

# 世界遺産インカ遺跡の耐震評価に関する研究

組積石工術      常時微動測定      振動モード解析  
線形時刻歴解析      振動実験      剛体摩擦係数解析

## 1.はじめに

日本と同じく環太平洋地震地帯に属しているペルー共和国は地震大国である。また、この地には世界的にも有名な遺産建築インカ遺跡が現存する地域でもある。このインカ遺跡は石造ブロックを積み上げた組積造建築であり、過去の度重なる地震においてその耐震性能を発揮してきた。しかし、多くの遺跡の中には、地震によって崩壊してしまったものも挙げられており遺跡保存・修復に対する必要性が高まっている。

このようなことを踏まえ本研究では、インカ遺跡の保存・修復計画の一考察となる、遺跡の耐震診断を行うものである。遺跡耐震診断を行う上で、解析対象として選択した遺跡はインカ帝国時代首都とされていたクスコ市から約 20km 離れた場所に現存する Pisac(Fig.1)、1911 年ラテン・アメリカ史研究者ハイラム・ピンガムによって発見された空中都市マチュピチュに現存する Colca,Huayrana(Fig.2,3)の 3 種類とした。この 3 つの遺跡を対象とした要因として、遺跡を建設する際に用いた組積石工術の違いが挙げられる。Pisac に関しては、石造ブロックのみを用いた『中間様式石工術』が用いられており、Colca,Huayrana に関しては石造ブロック間にモルタルの役割をした泥を介する『自然石使用の石工術』が採用されている。これら二つの石工術はアイオワ大学のスーザン・ナイルズらが提唱したものであり、前述した地震により崩壊した遺跡建築事例の中にこれらの二つの石工術を使用した遺跡が含まれている<sup>1)</sup>。よって、石工術による耐震性能についての検討を行うことを目的とする。また『自然石使用の石工術』を用いた遺跡を 2 種類選択した要因については、この石工術を用いた遺跡の多くが妻壁部分のみの崩壊という事例が報告されている。このことから、妻壁は用いているが構造的に異なった 2 種類の遺跡を選択しその耐震性能について比較検討を行うことを目的とする。また本研究の耐震評価の内容としては、異なる石工術を用いた 3 つの遺跡に関して、常時微動測定、振動実験、有限要素法、剛体摩擦係数解析などを用いて遺跡の振動特性を推定することを目的としている。

## 2.常時微動測定

本研究の解析対象である Pisac,Colca,Huayrana の振動特性を把握するため、現地調査による常時微動測定を行った。測定機器の設置箇所は Fig.4,5,6 の通り、Pisac では短辺方向壁 2 箇所(Ch.7,9)、長辺方向壁 2 箇所(Ch.8,10)、地盤(Ch.11)の計 5 箇所に設置した。Colca では妻壁上部(Ch.7)、長辺方向壁 2 箇所(Ch.8, 9)、地盤(Ch.10)に、Huayrana では中央壁上部(Ch.7)、妻壁部分(Ch.8)、中央壁下部(Ch.9)、地盤(Ch.10)の計 4 箇所に測定機を設置した。観測微動については、水平成分(EW,NS 方向)の微動をサンプリング周波数 100Hz で計 500[s] 間測定した。結果としては、各遺跡の地盤からその他の観測箇所までの伝達関数を求めるものとする。

では、今回行った微動解析結果について述べる。Pisac の微動解析結果に関しては、EW 方向において 14.57,16.20[Hz](Ch.8)と 13.28,14.43[Hz](Ch.10)の領域で卓越振動数が見られ、NS 方向においては 13.17,14.55[Hz](Ch.9)の部分で卓越振動数が見られた。しかし、EW,NS 方向共に測定を行った壁と水平に位置する方向の微動に関しては、卓越振動数が見えられなかった(Fig.7,8)。

Colca に関しては、EW 方向で 8.42[Hz](Ch.7)と 11.48[Hz](Ch.8),8.42[Hz](Ch.9)の領域において、NS 方向では 5.56[Hz](Ch.7)と 9.13[Hz](Ch.8),9.13[Hz](Ch.9)の領域で卓越振動数が見られた(Fig.9,10)。Huayrana に関しては、EW 方向で 5.49[Hz]、NS 方向で 8.25[Hz]前後に卓越振動数が全チャンネルで見られた(Fig.11,12)。

