

地盤工学における遠心模型実験の妥当性

～遠心模型実験に関する国際プロジェクトを通じて～

京都大学 防災研究所 飛田哲男

遠心教

教義：遠心模型実験は万能なり。得られた結果を信ずべし。

信者の数：不明（全世界で数千人か）

主な信者： 大学教員，発注者（施主），数値解析教の信者

急進的な信者の特性：実験データを盲信する（遠心原理主義）

縁起：

1930年代ロシアで自然発生的（？）に始まる
（始祖：ダビデンコフとポコロフスキー）

総本山大阪市立大学宗（1964年）
（開祖：三笠教授）
門徒：京大，その他国内多数

総本山ケンブリッジ大学宗（1964年）
（開祖：スコフィールド教授）
門徒：UC Davis, RPI, 京大，東工大，その他多数

遠心教 年表

1869年 エドゥアルド・フィリップス (フランス) 弾性理論の限界を指摘. 遠心模型実験の相似則提案

(その後約60年間進展なし)

1931年 フィリップ・バッキー (コロンビア大学) 遠心場で坑道の天井崩壊を模擬. ただし, 計測装置は使われておらず, その後進展なし.

1932年 ダビデンコフとポロフスキー (ロシア) 遠心模型実験の研究企画案 (ロシア語) 当初は核開発の一環として利用.

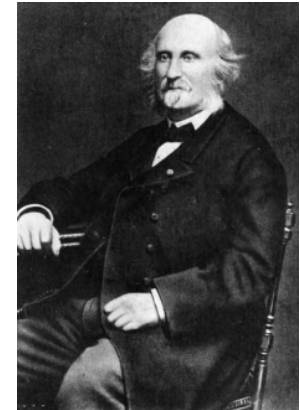
1936年 ポロフスキーとヒョードロフ (ロシア) 第1回国際地盤工学会 (ハーバード) で遠心模型実験について発表 (遠心に関するロシア人初の英語文献)

(鉄のカーテンで西側との交流なし)

1964年 三笠 (大阪市立大学) 自重の影響を考慮した圧密理論の検証に, 商用では初となる遠心力載荷装置のちに自ら設計した装置を使った.

1964年 スコフィールド (ケンブリッジ大学) Cam Clay モデル (土の弾塑性構成則) の検証のため, ロシアのテキスト (1968, 1969年版) を参考に, 遠心力載荷装置を開発

1974年 スコフィールド (ケンブリッジ大学) 「10mビーム」と呼ばれる大型の装置を開発



Prof. Phillips



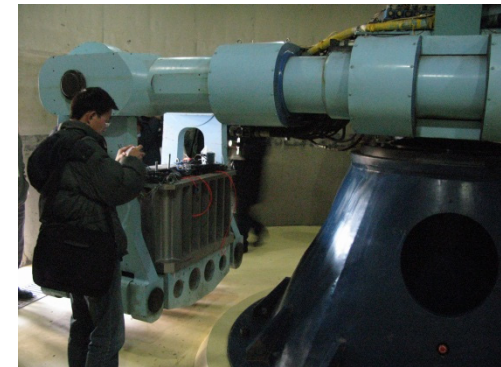
Prof. Schofield

遠心教本山・末寺

国名	機関	有効半径 (m)	最大加速度(g)
Canada	Queen's U	2.65	300
France	CESTA	10	100
France	LCPC, Nantes	5.5	200
Germany	Ruhr U Bochum	4.125	250
India	IIT, Bombay	4.5	200
Japan	Chuo U	3.05	150
Japan	Fish Agy	3	150
Japan	Hokkaido Devel Agy	2.5	200
Japan	Kajima Co	2.63	200
Japan	Kyoto U	2.5	200
Japan	Min of Const, PWRI	6.6	150
Japan	Min of Trans, PARI	3.8	113
Japan	Nippon Koei Co	2.6	250
Japan	Nishimatsu Co	3.8	150
Japan	Nikken Sekkei NGI	2.7	200
Japan	Obayashi	7.01	120
Japan	● Osaka City U	2.56	200
Japan	Shimizu Co	3.35	100
Japan	Taisei Co	2.65	200
Japan	Takenaka Co	6.5	200
Korea	Daewoo Inst Const Tech	2.7	200
Korea	KAIST	5.0	200
Holland	Delft Geot	6	400
China	China Inst Wat Res	5.03	300
China	Hong Kong UST	4	150
China	Inst Wat Cons Res	4.5	300
China	Nanjing Hydr Res Inst	5	200
China	Yangtze Riv Res Inst	3.5	300
China	Tongji U	3.0	200
Russia	Moscow Inst Rail Eng	2.5	322
Taiwan	Nat Cent U	3	200
UK	● Cambridge U	4.125	150
UK	Manchester U	3.2	130
USA	Rensselaer Poly Inst	3	200
USA	Sandia Lab	7.62	240
USA	U Calif, Davis	9.14	300
USA	U Colorado, Boulder	6	200
USA	US Army Corp Eng, WES	6.5	350



