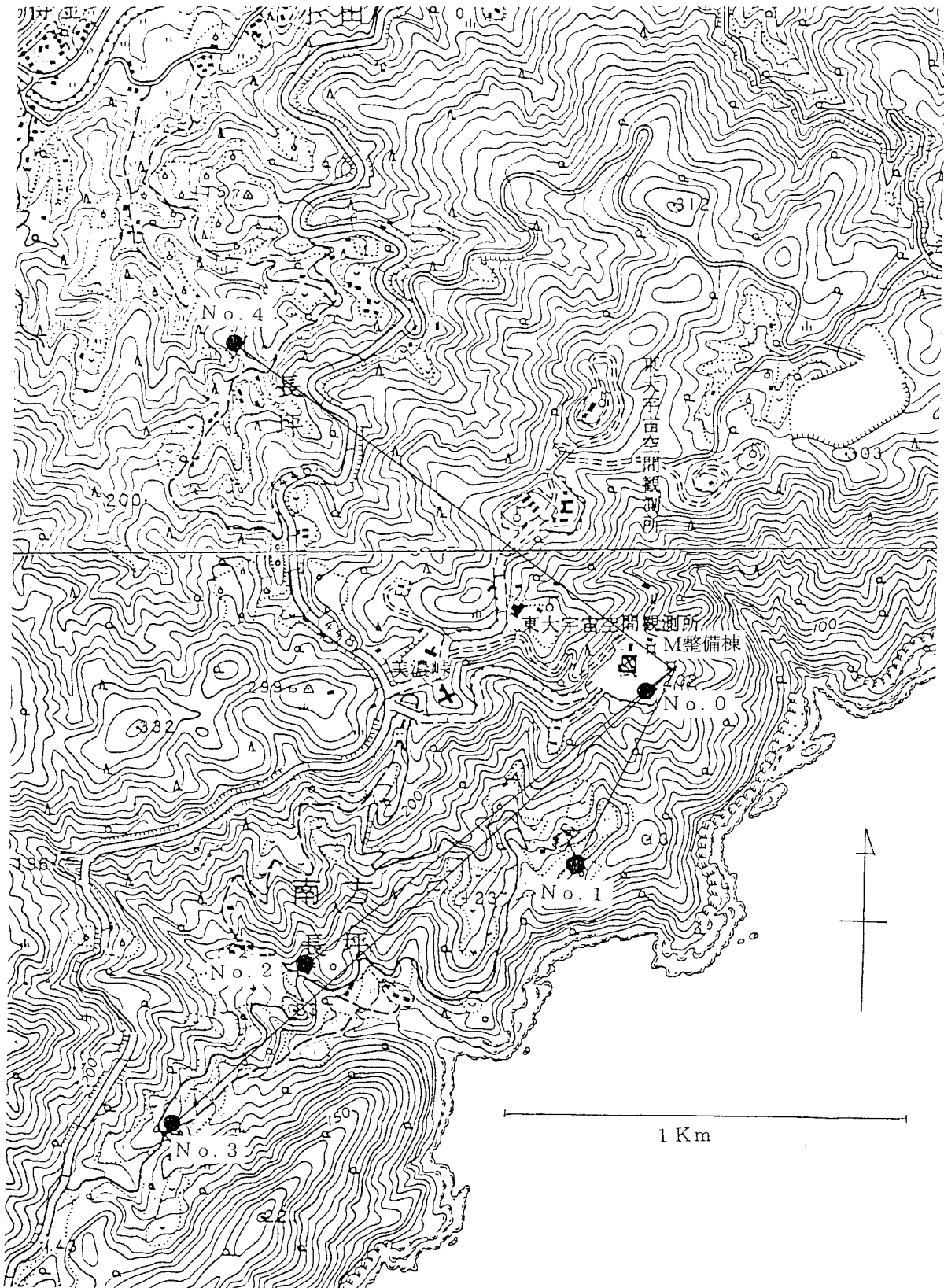


図1 地震計測地点 (国土地理院発行 2万5千分の1 内之浦、岸良より抜粋)

2.2. データレコーダ

計測システムとして人工地震探査や移動観測（臨時観測）などの地震観測等で L-22D 地震計との組み合わせで標準的に使用されるデータレコーダ（白山工業 LS-8000HS）によりデータ収録を行った。データレコーダの主な仕様と計測セッティング状況を表 2 に示す。解析に適した精度を保つために異なる増幅率で同じデータを収録している。刻時精度を保つために観測前後で GPS 衛星から時刻データでデータレコーダの高精度水晶時計を校正している。