以上の結果を踏まえ、同じ『自然石使用の石工術』を使用し妻壁は用いているが構造的に異なった Colca と Huayrana の振動特性について比較を行う。Colca に関しては、妻壁部分(Ch.7)のチャンネルのみが卓越振動数を示していたのに対して、Huayrana では妻壁部分のみでなく全チャンネルにおいて同様の卓越振動数が観測された。これは、Colca の妻壁が独立的に振動を有する特性であるのに対して、Huayrana では妻壁だけでなく遺跡全体が同時にある振動数領域において一体となって振動するといった特性を示していることが考えられる。よって第 1 章で前述した多数の報告がなされている妻壁部分崩壊は、Colca のように妻壁部分が独立的に振動してしまう特性が要因の一つとして挙げられる。

寸法が類似した Pisac,Colca の組積造壁について、そのチャンネルにおける卓越振動数から、石工術による振動特性の違いについての検討を行う(表 1)。両遺跡の組積造壁と直行成分の卓越振動数に関しては Pisac(Ch.7,NS 成分)が 25.57[Hz]、Colca(Ch.9,EW 成分)が 8.42[Hz]と推定された。また、組積造壁と水平成分の卓越振動数に関しては、Pisac では卓越部分が見られなかったのに対して、Colca では 9.13[Hz]に卓越振動数が見られた(表 1)。よって以上の結果から、『中間様式石工術』を用いた組積造壁は『自然石使用の石工術』を用いたものと比較して、壁全体での等価線形剛性が高いということが推測できる。

表 1 石工術による振動特性の比較

遺跡名	Pisac	Colca
組積石工術	中間様式石工術	自然石使用の石工術
測定箇所	短辺方向壁(Ch.7)	長辺方向壁(Ch.9)
壁寸法[m]	7.7 × 2.7 × 0.8	7.0 × 3.0 × 0.85
直行成分	NS 成分	EW 成分
卓越振動数[Hz]	25.57	8.42
水平成分	EW 成分	NS 成分
卓越振動数[Hz]	-	9.13