IFSTTAR, France



Tongji Univ, China

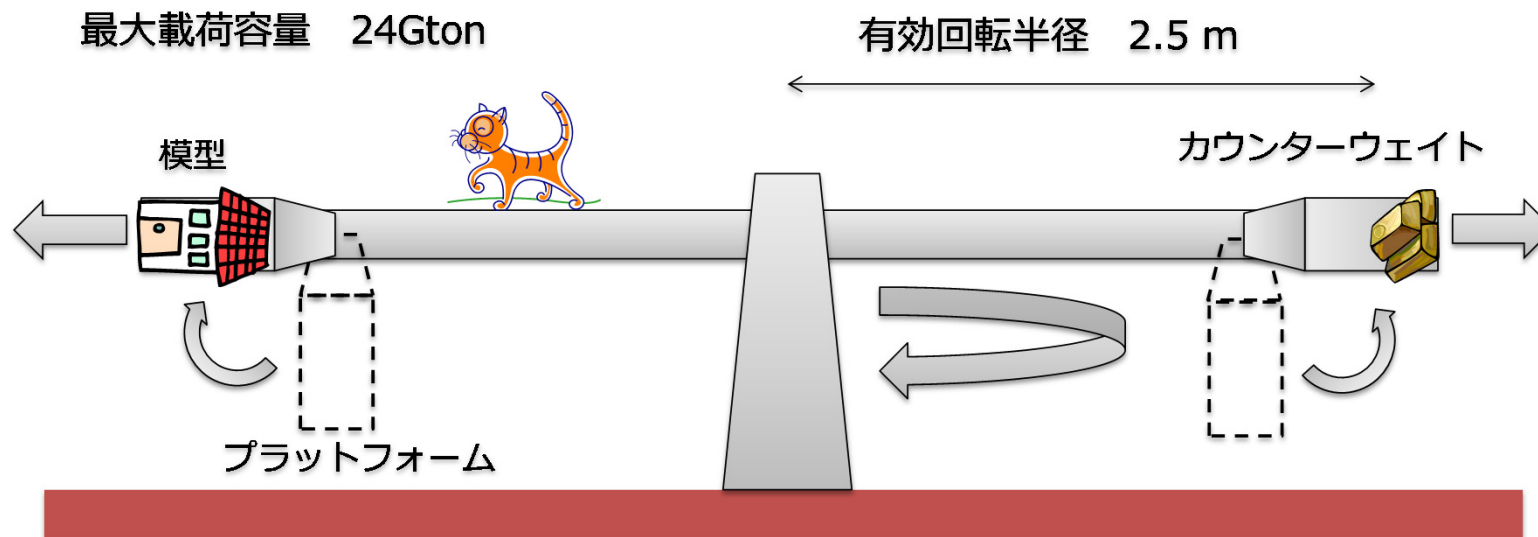


UC Davis, USA

本尊：遠心力载荷装置とは？

「地盤・構造物系の挙動を正確に把握するための模型実験に使用する装置」

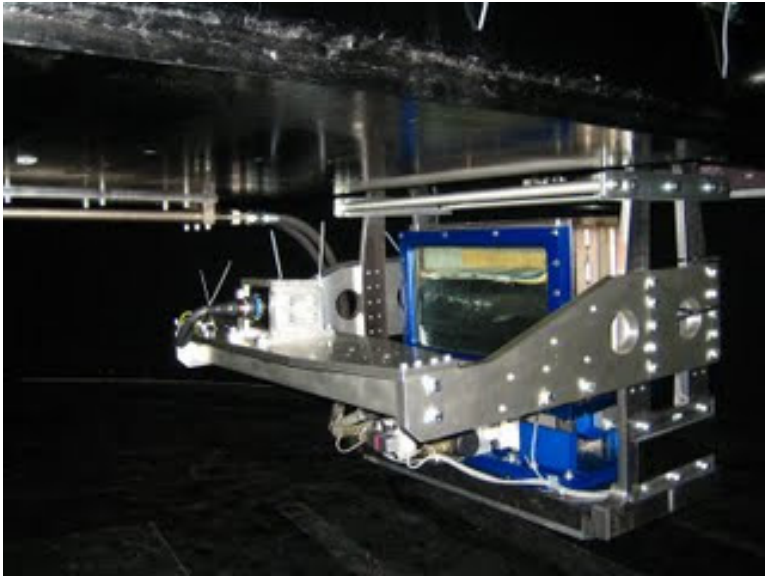
防災研究所の遠心力载荷装置（2号機2010年から）



ビーム型遠心力载荷装置

長所：模型作成が容易．装置の大型化が可能
短所：模型サイズが限られる

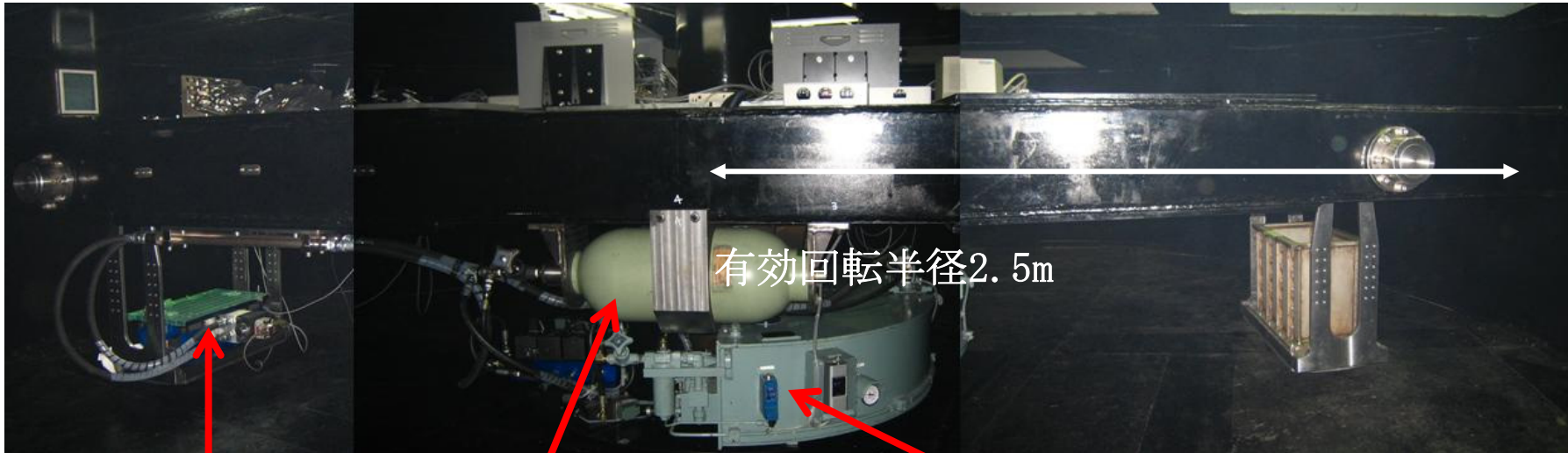
本堂：遠心力载荷装実験室 於京都大学防災研究所



プラットフォーム+土槽



この地下に本尊があります。



有効回転半径2.5m

振動台

蓄圧タンク

油タンクと油圧ポンプ

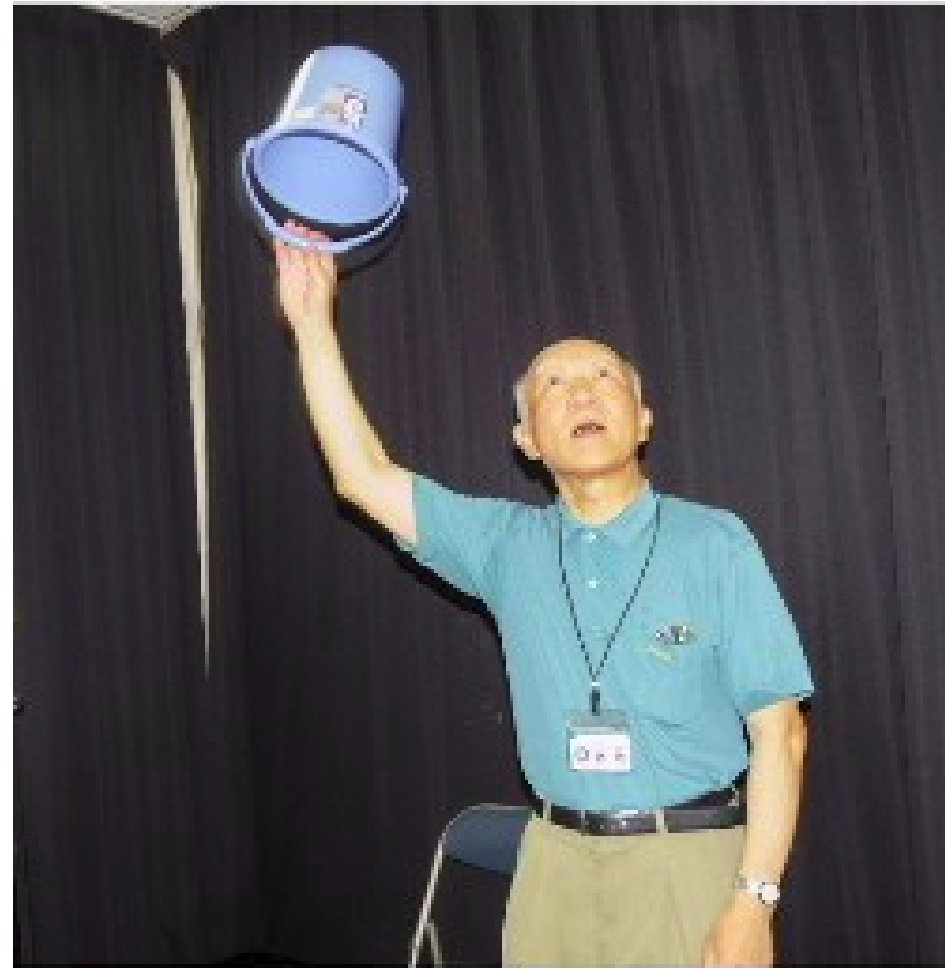
指導原理

(遠心実験の仕組み)

遠心模型実験では、模型に大きな遠心加速度を作用させます。このため、アーム先端のプラットフォームと呼ばれるブランコになっているところに模型を載せます。そしてアームを高速で回転させると、ブランコが遠心力で持ち上がってきます。

この時、ブランコに載せた模型は横向きになりますが、遠心力が外向きにかかっているため、模型は落ちてきません。ちょうど水の入ったバケツを手で持って、体ごとぐるぐる回ると一緒です。

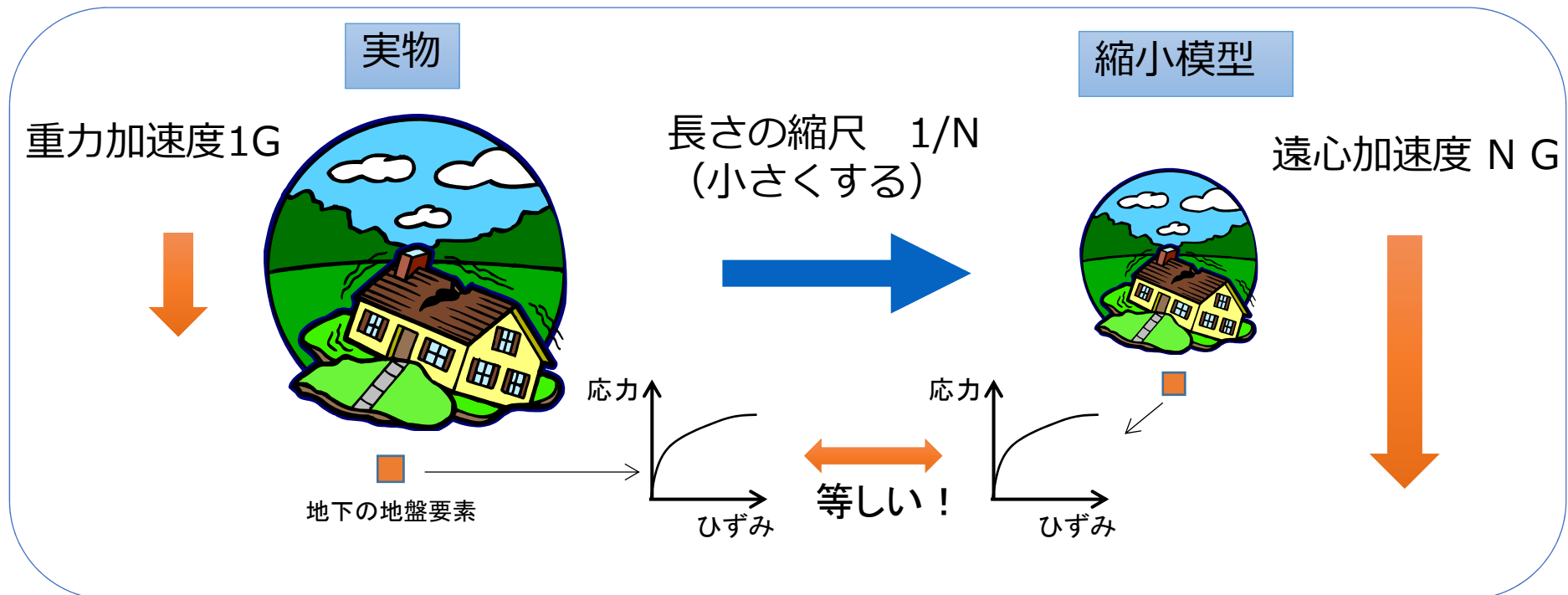
回転速度が上がってくると、バケツは横向きになりますが、遠心力により水はこぼれませんが、これと同じ原理です。



これはいつも受ける、大騒ぎ

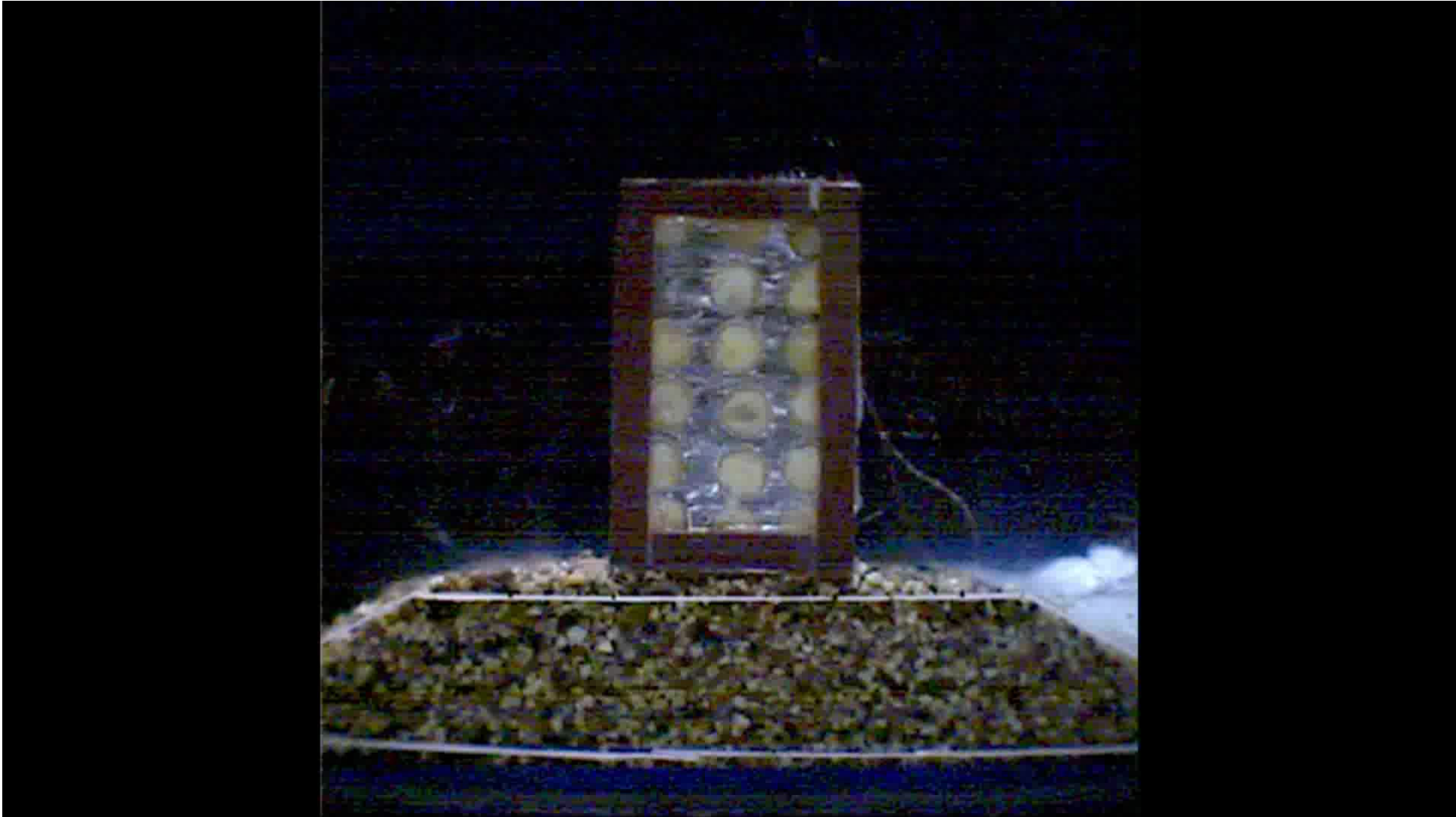
遠心力载荷装置がなぜ必要か

- 相似則により拘束圧依存性を示す土の**応力-ひずみ関係**を忠実に再現
- 大規模な土木・建築構造物の挙動を**縮小モデル**で再現



	実物		遠心場模型	1G場模型
地盤 (模型)	<p>z</p> <p>$\rho g z$</p> <p>ρ: 密度</p>	<p>相似則 ⇒ 1/Nに縮尺する</p>	<p>z/N</p> <p>$\rho g z$</p>	<p>z/N</p> <p>$\rho g(z/N)$</p>
作用する 重力/遠心 加速度	1 G		N G (N>1)	1 G
深さzの上載圧 (拘束圧)	$\rho g z$		$\rho(Ng)(z/N) = \rho g z$	$\rho g z / N$
応力-ひずみ 関係	<p>応力σ</p> <p>ひずみγ</p>		<p>応力σ</p> <p>ひずみγ</p>	<p>応力σ</p> <p>ひずみγ</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>ポイント! 土の強度は拘束 圧に大きく依存す る!</p> </div>

津波防波堤の転倒



2011年東北地方太平洋沖地震・津波による釜石湾港防波堤の被災

飽和傾斜地盤を対象とした遠心模型実験における 半径方向の遠心力場の影響

A part of the following contents have been submitted to the special issue for LEAP in “Soil Dynamics and Earthquake Engineering.”
(5/19/2016)