表 2 計測機器仕様

設置場所	実験場外（4ヶ所）	実験場内（1ヶ所）
計測機器名称	白山工業 DATAMARK LS-8000HS	白山工業 DATAMARK LS-8000HS
記録方式	IC-Memory（20MB/4）	IC-Memory（20MB/3）
電源	内部：6V 外部：6V～9V	内部：6V 外部：6V～9V
サンプリング周波数	200Hz	500Hz
High Cut Filter	60Hz	120Hz
分解能	16bit	16bit
入力換算計測電圧範囲（増幅率）	±0.25V（gain：×10） ±0.025V（gain：×100）	±1.25V（gain：×2） ±0.25V（gain：×10）
刻時精度	±1 msec（GPSにて校正）	±1 msec（GPSにて校正）

3. 地震計の設置と計測方法

鹿児島宇宙空間観測所（KSC）内の観測点は M 管制室の南西側階段登り口の 1ヶ所である。これを本報告では No.0 地点と呼ぶ。実験場外の観測地点は、図 1 に示す長坪地区 3ヶ所と銭貫地区 1ヶ所の合計 4ヶ所である。地震計の設置場所では、No.1 地点のごく近傍まで畦及び農道が M-V-4 号機の観測の前にコンクリート舗装されたが、従来の場所に地震計を埋設し観測が実施できた。No.2 地点では、M-V-3 号機までの観測で埋設していた場所（畦）がコンクリート舗装されていたため、M-V-4 号機では東側に約 3m 移動した畑の端に変更した。No.3 地点は、道路分岐点より海側へ 10m 下った地図上の道路（実際には草地）東側である。No.3 地点は観測点中最も遠方である。この地点については号機によっては観測がなされていない。

No.0 地点では地震計をゴム粘土でコンクリート床と密着させた（図 2）。No.1～No.4 地点では地盤との接触を良くするためと、空气中を伝播する音波が直接地震計センサーを振動させる影響を減少させる目的で防水用のためのビニール袋に包んで地中 50cm の深さに埋設した（図 3）。観測当日は予め埋設してある地震計センサーの信号を確認しデータレコーダを接続し収録を開始した。図 4 に設置後の観測地点の様子を示す。場所は国土地理院の 1/25000 地形図から読み取り同定した。それぞれの地点までの M 発射台からの距離は、No.1 地点で 460m、No.2 地点で 1080m、No.3 地点で 1620m、No.4 地点で 1220m である。



図2 No.0 観測地点の地震計設置状況

地震計と床をゴム粘土で密着させてある。データレコーダの接続作業中の様子を示す。GPS アンテナは使用しないため、データレコーダと配線せずに外してある。

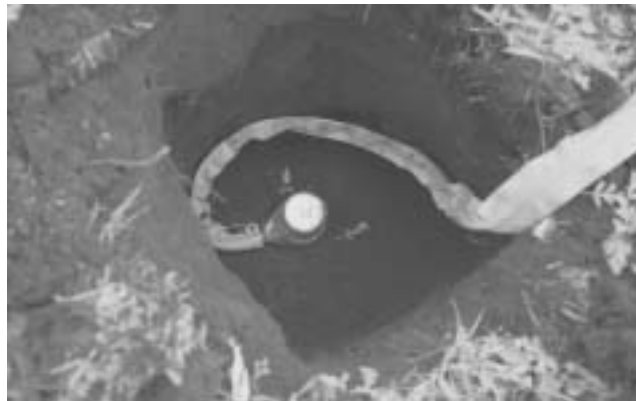


図3 地震計の埋設状況

深さ50cm にビニール袋に包んだ地震計を埋設。



図4 観測地点の様子

防水袋に入れたデータレコーダ，地震計埋設位置表示の柱，GPS アンテナケーブル（アンテナは写真の外）を示す。

4. 観測結果

全観測点の地震計で取得されたデータは、地震計の発電感度とアンプ増幅率を補正して、速度（1 kine = 1 cm/s）振幅および加速度（1 gal = 1 cm/s²）振幅の時間変化に変換した。加速度の時間変化を図5～図9に示す。それぞれの観測地点で計測された地震動波形の全体の様子は、M-V-1号機、M-V-3号機についてそれぞれの地点で取得されたものとはほぼ同じであるのでM-V-4号機のものを示す。

図5～図9の横軸（時間軸）の原点は2000年2月10日午前10時30分（JST）である。実際の発震時は約0.5秒後（M発射台）と求まっている。図中の顕著な振動は全て音波によるものである。これは空中を伝播してきた音波が地表をたたき、埋設してある地震計がその振動を検出したものである。地中を伝播する地震波は0～2秒の間で見られる波形（図10）である。