Fig.1 Pisac

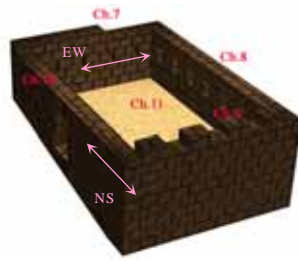


Fig.4 Pisac 観測箇所



Fig.2 Colca

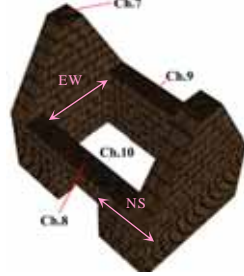


Fig.5 Colca 観測箇所



Fig.3 Huayrana

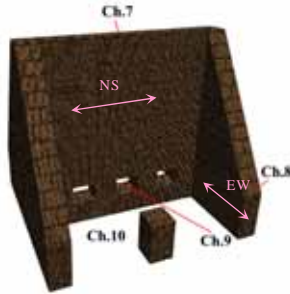


Fig.6 Huayrana 観測箇所

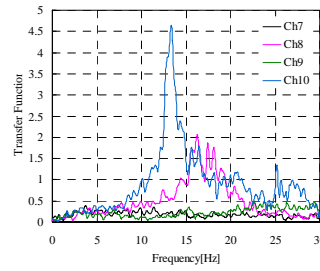


Fig.7 Pisac EW

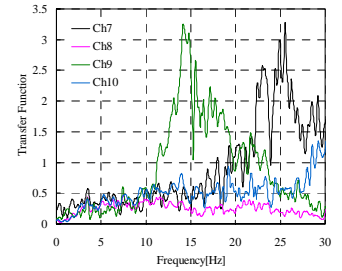


Fig.8 Pisac NS

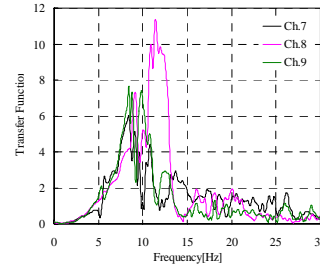


Fig.9 Colca EW

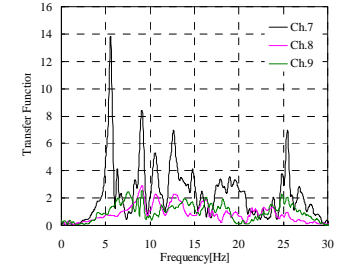


Fig.10 Colca NS

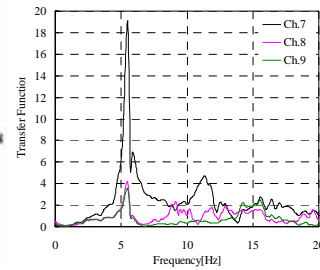


Fig.11 Huayrana EW

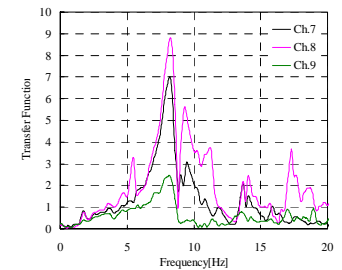


Fig.12 Huayrana NS

### 3. 振動モード解析

Pisac, Colca, Huayrana の有限要素モデルを作成し、振動モード解析を行った。今回の有限要素法を用いた振動モード解析の目的としては、第2章で紹介した常時微動測定による固有振動数と振動モード解析から得られた固有振動数を比較し、遺跡の振動特性と等価ヤング係数についての調査を行うものとする。

Pisacの振動モードについては1次モードにおいて13.28[Hz]、2次モードで14.56[Hz]、3次モードにおいて16.04[Hz]の固有振動数が見られた。Colcaに関しては1次モードで5.50[Hz]、2次モードで5.59[Hz]、3次モードで11.70[Hz]の固有振動数が見られた。最後にHuayranaに関しては、1次モードで5.49[Hz]、2次モードで8.07[Hz]といった固有振動数が見られた。そして、それぞれの遺跡の振動モードにおける振動数を前章で示した常時微動測定結果と比較すると、モードの振動パターンと対応するチャンネルにおいて推定された卓越振動数とそのモードにおける固有振動数とほぼ同等の値を示したことがわかる(表2)。以上のことから、Pisac, Colca, Huayrana モデルの信頼性は高いものであると考えられる。

また、両遺跡モデルの等価ヤング係数に関しては、Pisacが1.83[kN/mm<sup>2</sup>]であった。それに対して、Colcaが0.86[kN/mm<sup>2</sup>]、Huayranaが0.983[kN/mm<sup>2</sup>]であった。この結果より、『中間様式石工術』を用いた遺跡の等価ヤング係数は約1.8[kN/mm<sup>2</sup>]、『自然石使用の石工術』を用いた遺跡の等価ヤング係数は約0.9[kN/mm<sup>2</sup>]前後であると考えられる。

表2 各遺跡の卓越周波数の比(Hz)

Pisac		
振動特性	振動モード解析	常時微動測定
短辺方向壁(Ch.9)NS成分	13.28	13.17
長辺方向壁(Ch.10)EW成分		13.28
長辺方向壁(Ch.8)EW成分	14.56	14.57
短辺方向壁(Ch.9)NS成分		14.55
長辺方向壁(Ch.10)EW成分		14.43
長辺方向壁(Ch.8)EW成分	16.04	16.20
等価ヤング係数 : 1.83[kN/mm <sup>2</sup> ]		
Colca		
振動特性	振動モード解析	常時微動測定
妻壁部分(Ch.7)NS成分	5.50	5.50
妻壁部分(Ch.7)EW成分	11.70	10.91
長辺方向壁(Ch.8)EW成分		12.03
長辺方向壁(Ch.9)EW成分		12.62
等価ヤング係数 : 0.863[kN/mm <sup>2</sup> ]		
Huayrana		
振動特性	振動モード解析	常時微動測定
中央壁上部(Ch.7)EW成分	5.49	5.49
妻壁部分(Ch.8)EW成分		5.49
中央壁下部(Ch.9)EW成分		5.49
中央壁上部(Ch.7)NS成分	8.07	8.23
妻壁部分(Ch.8)NS成分		8.29
中央壁下部(Ch.9)NS成分		8.20
等価ヤング係数 : 0.983[kN/mm <sup>2</sup> ]		