国際プロジェクト

LEAP (Liquefaction Experiment and Analysis Project)とは？

VELACS Project (Arulanandan & Scott 1993-1994)の21世紀版

Arulanandan K, Scott RF (1993-1994). "Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems," Proceedings of the International Conference on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Vols. 1 and 2, A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

強い非線形性を有する地盤振動問題(液状化地盤)に対する数値解析コードの妥当性の検証

と

一斉試験による飽和砂地盤の遠心場模型振動実験

参加機関

京大, 東工大, 愛媛大, UC Davis(USA), RPI(USA), GWU(USA), Cambridge(UK), Ziejian(China), NCU(Taiwan)

遠心模型実験における誤差の要因

- **半径方向の遠心力の影響**(地盤内鉛直応力の不均一性)
- 加振または2次圧密時の載荷速度の影響
- 砂と構造物模型の寸法効果
- コリオリ力(りよく)

本研究で検討したこと

- LEAPに関する一斉実験+ α
- 飽和**傾斜**地盤に対する振動実験
- 傾斜地盤の地表面形状を「**曲面**」と「**平面**」にした場合の比較

傾斜模型地盤の断面と加速度計、水圧計の設置位置

(a) 曲面モデル

(b) 平面モデル

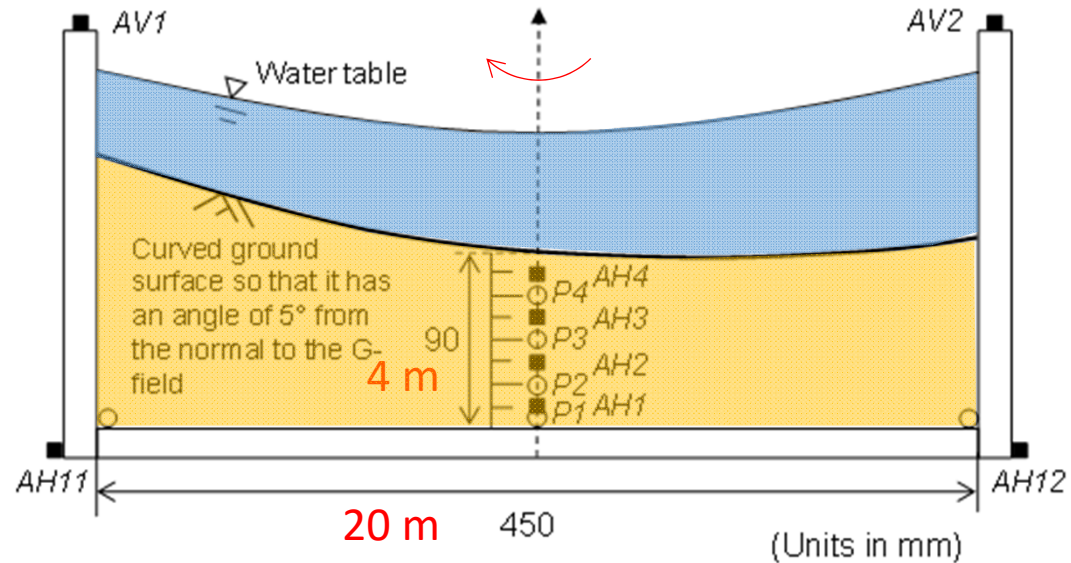
加速度, 変位は下流向きを正とする

遠心場: 44.4 G

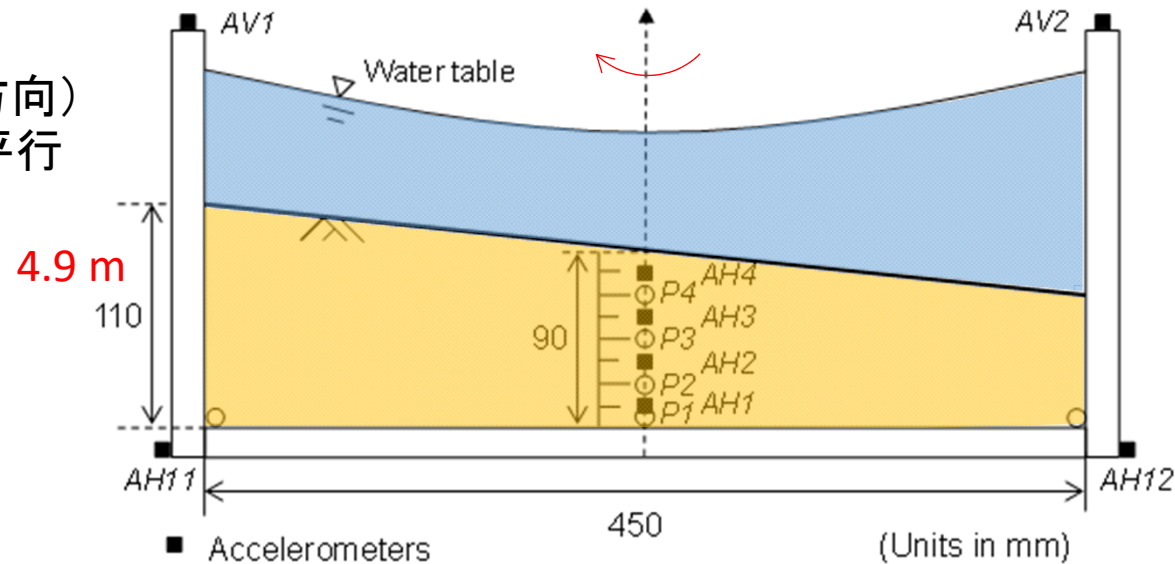
粘性流体: 44.4cSt

傾斜角: 5度

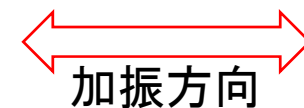
加振方向(斜面の傾斜方向)とアームの回転方向は平行



(a) Curved surface

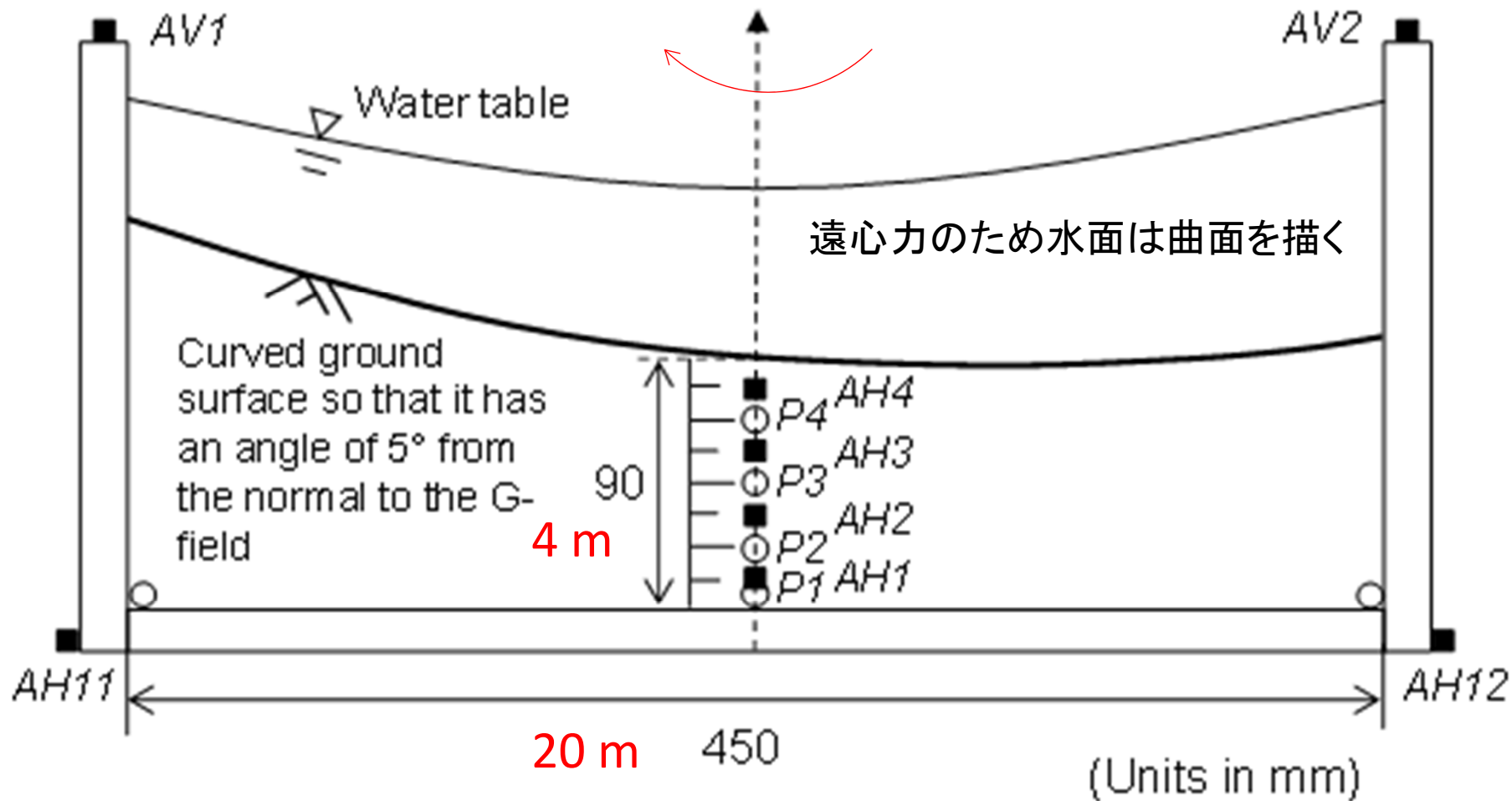


(b) Plane surface

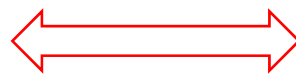


(a) 曲面モデル

こちらのモデルがより精密に実地盤を表現していると考えられる

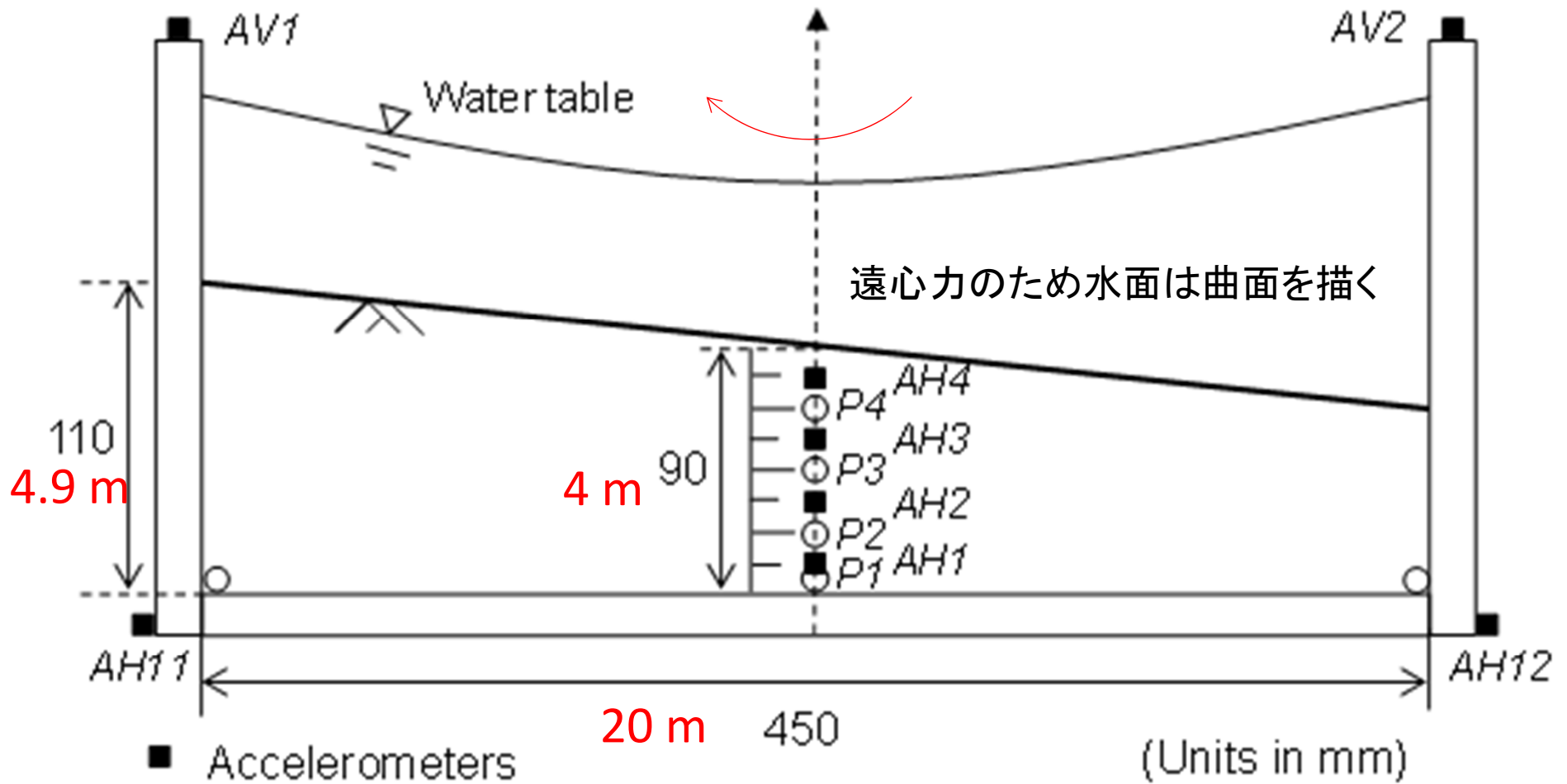


(a) Curved surface



加振方向

(b) 平面モデル 模型作成が容易なため、通常の実験に(特に断りなく)使われ、**数値解析の妥当性確認**にも使われることがある。



- Accelerometers
- Pore pressure sensor

(b) Plane surface

加振方向

加振ケース