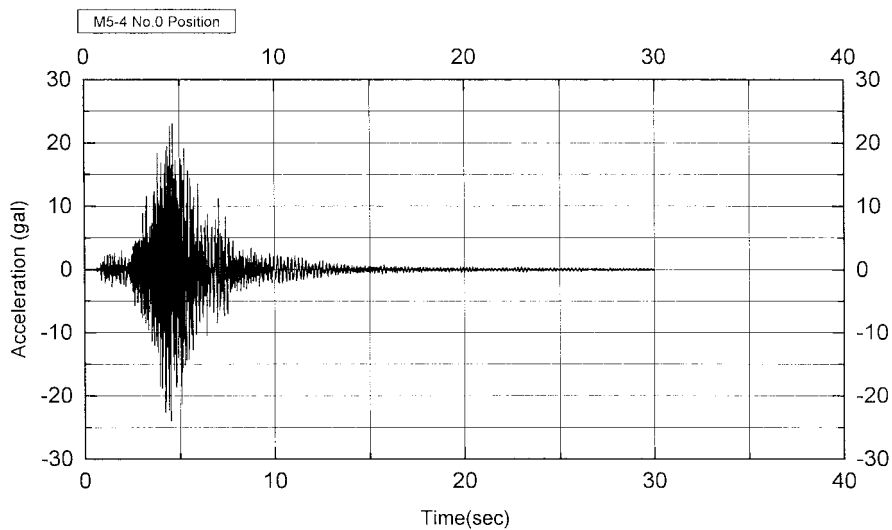


図5 No.0 地点における上下動加速度振動波形

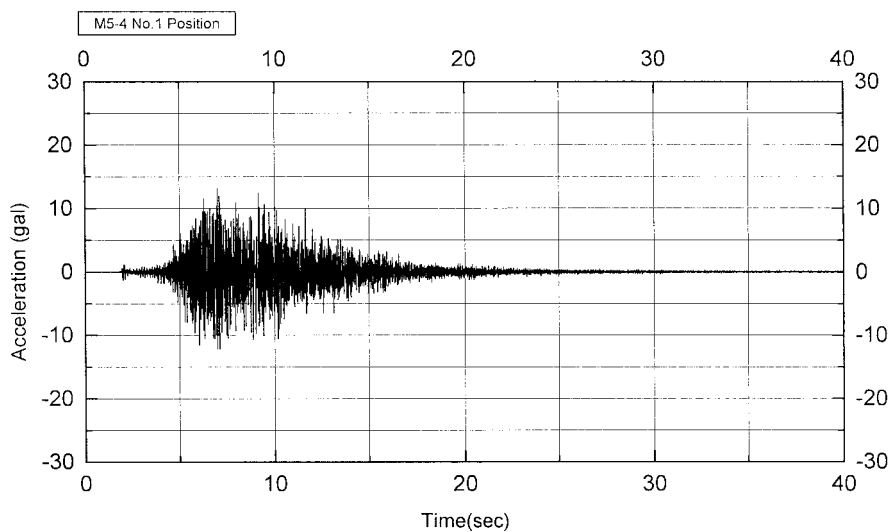


図6 No.1 地点における上下動加速度振動波形

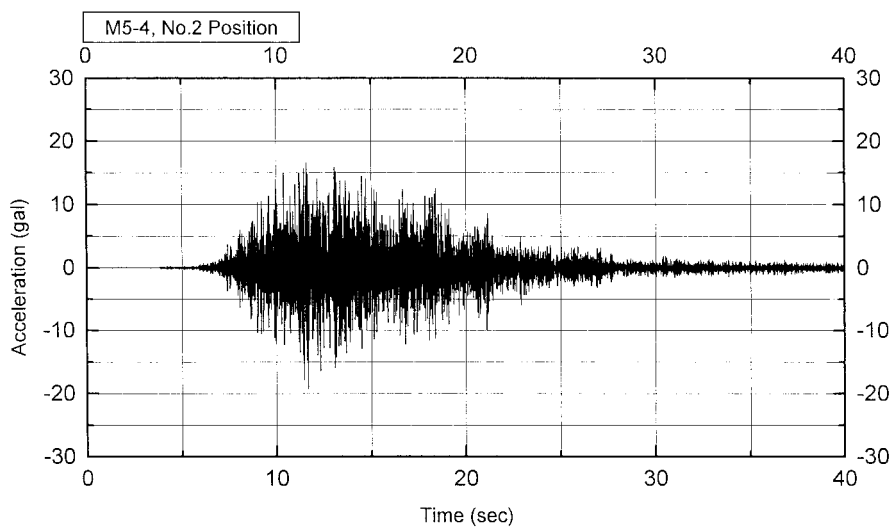


図7 No.2地点における上下動加速度振動波形

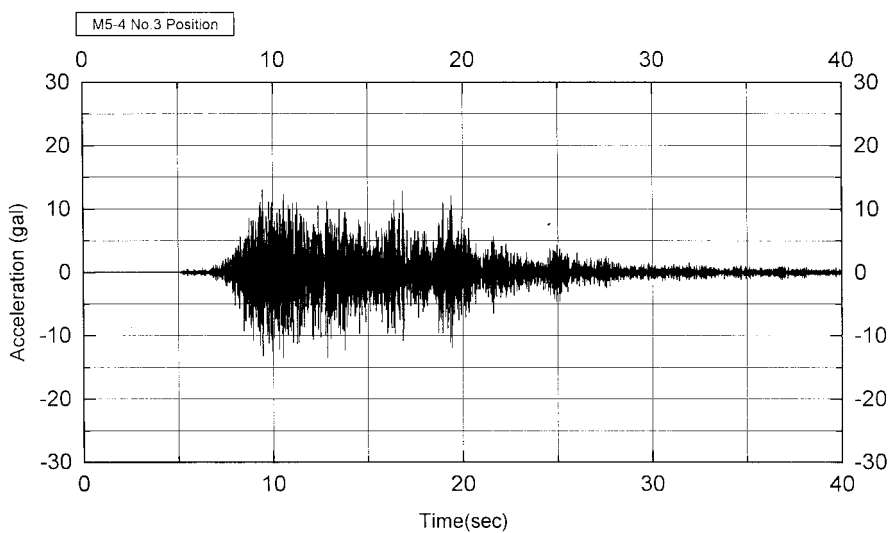


図8 No.3地点における上下動加速度振動波形

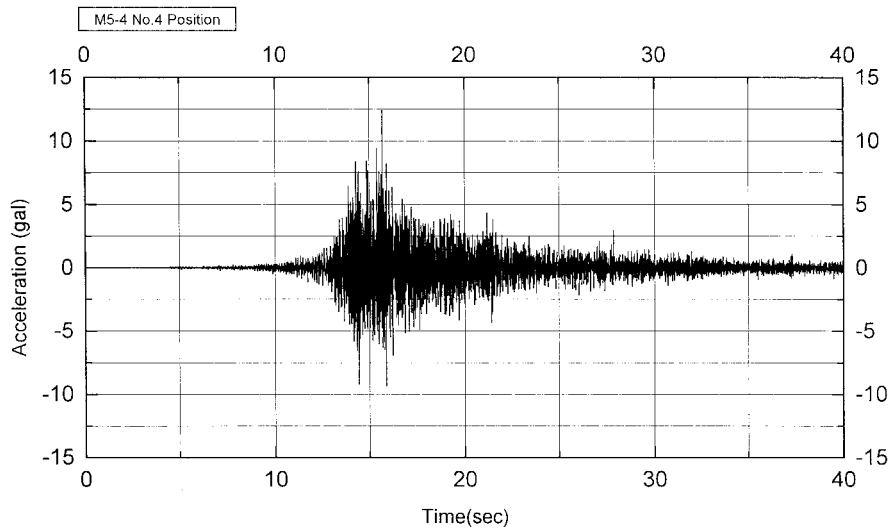