#### 4. 線形時刻歴解析

振動モード解析において用いた Colca, Huayrana モデルを使用し、線形範囲内での時刻的解析を行う。今回 Pisac モデルは線形時刻歴解析の対象外とした。このことについては、Pisac を建造する上で用いられた『中間様式石工術』が大きく関係している。この『中間様式石工術』を用いて作られた遺跡の崩壊事例として、石造ブロックの滑り現象による隙間やその隙間による組積造壁の崩壊といったものが挙げられる。この滑り現象に関して本研究では非線形範囲内の問題と捉えており、線形時刻歴解析範囲外と考えられる。それに対して『自然石使用の石工術』を用いた遺跡の崩壊事例としては、石造ブロックが単体で引き起こす滑り現象ではなく、壁全体もしくは一部分が一体となって崩落する現象であり、線形範囲内での解析で検討が可能であると判断した。よって、今回の線形時刻歴解析では Colca, Huayrana の 2 つを解析対象として選択し、Pisac は解析対象から外すこととした。

解析において用いる入力地震波に関しては、既往の研究から得られた解析対象が現存される地域の地震ハザードデータ<sup>2)</sup>より、再現期間 100 年間における最大加速度をエルセントロ波に介したものをを用いる。また、解析結果としては遺跡構造内に発生する鉛直方向の引張応力を算出するものとした。これは、遺跡構造内で鉛直方向の引張応力に対して抵抗する要素が遺跡の自重のみであり、高い引張応力が発生する箇所については、その箇所を起点とした崩壊が発生する可能性が考えられる。よって本研究の時刻歴解析では、この鉛直方向の引張応力に注目し、遺跡構造内にける危険箇所の推定を行うことを目的とする。

では、解析結果について述べる。時刻歴解析を行い、遺跡構造内に発生した引張応力の分布結果が Fig.13 である。Colca に関しては、NS 方向の入力地震波によって妻壁部分下部から中央部にかけて、Huayrana に関しては EW 方向の入力地震波によって中央壁中央部分にそれぞれ引張応力が発生した。この結果を踏まえ、以上のような箇所を起点とした遺跡崩壊が発生すると、Colca の場合は妻壁部分全体が、Huayrana の場合は中央壁の大半が崩壊し、甚大な遺跡損傷を引き起こしてしまう恐れがある。また Colca の解析結果については、同様に妻壁部分が構造的に独立した遺跡に関して妻壁部分の崩壊事例が多数報告されており、今回の解析によって得られた結果がそれを証明していると考えられる。

#### 5. 石造ブロックの振動実験

インカ遺跡において、使用されている石造ブロックの動的特性を把握するため振動実験を行った。今回の振動実験で調査する特性については、ブロック間の摩擦係数と摩擦の周波数依存性に着目する。使用する石造ブロックに関しては、既往の研究<sup>3)</sup>によって調査された、ブロックの算術平均荒さを参考に、仕上げ方法として粗磨きが施された秋田県男鹿産の安山岩を採用した。使用する石造ブロックはベースブロックと解析対象のブロックの計 2 個を使用するものとする(Fig.14)。入力波としては最大加速度 800Gal のハーフサイン波を使用し、摩擦の周波数依存性について調査を行うため、入力波の周波数領域を 5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,10.0Hz の 6 段階に設定し、各周波数共に 3

ステップ加振を行った。結果としては、ブロックと振動台の加速度及びブロックの変位の測定を行った(Fig.15)。摩擦係数の推定に関しては、ブロックの加速度結果より求めるものとする。また、今回の振動実験による摩擦係数の推定に関しては、石造ブロックの滑り現象発生時間帯の推定が重要となってくる。よって本研究では、この時間帯についてブロックと振動台の加速度に差が生じ、再度一致する時間帯に注目し、その時間帯をブロックの滑り現象発生時間帯として判断するものとする(Fig.16)。

では、振動実験による結果について述べる。今回行った実験によって得られた摩擦係数の平均値は入力波の周波数ごとに、5.0Hz において 0.25,6.0Hz で 0.24,7.0Hz で 0.23,8.0Hz で 0.30,9.0Hz で 0.29,10.0Hz で 0.31 といった結果となった(表 3)。この結果に関しては、各周波数での推定摩擦係数のバラツキが非常に小さく、鈴木らの研究<sup>3)</sup>によって調査された粗磨きの石造ブロックの推定摩擦係数とほぼ等しい値を示した。また、周波数依存性に関しては各周波数の平均摩擦係数による近似曲線から、入力波の周波数が高くなると共に摩擦係数も高くなるといった傾向が見受けられた(Fig.17)。