加振は全部で5回
うち2回目と4回目が本加振

ターゲット最大加速度

1回目 : 0.015g

2回目 : 0.15g

3回目 : 0.015g

4回目 : 0.25g

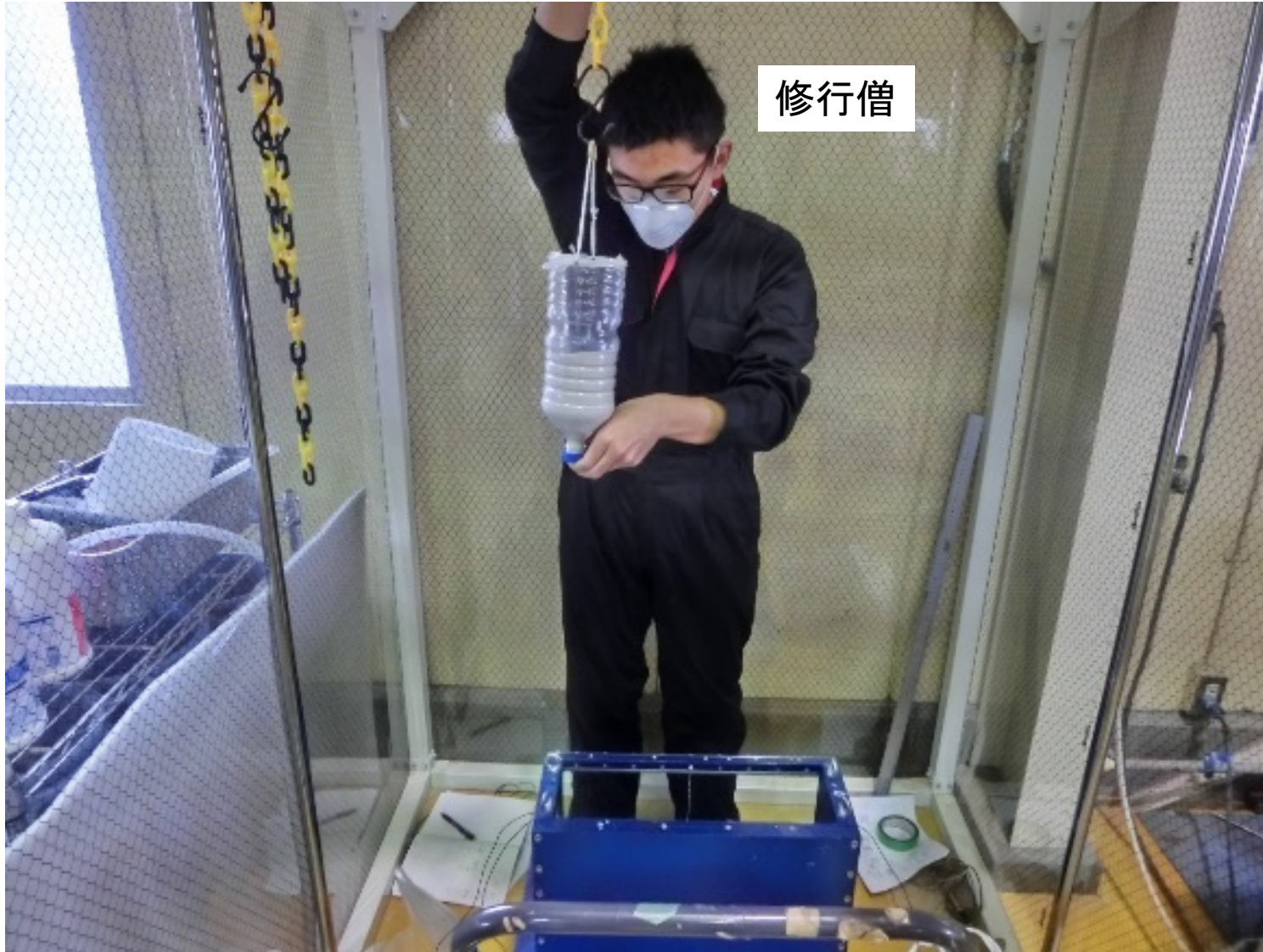
5回目 : 0.15g

Table 1(a) Event records for the test with **curved surface**

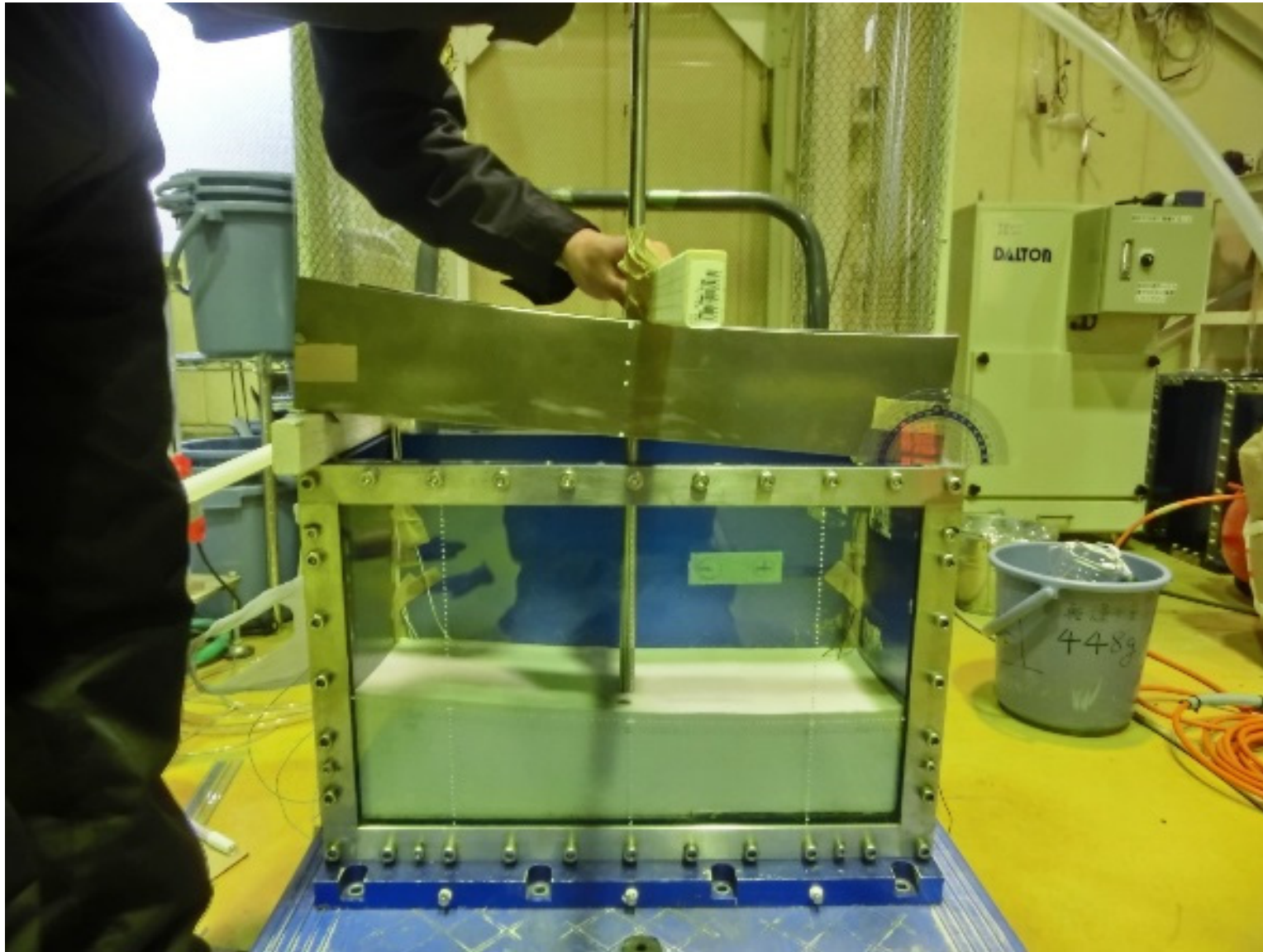
Event Number	Date	Description	Achieved Base Acc. (g_prototype scale)
DPRI_01_1	2015/01/07	Measure surface markers	-
DPRI_01_2		Spin up centrifuge	-
DPRI_01_3		CPT	NA
DPRI_01_4		Shake #1 ramped sine 1H, 0.015g	0.010
DPRI_01_5		Shake #2 ramped sine 1H, 0.15g	0.148
DPRI_01_6		Spin down	-
DPRI_01_7		Measure surface markers	-
DPRI_01_8		Shake #3 ramped sine 1H, 0.015g	0.011
DPRI_01_9		Shake #4 ramped sine 1H, 0.25g	0.258
DPRI_01_10		Shake #5 ramped sine 1H, 0.015g	0.015
DPRI_01_11		Spin down	-
DPRI_01_12		Measure surface markers	-

Table 1(b) Event records for the test with **plane surface**

Event Number	Date	Description	Achieved Base Acc. (g_prototype scale)
DPRI_02_1	2015/01/09	Measure surface markers	-
DPRI_02_2		Spin up centrifuge	-
DPRI_02_3		CPT	NA
DPRI_02_4		Shake #1 ramped sine 1H, 0.015g	0.010
DPRI_02_5		Shake #2 ramped sine 1H, 0.15g	0.149
DPRI_02_6		Spin down	-
DPRI_02_7		Measure surface markers	-
DPRI_02_8		Shake #3 ramped sine 1H, 0.015g	0.012
DPRI_02_9		Shake #4 ramped sine 1H, 0.25g	0.260
DPRI_02_10		Shake #5 ramped sine 1H, 0.015g	0.015
DPRI_02_11		Spin down	-
DPRI_02_12		Measure surface markers	-