図9 No.4 地点における上下動加速度振動波形

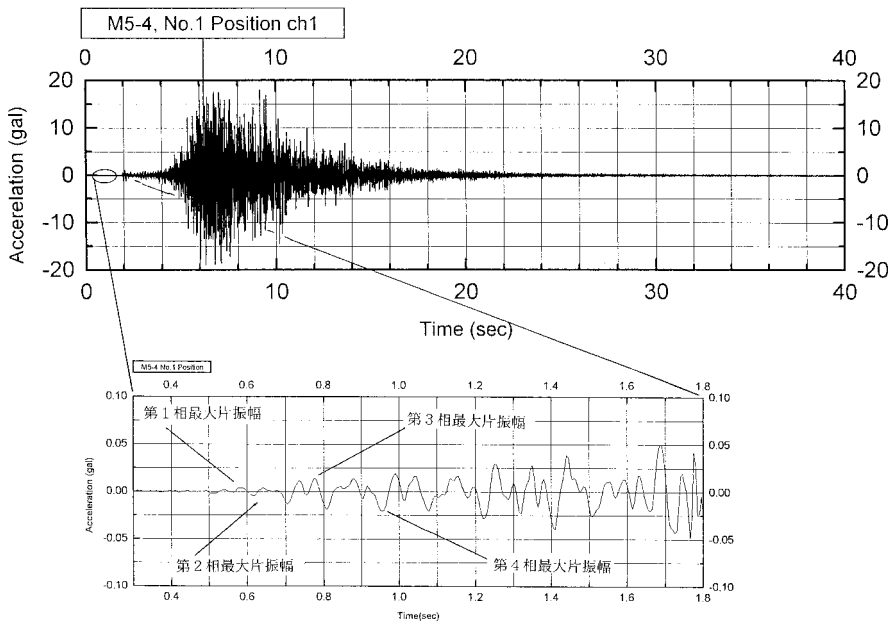


図10 No.1 地点における上下動加速度振動波形全景と直達地震波形（拡大図）

発射の3分前に注意喚起のために花火が揚げられるが、その音が地面をたたいて発生する地震波動も従来全ての観測点で観測されている。一例を図11に示す。

観測では速度信号が記録されるので、速度記録上で振り切れているデータから加速度を算出することが無いように速度記録を全て出力して確認した。直達地震波の信号が小さく振り切ることは無いので、直達地震波の解析ではS/Nの向上のためにアンプゲインの高いデータセットを用いた。