表 3 平均摩擦係数

入力波周波数[Hz]	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
平均摩擦係数	0.25	0.24	0.23	0.30	0.29	0.31

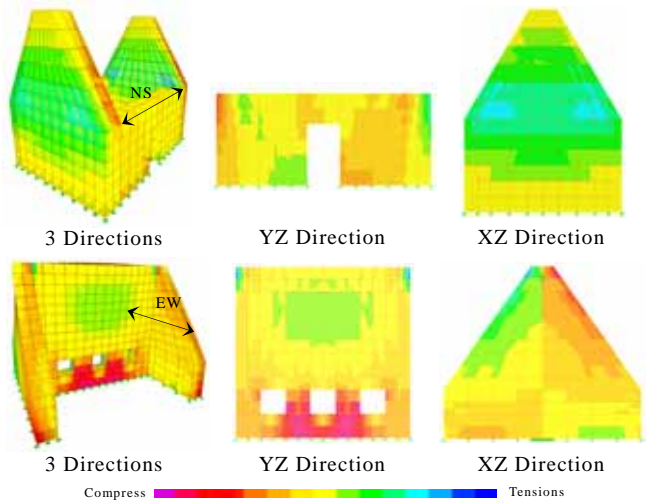


Fig.13 鉛直方向引張応力の結果(上: Colca, 下: Huayrana)



Fig.14 振動実験試験体

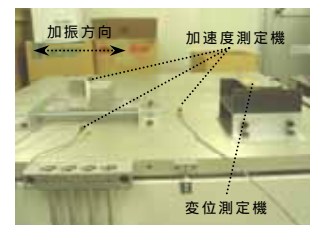


Fig.15 振動実験概要図

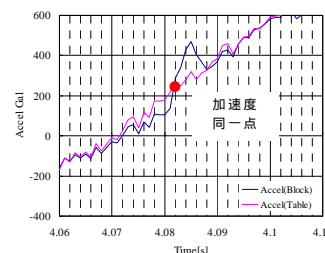


Fig.16 加速度同一点

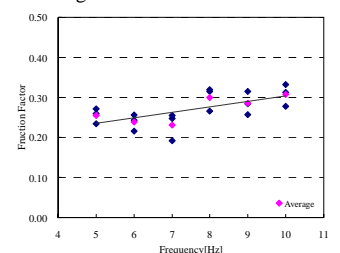


Fig.17 推定摩擦係数

## 6.剛体摩擦係数解析

遺跡の耐震診断を行うにあたって、非線形範囲内である石造ブロック間の摩擦の影響を解析することは非常に重要なことである。本研究で行う剛体摩擦係数解析は、この非線形特性である石造ブロック間の摩擦挙動を解析するためのものである。今回の非線形解析では、前項で紹介した振動実験によって得られた結果を参考に、解析プログラムの信頼性を確認する目的で行うものとする。また、今後の非線形解析を行うにあたって用いる遺跡モデルのデータベースといった目的も含まれている。

この剛体摩擦係数解析に関しては、解析を行う前にまず解析を行うブロックの寸法と単位体積重量、摩擦係数の設定を行う。そしてブロックモデルに対して入力波を作用させ、結果として変位、速度、相対加速度、絶対加速度を求めることができる。設定を行った摩擦係数に関しては、Fig.16 に示した各周波数の推定摩擦係数を入力した。入力波に関しても、振動実験で使用した最大加速度 800Gal のハーフサイン波を使用し、非線形時刻歴解析を行った。

剛体摩擦係数解析の結果については、解析結果と実験結果を比較したものが表 4 のようになった。最大変位に関しては、入力波の周波数 5.0Hz の結果を除いて、約 3.0mm 程度の誤差が生じたがほぼ近似した値を示した(表 4)。最大加速度結果に関しては、実験値が解析値より約 2 倍程度高い値を示している(表 4)。しかし、剛体摩擦係数解析のモデルについて、滑り現象が発生した時間帯での加速度結果(解析結果では最大加速度と滑り加速度は等しい)を見ると、振動実験によって推定した滑り加速度とほぼ近似した値を示していることがわかる(表 4)。このような加速度結果に関しては、剛体摩擦係数解析による結果はブロックの静止摩擦係数を入力波によって発生した慣性力が上回った時点で、ブロックの加速度が一定となる理論を採用した。これに対して、振動実験では滑り現象が発生する時間帯以降も、ブロックの加速度が増加する振動特性が見られた。これは石造ブロック間の摩擦現象に含まれる速度や面圧、温度といった様々な依存性が原因であると考えられ、そのことが解析と実験での最大加速度結果にかなりの誤差が生じさせた要因の一つとして考えられる。