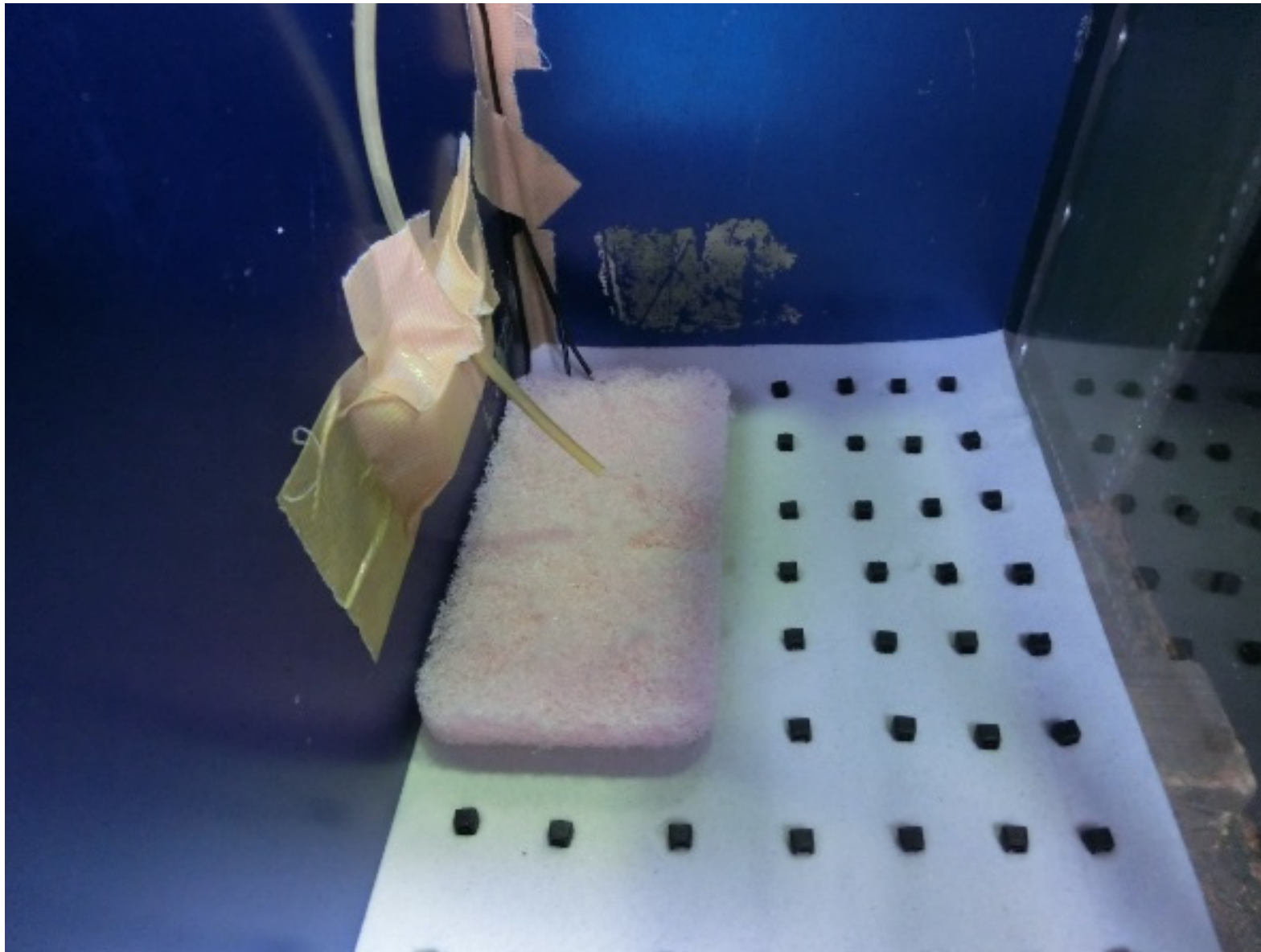
模型地盤の作成, 乾燥砂を所定の高さから落下させて均質な水平砂地盤を作る.



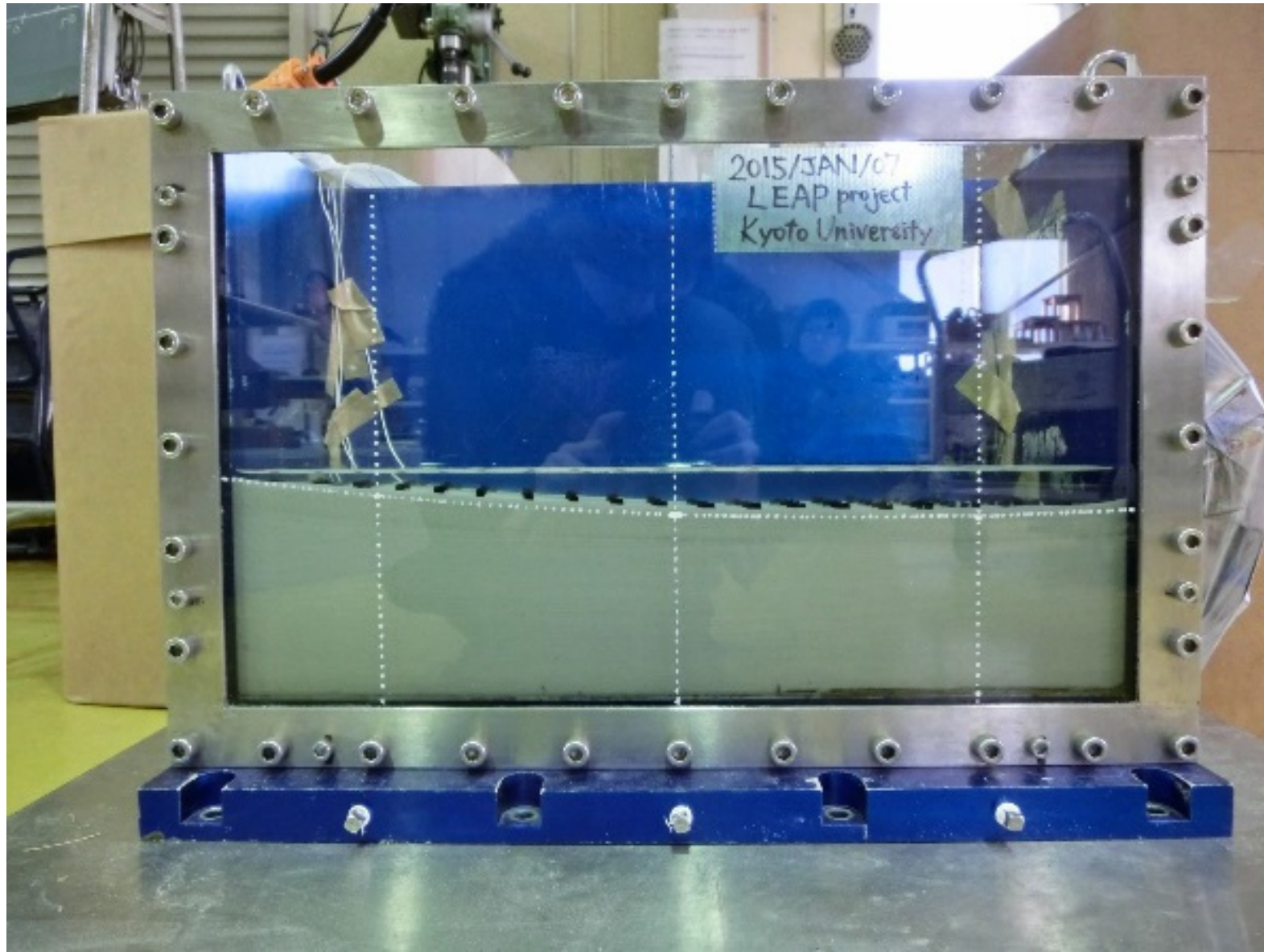
曲面モデルの作成には、半径2.5mの円弧を持つ金型を5度傾け、それに沿うように掃除機で砂を吸い取った。



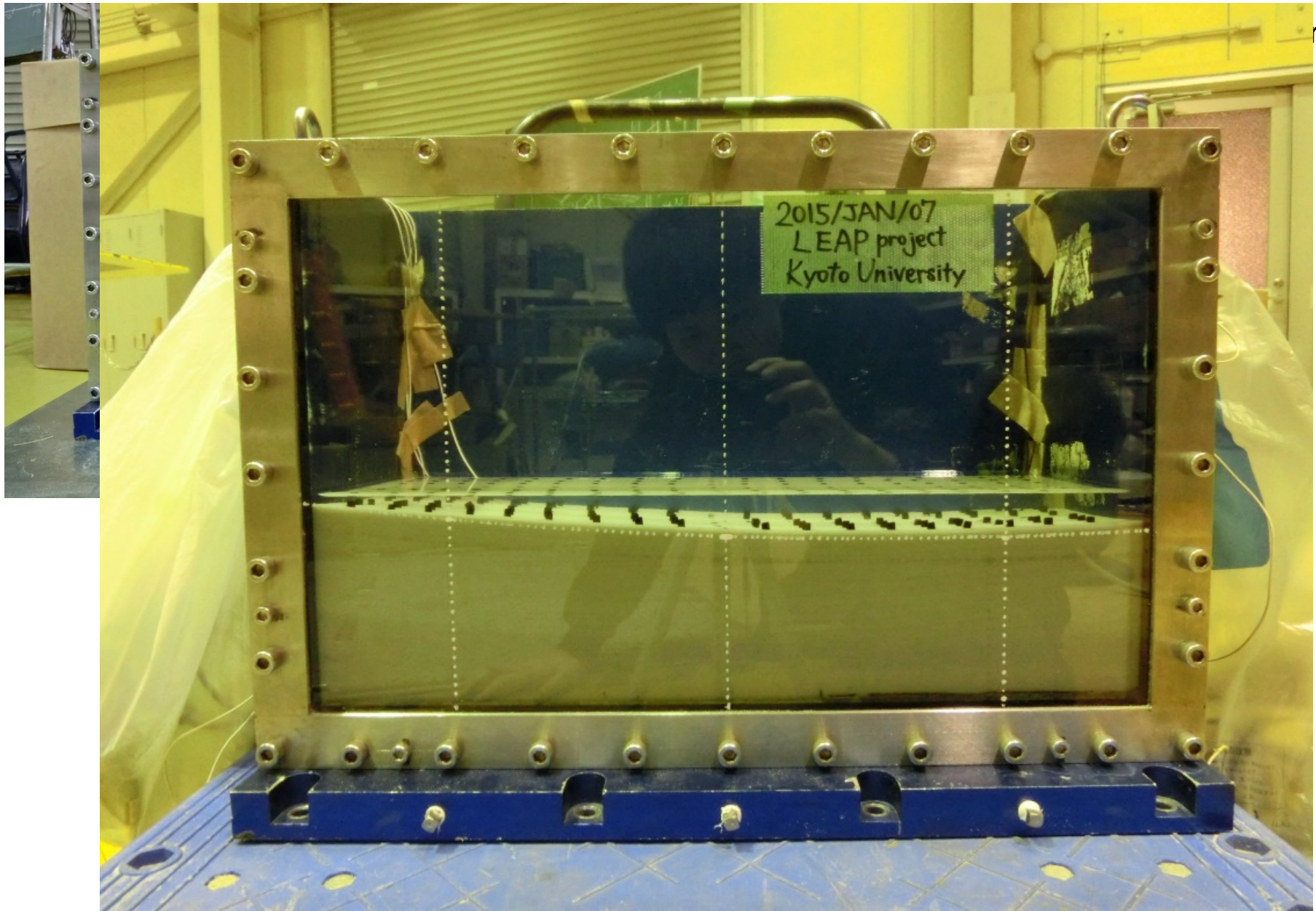
模型地盤を粘性流体で完全に飽和させるために、真空槽の中で間隙中の空気をいったんCO₂で置き換え、その後真空状態で流体を滴下する。