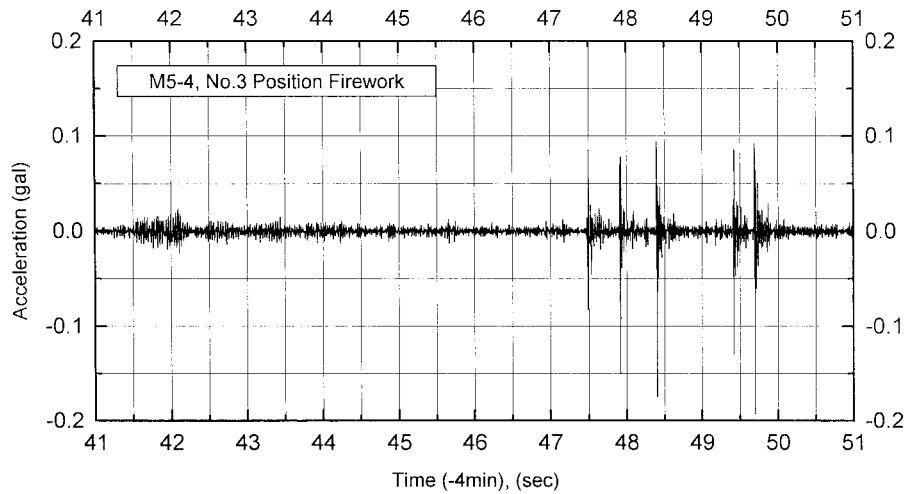


図11 No.3 地点で観測された打ち上げ3分前の花火による上下動加速度振動波形
横軸（時間軸）は10時26分41秒から51秒までの10秒間を示す。

A) 走時

各観測点の波形から、顕著な相と同定できた着時刻を求め、それらを震源（M 発射台）からの距離の関数として「走時曲線」を求めた。M-V-1号機、M-V-3号機、M-V-4号機共通に地震波速度が730m/s、1300 m/s、2600m/s 相の3つが得られ、これらが順に上から重なる水平成層モデルで射場近傍の地下構造が説明できる。なお、M-V-4号機では更に1030m/s 相も検出できている。これを採用すれば上から730m/s、1030m/s、1300 m/s、2600m/s の4層の水平成層モデルが射場近傍のより詳細なモデルである。

B) 振幅の減衰特性とノイズ環境

直達した5つの相について、最大加速度（全振幅；P-P）の距離依存性を図12に示す。図13にM-V-1号機、M-V-3号機、M-V-4号機の結果を示す。直達地震波の振幅が最大の相は730m/s 相である。この相の最大振幅の距離依存性は図中直線で示す様にM 発射台からの距離の0.8乗で減衰している。

地震計測地点での自然ノイズ環境を見積もる目的で、地震波到達前の振動加速度（全振幅；P-P）を実測し、図12と図13に示した。直達の地震波の最大加速度振幅はM 発射台から2 Km 以上離れれば、ほぼ地表のノイズに埋もれる程度まで減衰している。