## 7.まとめ

### ・常時微動測定

解析対象である Pisac, Colca, Huayrana の振動特性把握のため常時微動測定を行った。その結果として、Pisac は 13.28Hz(EW 方向)、Colca は 5.5Hz(NS 方向)、Huayrana は 5.5Hz(EW 方向)といった固有振動数を推定した。Colca と Huayrana の妻壁を持つ遺跡の振動特性比較については、Colca の妻壁が構造的に独立していることから妻壁のみが振動を有する特性であるのに対して、Huayrana では中央壁の影響で妻壁部分が単独で振動する特性ではなく遺跡全体が一体とな

って振動するといった特性を示した。Pisac と Colca の石工術の違いによる振動特性の比較については、各遺跡の組積造壁の微動解析結果より、『中間様式石工術』を用いて作られた組積造壁の剛性が『自然石使用の石工術』を使用し作成された組積造壁より高いといった結論に至った。

### ・振動モード解析

有限要素法を用いて作成した遺跡モデルの振動モード解析を行い、常時微動測定によって推定した振動特性と振動モード解析結果との比較を行った。その結果、解析対象とした遺跡全ての解析結果が微動測定によって推定した卓越振動数と近似した。このことから、遺跡モデルの信頼性は高いといったことが考えられる。また、遺跡モデルの等価ヤング係数については、Pisac が  $1.83[\text{kN}/\text{mm}^2]$ 、Colca が  $0.863[\text{kN}/\text{mm}^2]$ 、Huayrana が  $0.983 [\text{kN}/\text{mm}^2]$  といった結果となった。この結果より、『中間様式石工術』を用いた遺跡は『自然石使用の石工術』を用いた遺跡より約 2 倍程度高い等価ヤング係数を持つといったことが考えられる。

### ・線形時刻歴解析

既往の研究によって得られた解析対象地域の地震ハザード結果<sup>2)</sup>を元に作成した入力地震波を用いた線形時刻歴解析を行った。その結果、Colca が NS 方向の振動によって妻壁部分下部が、Huayrana が EW 方向の振動によって中央壁中央部分に鉛直方向の引張応力が発生しているため、この推定された箇所について遺跡崩壊の危険性が高いことが考えられる。

### ・振動実験

石造ブロック1個を用い、その振動特性を調査するため振動実験を行った。その結果、石造ブロック間の摩擦係数については、5Hz から 10Hz で約 0.3 といった値を推定した。また、摩擦の周波数依存性については、入力波の周波数が高くなると共に摩擦係数も同様に高くなる傾向を示すことがわかった。

### ・剛体摩擦係数解析

組積造壁の非線形解析を行うため、解析プログラムを作成し、振動実験による結果との比較を行い、その妥当性についての検証を行った。その結果、変位結果、滑り加速度については実験結果とある程度近似的な結果を得ることができた。しかし、滑り現象発生移行の加速度などの振動特性については誤差が生じているため、摩擦の様々な依存性について今後、振動実験などによって解明する必要性が考えられる。

### 参考文献

- 1) ラウラ・ラウレンチック・ミネリ:インカ帝国歴史図鑑先コロンプス期ペルーの発展紀元 1000~1534 年
- 2) C.Cuadra, M.B.Karkee, J.Ogawa, J.Rojas : An Evaluation of earthquake risk to Inca's historical construction
- 3) 鈴木隆文:インカ石組の地震時挙動に関する研究

表 4 剛体摩擦係数解析及び石造ブロックの振動実験による結果の比較

入力波周波数[Hz]	剛体摩擦係数解析			石造ブロックの振動実験		
	最大変位[cm]	最大加速度[Gal]	滑り加速度[Gal]	最大変位[cm]	最大加速度[Gal]	滑り加速度[Gal]
5.0	1.24	245	245	1.33	549	247
6.0	0.83	255	255	1.11	552	233
7.0	0.66	225	225	0.81	546	227
8.0	0.44	284	284	0.74	546	294
9.0	0.35	284	284	0.51	579	278
10.0	0.26	304	304	0.51	574	301