粘性流体の滴下の様子. しずくで地盤表面が乱されるのを防ぐためスポンジを引いている. 黒い点は地盤変位を計測するためのマーカー(プラスチック製)

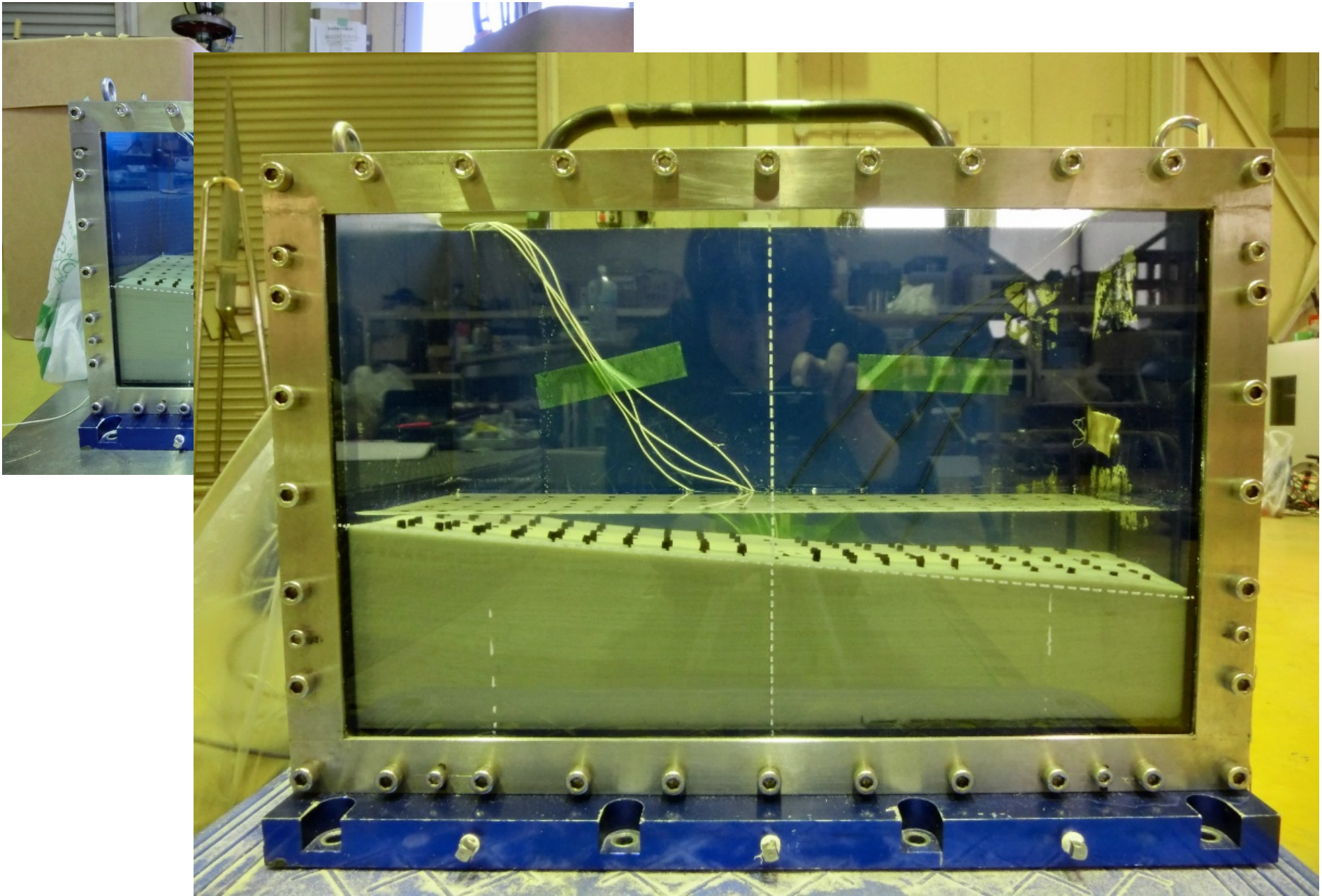


完成した曲面モデル



(b) After the test

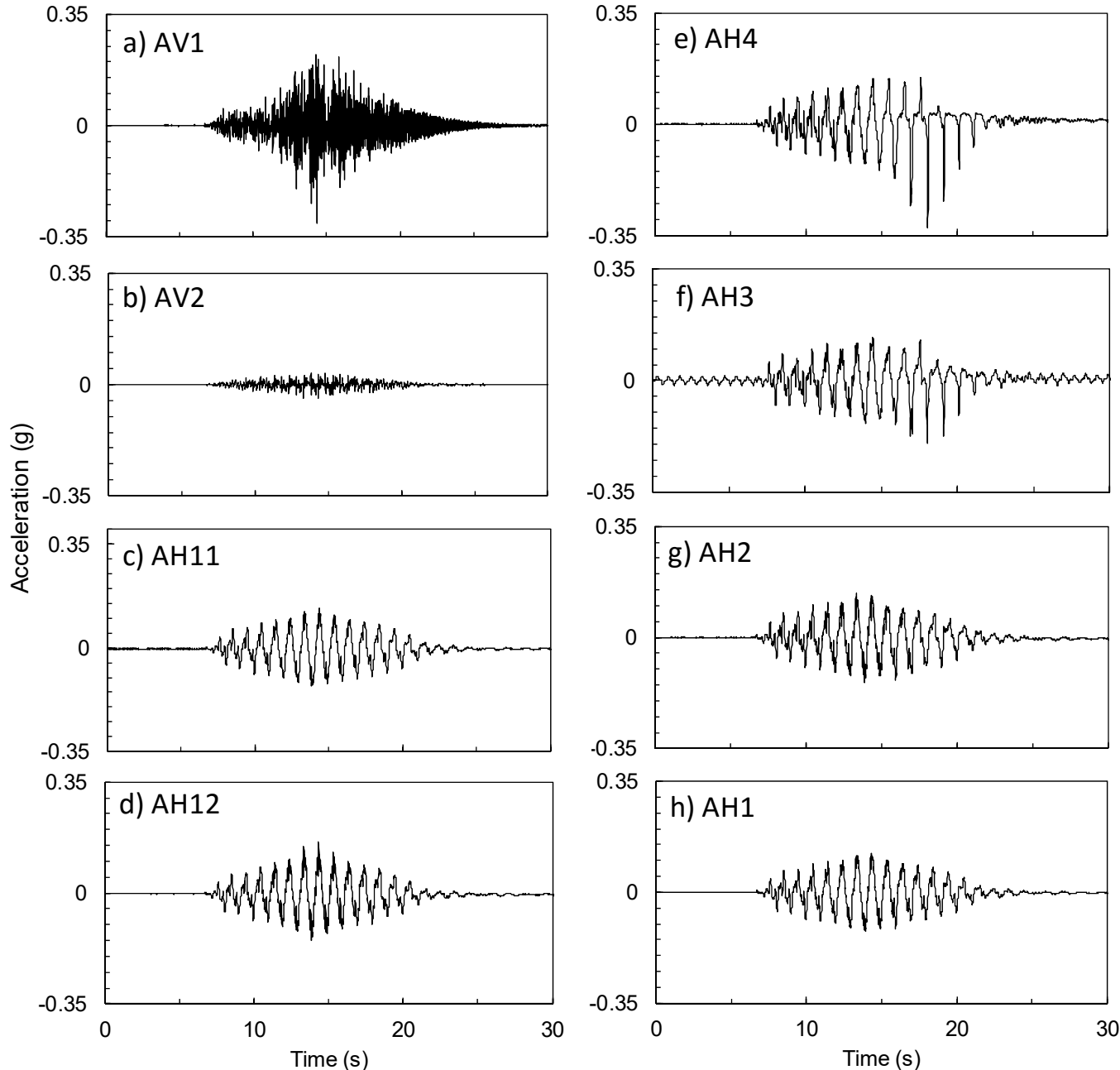
加振実験前後の地盤の状況(曲面モデル)



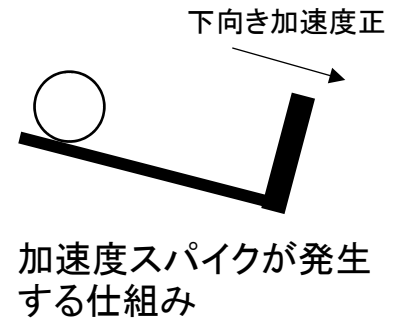
(b) After the test

加振実験前後の地盤の状況(平面モデル)

Curved surface :Motion #2

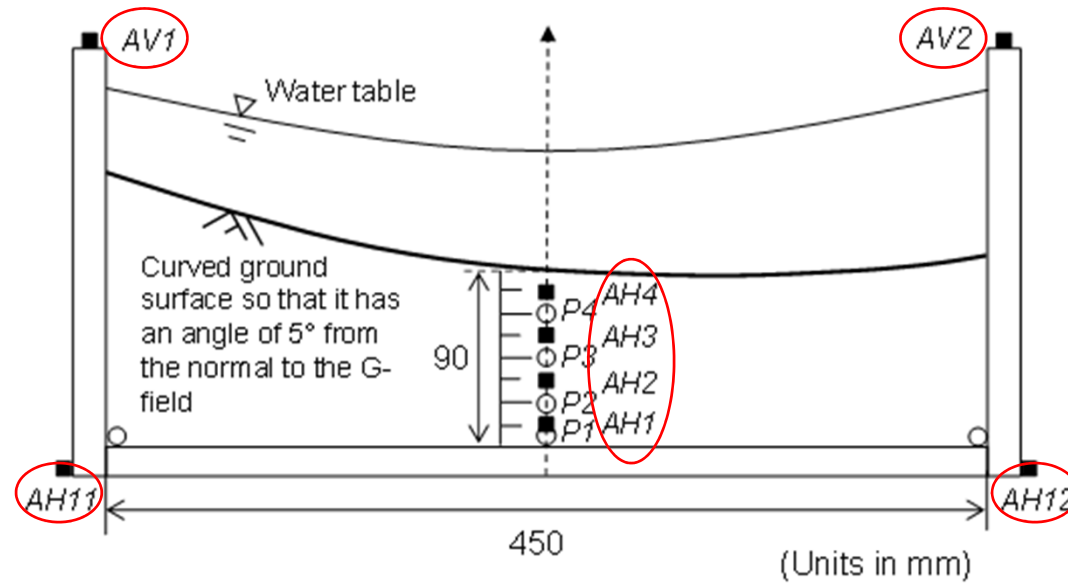


曲面モデルでは、地中加速度(AH1-4)の負側(上流側)に大きなスパイクが出ているが、正側にも明瞭なスパイクが見受けられる。
 つまり、地盤が体積膨張と収縮を繰り返しながら(=Cyclic mobility), **徐々に**下流側に変位している(=側方流動)ことがわかるがわかる。