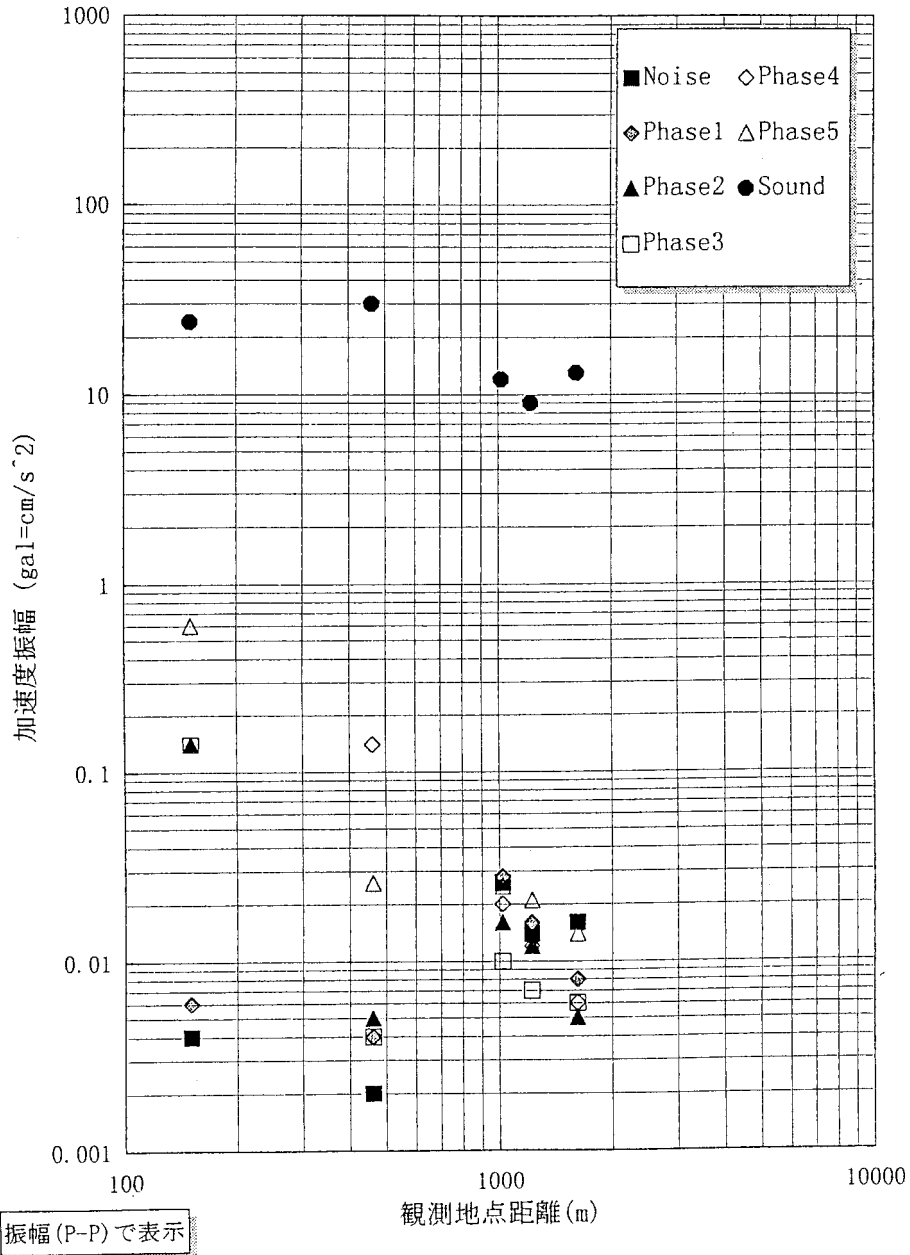


図12 M-V-4号機打ち上げ時の直達地震波の各相の加速度全振幅の距離依存性
音波励起による加速度全振幅（図5～図9で示される波形の最大加速度振幅）の距離依存性も●印で示す。