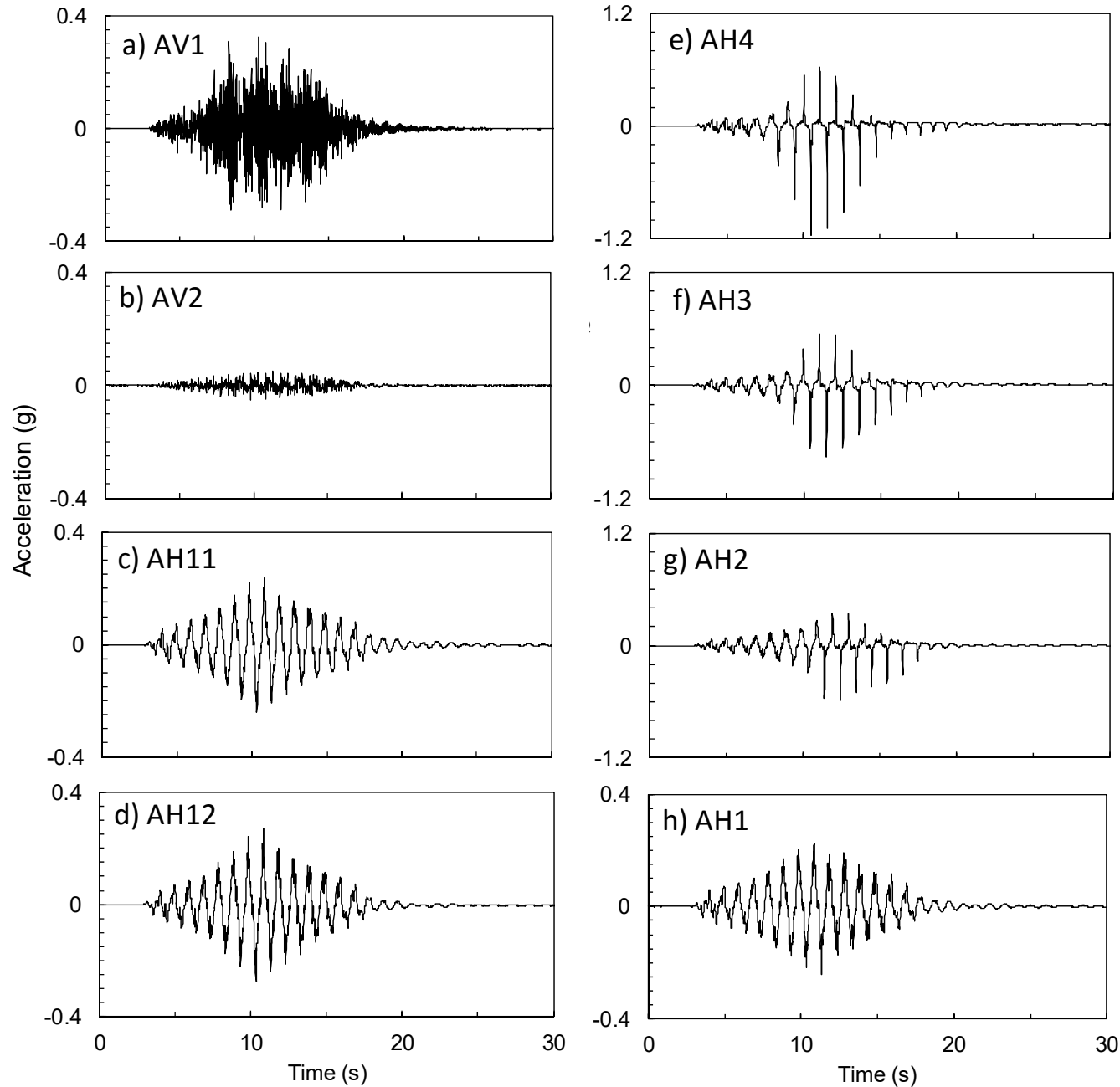
加速度時刻歴(曲面モデル)Motion #2

加速度計の設置位置



(a) Curved surface

Curved surface :Motion #4



曲面モデル:

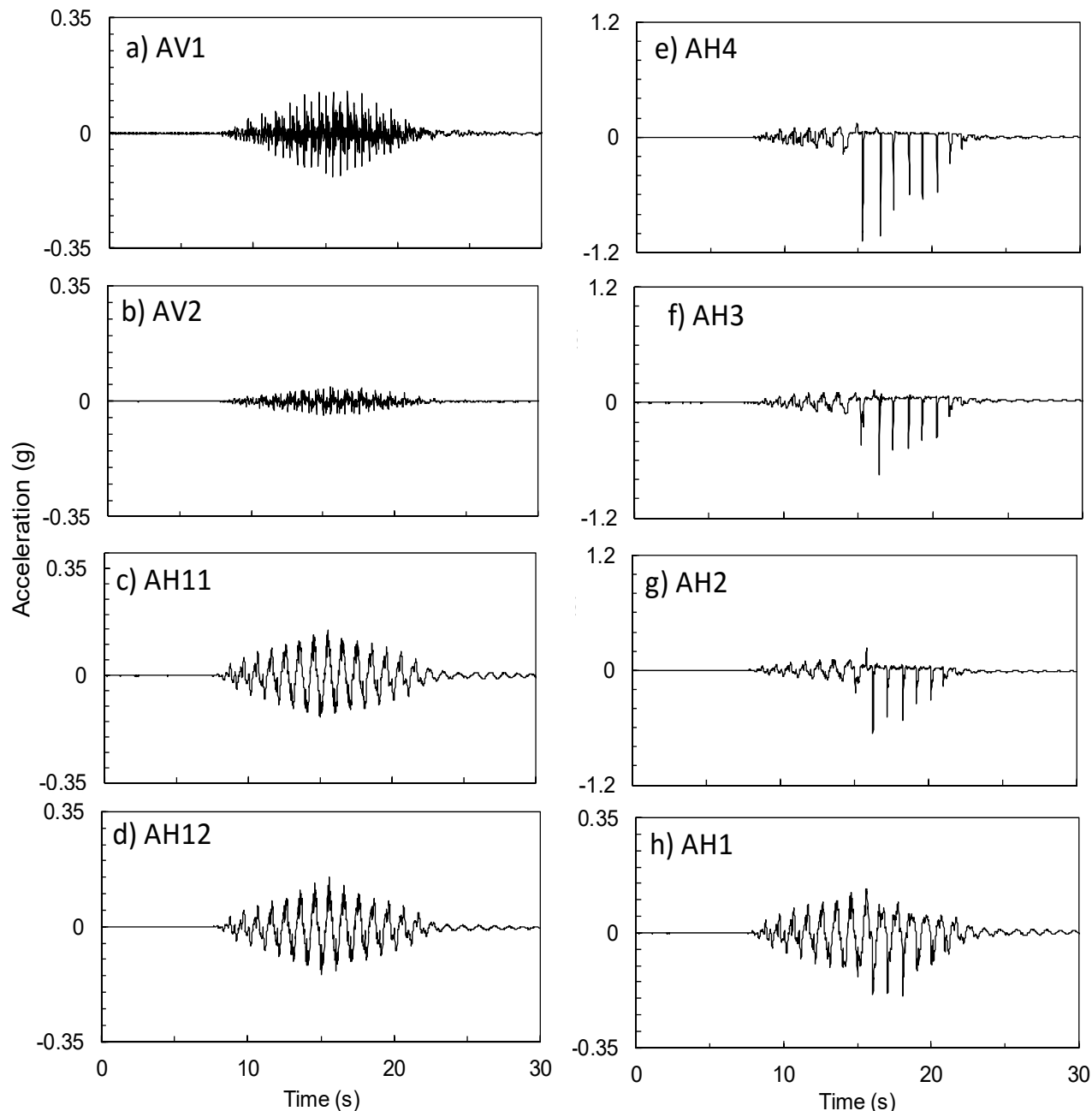
入力加速度が大きくなっても傾向は同じ.

地中加速度(AH1-4):

やや負側(上流側)に大きなスパイクが出ているが、正側にも明瞭なスパイクは見受けられる.

加速度時刻歴(曲面モデル)Motion #4

Plane surface :Motion #2

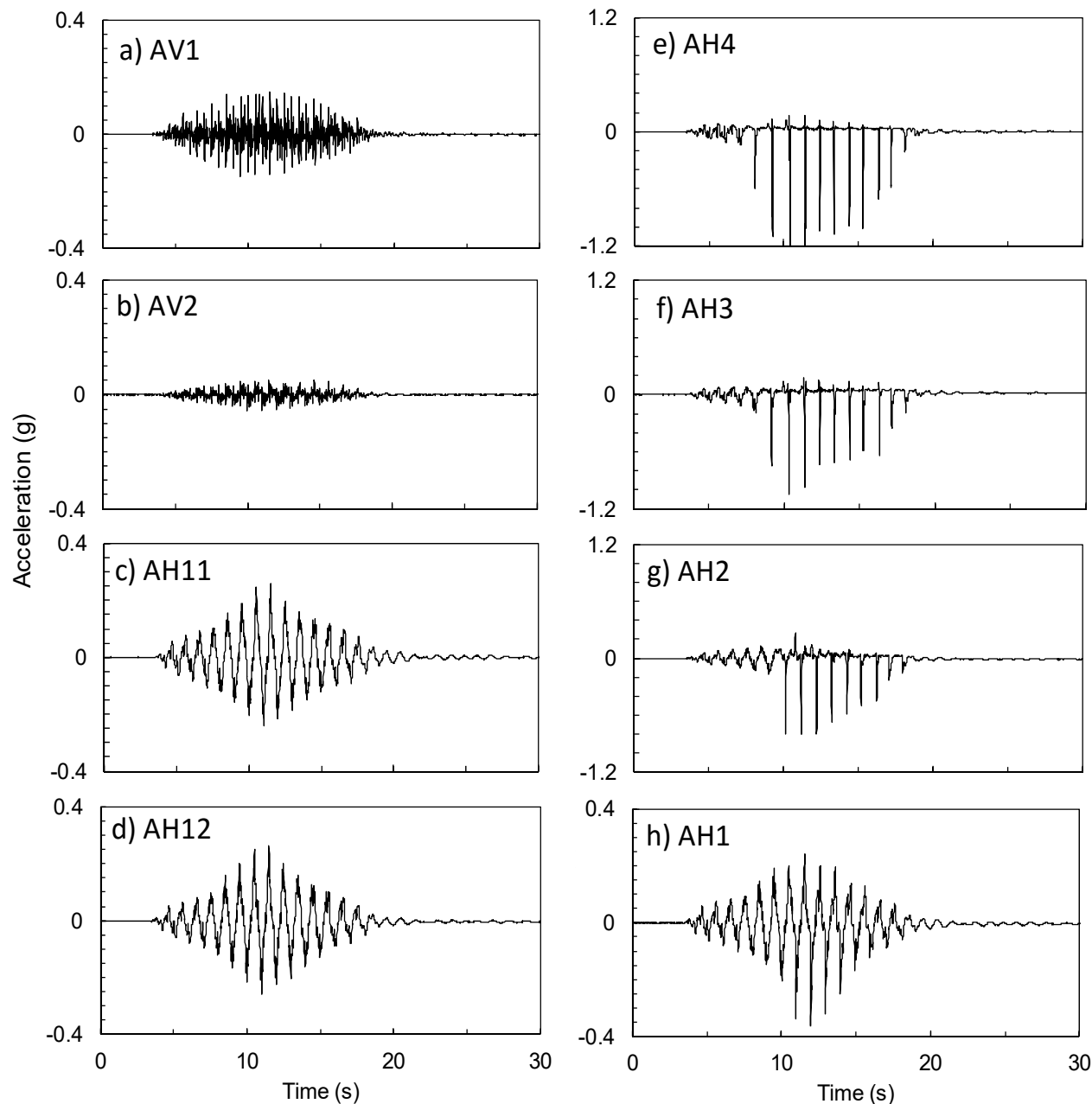


平面モデル:

地中加速度(AH1-4)の負側
(上流側)のスパイクが卓越し
ている。つまり、地盤は体積膨
張と収縮を繰り返しながら主と
して下流側に変位していること
がわかる。