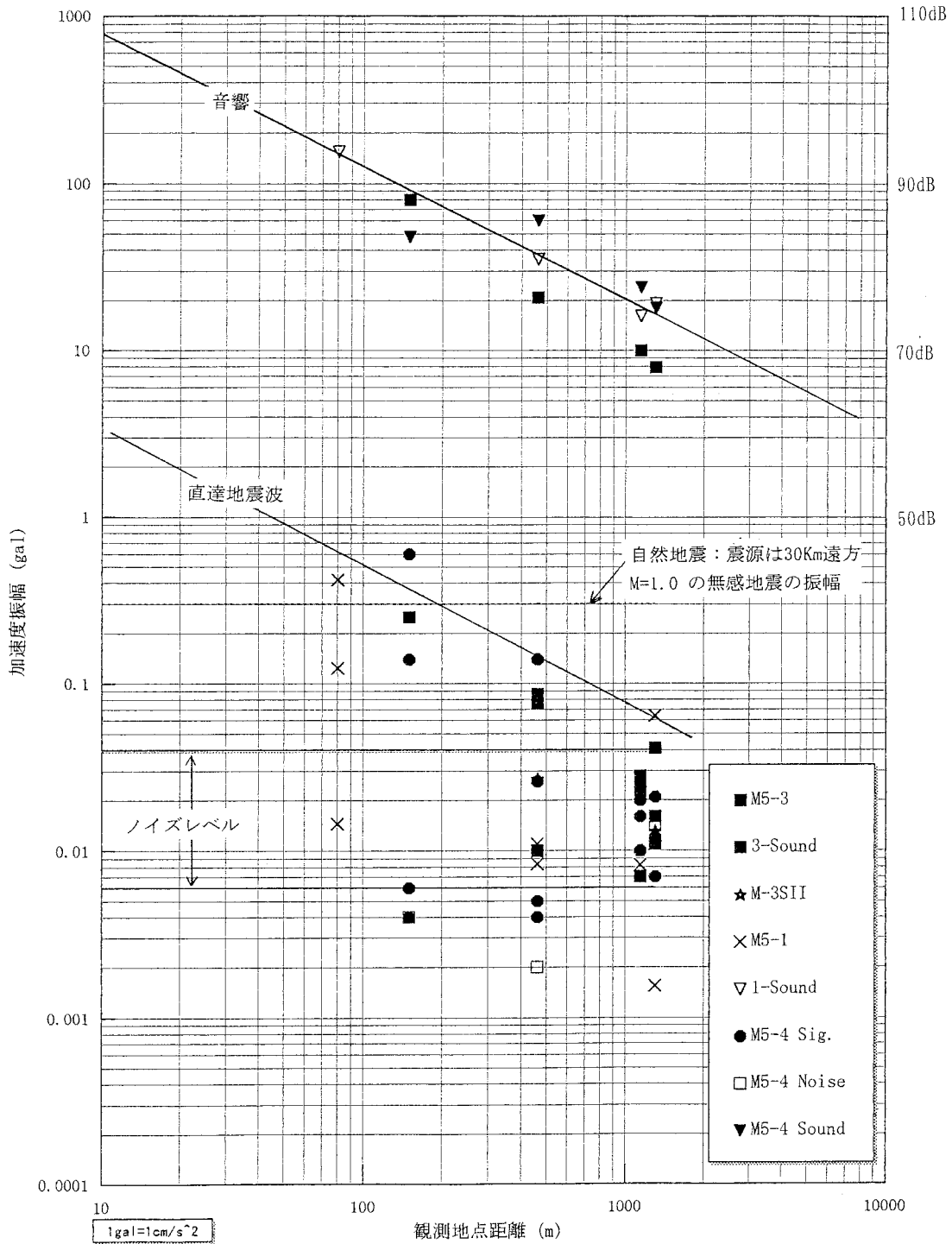


図13 M-V 打ち上げに伴う振動の距離依存性

直達地震波の最大加速度振幅を●印 (M-V-4号機), ■印 (M-V-3号機), ×印 (M-V-1号機) で示す。各観測点でのノイズレベルは天候などに依存するが、おおむね図中の範囲である。30Km 遠方の無感自然地震 (マグニチュード=1.0) の加速度振幅も表示した。音波励起による最大加速度全振幅についても M-V-1号機, 3号機, 4号機で観測された全データについて距離依存性を示す。

図13には、1997年2月10日（M-V-1号機打ち上げ前のリハーサル観測時）に観測された自然地震（震央：北緯31.2464°，東経130.7661°，観測点との距離約30Km，マグニチュード=1.0，無感地震）の加速度振幅も示した。

図12と図13には、比較のために音波励起の振動の最大加速度振幅（全振幅；P-P）も示した。この音波励起の振動は、空中を伝播してきた音波が地表をたたき、埋設してある地震計がその振動を検出したものである。この波の振幅と減衰特性は地震動の伝播状況や減衰とは直接関係しないが、音響計測との対比や実際の体感振動の目安としてここに記載する。なお、この音波励起の振動は地表の状況により音波から地震波への変換効率が大きく影響され、また地震計の埋設状態にも大きく依存する事に注意する必要がある。音波励起の地震波形の加速度全振幅の距離依存性も直達地震波同様に距離の0.8乗で減衰する。

C) 周波数特性

ここでは例としてNo.1地点での観測データから、地震波が到達する前（グラウンドノイズ）、地震波形が観測されている期間についてパワースペクトルを比較した（図14，図15）。

グラウンドノイズの主成分は商用電源が原因と思われる60Hzである。地震計測系の電源は全て電池であり商用の電力とは分離されているので、計測機器に電力ラインから60Hzが直接混入することはない。No.1観測点近傍には電柱等も無いので、原因は付近の民家で使用している商用電源、あるいは送電線によるものであろう。直達地震波が到着してから音波が到着するまでの間は、数Hzから20Hzの波が卓越している。

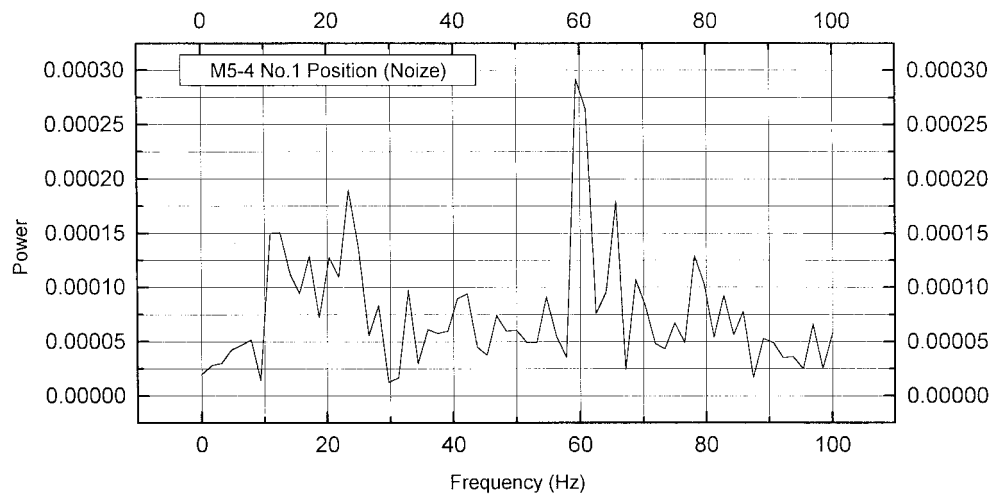


図14 No.1地点におけるノイズスペクトル

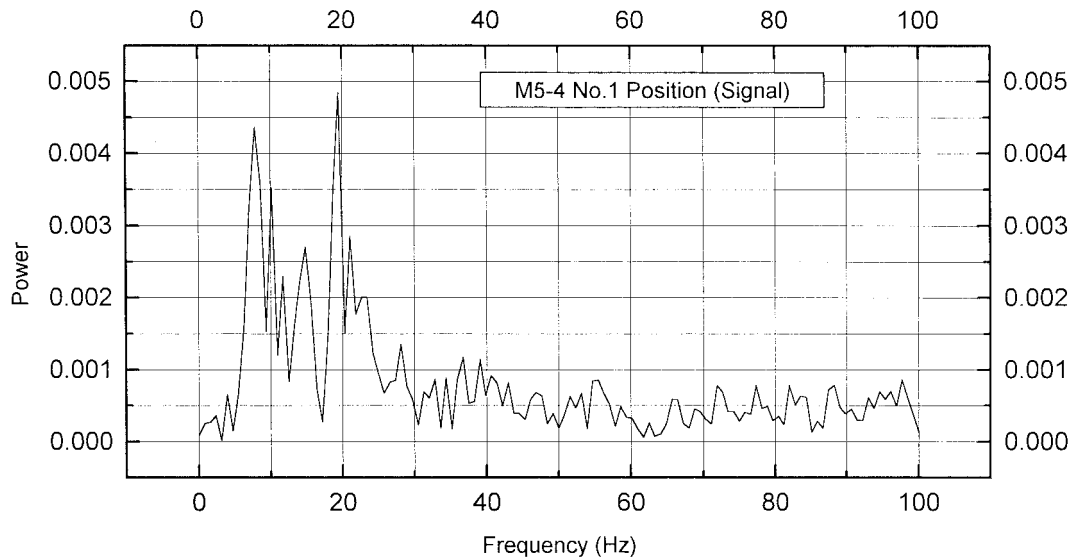


図15 No.1 地点における直達地震波のスペクトル

D) 振動レベル

「振動レベル」は人体の全身を対象とした振動の評価尺度として定められている。そのために人体が感じやすい周波数成分（上下振動で4 Hz～8 Hz）に関しては補正なしの加速度実効値を使い、それよりも低い周波数や高い周波数の成分に関しては人体が感じにくいことを加味して振動感覚補正值をつかって補正する。この補正係数は上下振動と水平振動で人の感じやすさが異なっているために違った値となっている。振動レベル (dB) は5 Hz 上下振動正弦波加速度、 $a_0 = 10^{-5} \text{m/s}^2$ (= 1 mgal) の実効値を基準として、 $\text{振動レベル (dB)} = 20 \cdot \log_{10} (a/a_0)$ で算出される。但し、 a は測定された振動加速度の実効値であり、算出された振動レベルに対して、上述した振動方向と周波数の相対レスポンスに応じ振動感覚補正を行う。この感覚補正特性は全身振動に対する暴露限界曲線を等感度曲線と考えて算出されたものである。感覚補正されたレベルの値が110dBであれば1分間以上、100dBであれば1時間以上、90dBであれば8時間以上の時間を経過すると不快を感じる振動レベルであると設定されている。建設作業を例にとると杭打ち機などの作業での振動規制基準が75dB以下で連続6日以下が定められている。上記のような感覚補正を実施しない振動加速度値を直接 dB に変換したレベルが最も厳しいものとなる。

図12、図13の縦軸は全振幅の最大値を示している。これを感覚補正を実施しない振動の評価用 dB 値に変換すると、全振幅加速度振幅 1 gal が50dB、10gal が70dB、100gal が90dB に相当する。直達地震波による振動は全観測点において50dB 以下である。50cm の深さに埋設した地震計が検出した振動では、音波が地面を叩く事によって発生する振動が最も大きなものであった。コンクリートの床の上に置かれた地点0では90dB を越える振動を検出した。実験場外では射場に最も近い第1地点でも75dB を越えるレベルは時間にして数秒間と短時間であった。

5. 謝 辞

本計測はロケット発射に伴う環境計測の一環として行われた。地震計測を実施するに当たって、長坪地区及び銭貫地区ではいろいろな方々の畑、水田、或いは庭などでの埋設作業と観測を実施させていただいた。ここに謝意を示します。