加速度時刻歴(平面モデル)Motion #2

Plane surface :Motion #4

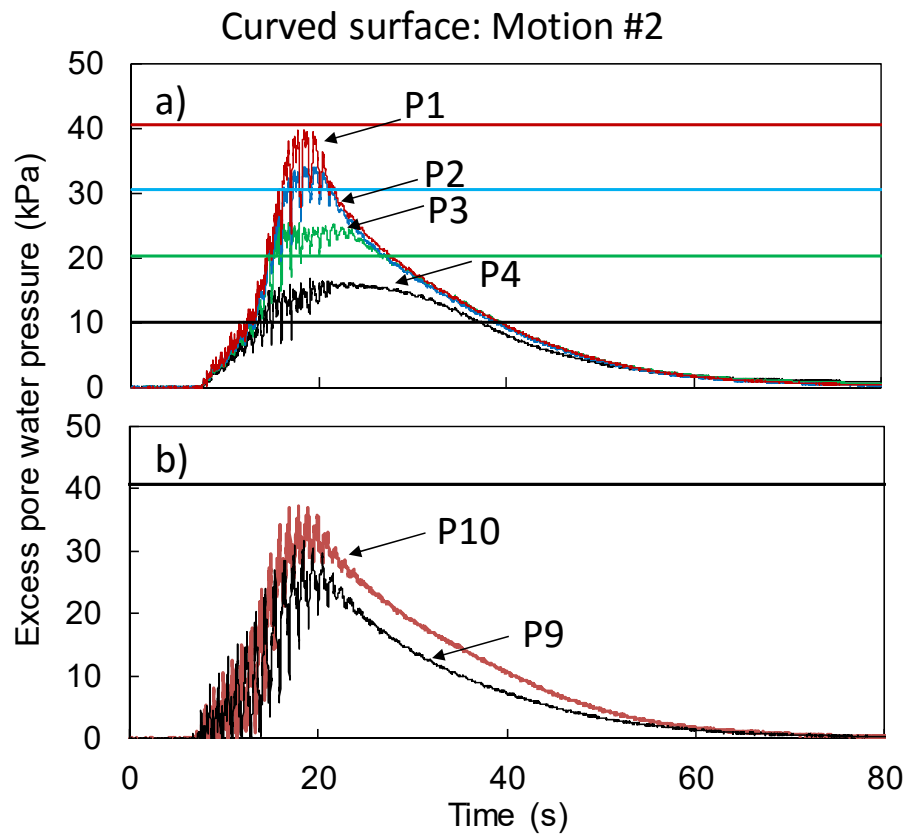


平面モデル:

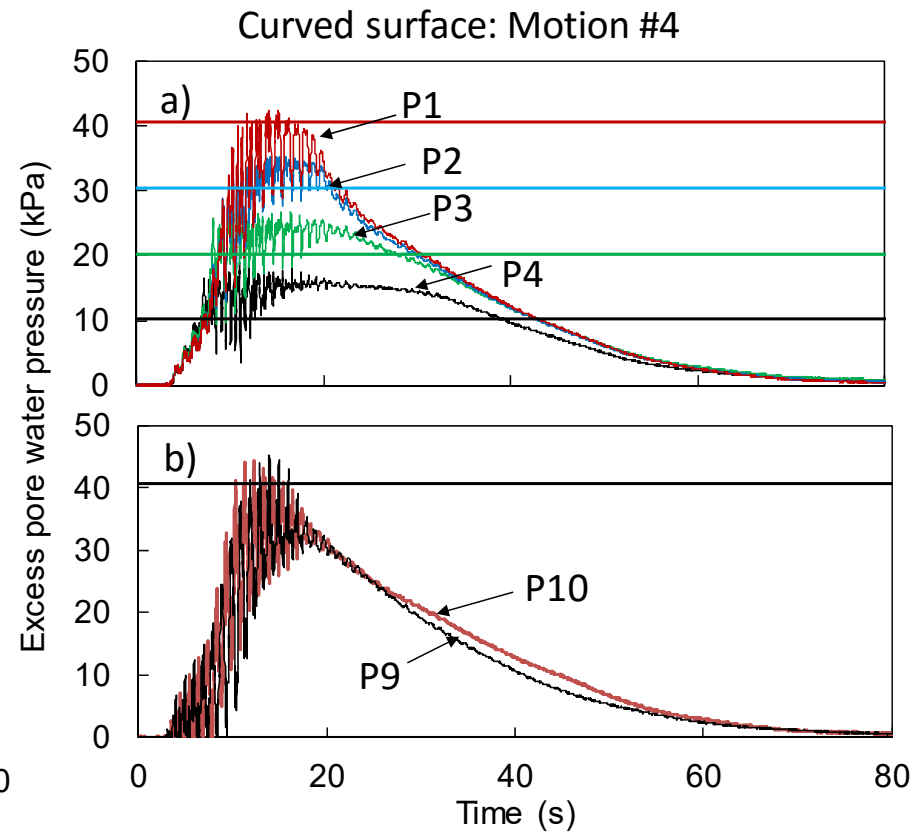
入力加速度が大きくなっても
傾向は同じ.

地中加速度(AH1-4)の負側
(上流側)のスパイクが卓越
している. つまり, 地盤は体
積膨張と収縮を繰り返しま
がら主として下流側に変位し
ていることがわかる.

加速度時刻歴(平面モデル)Motion #4



(a) Motion #2



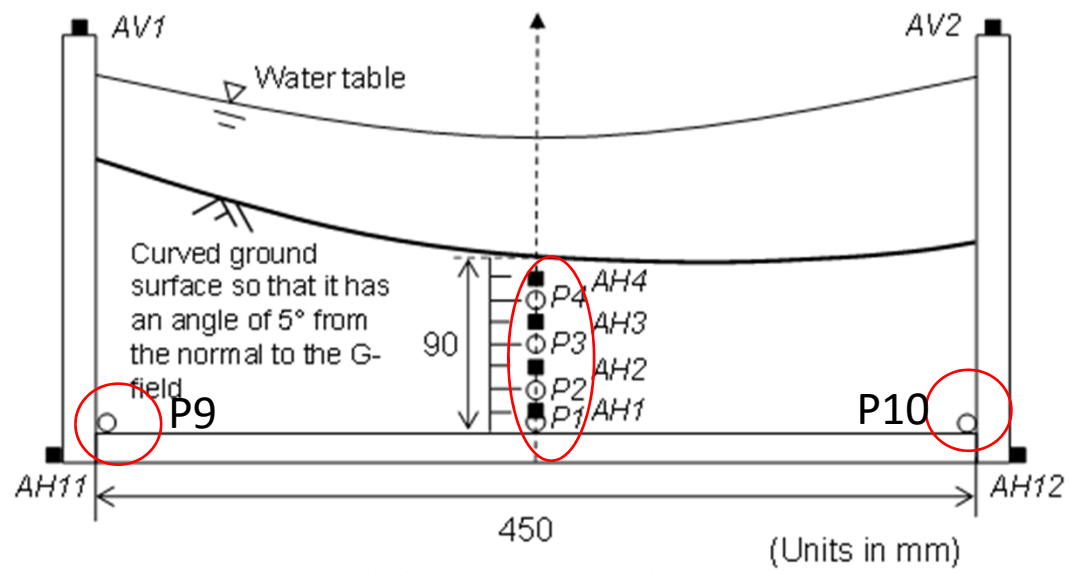
(b) Motion #4

過剰間隙水圧時刻歴(曲面モデル)

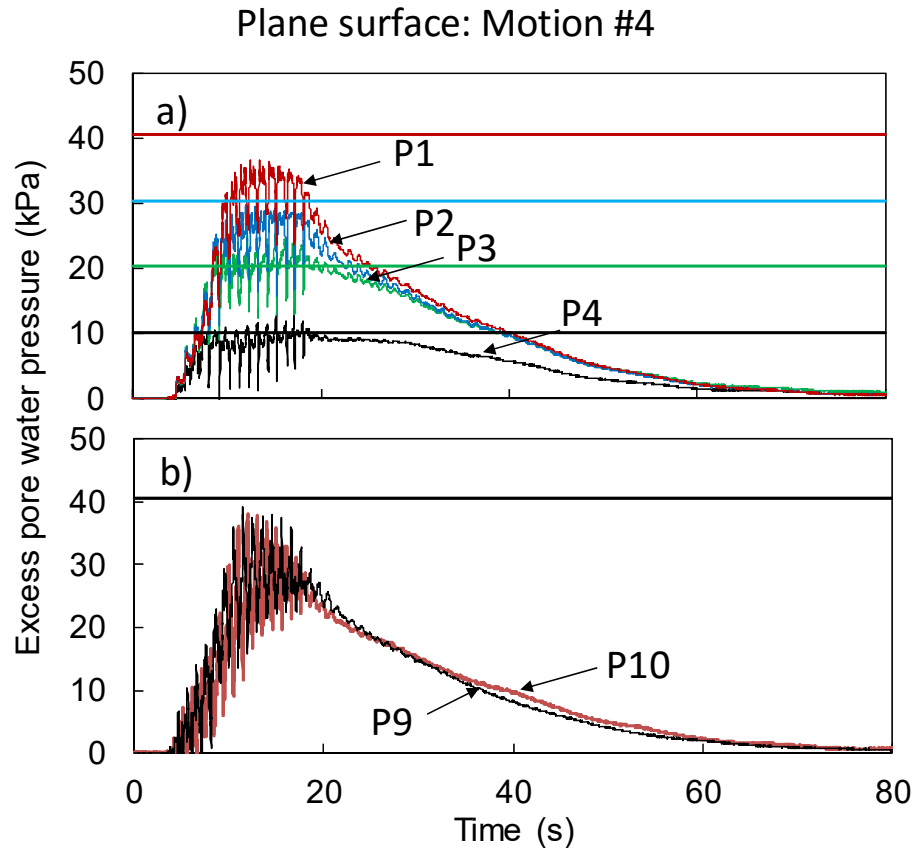
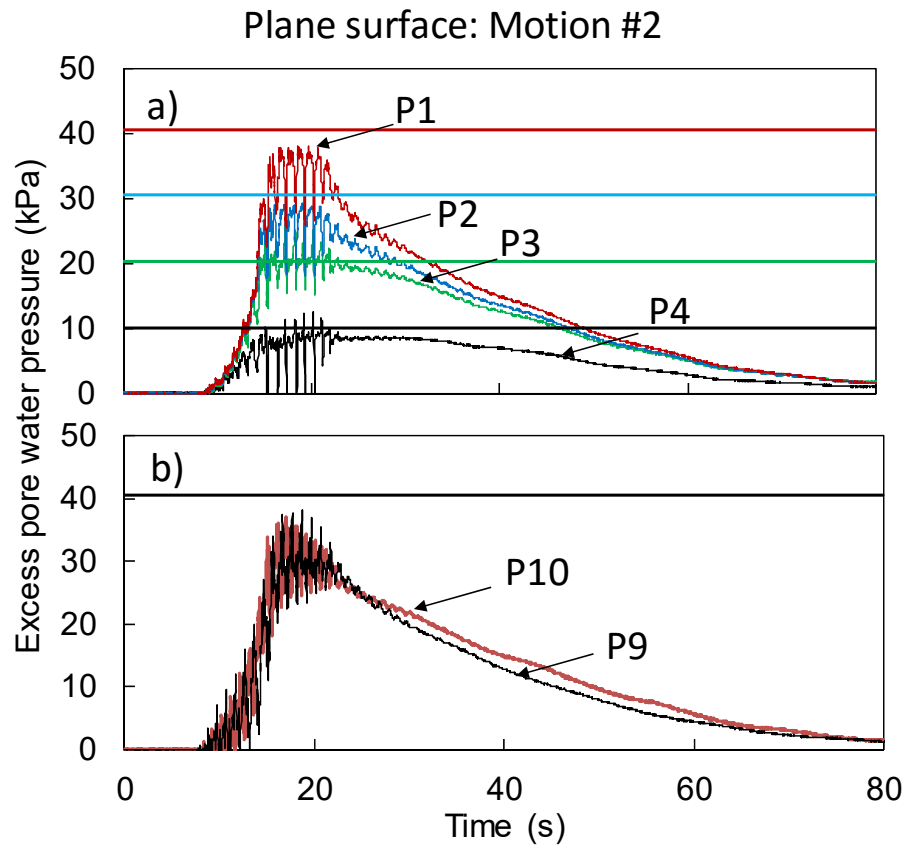
曲面モデル

浅い地点の過剰間隙水圧(P3とP4)の最大値は、初期の有効上載圧を大きく上回っている。これは地盤が流動したことにより、上載圧が増加したためか？不思議？

水圧計の設置位置



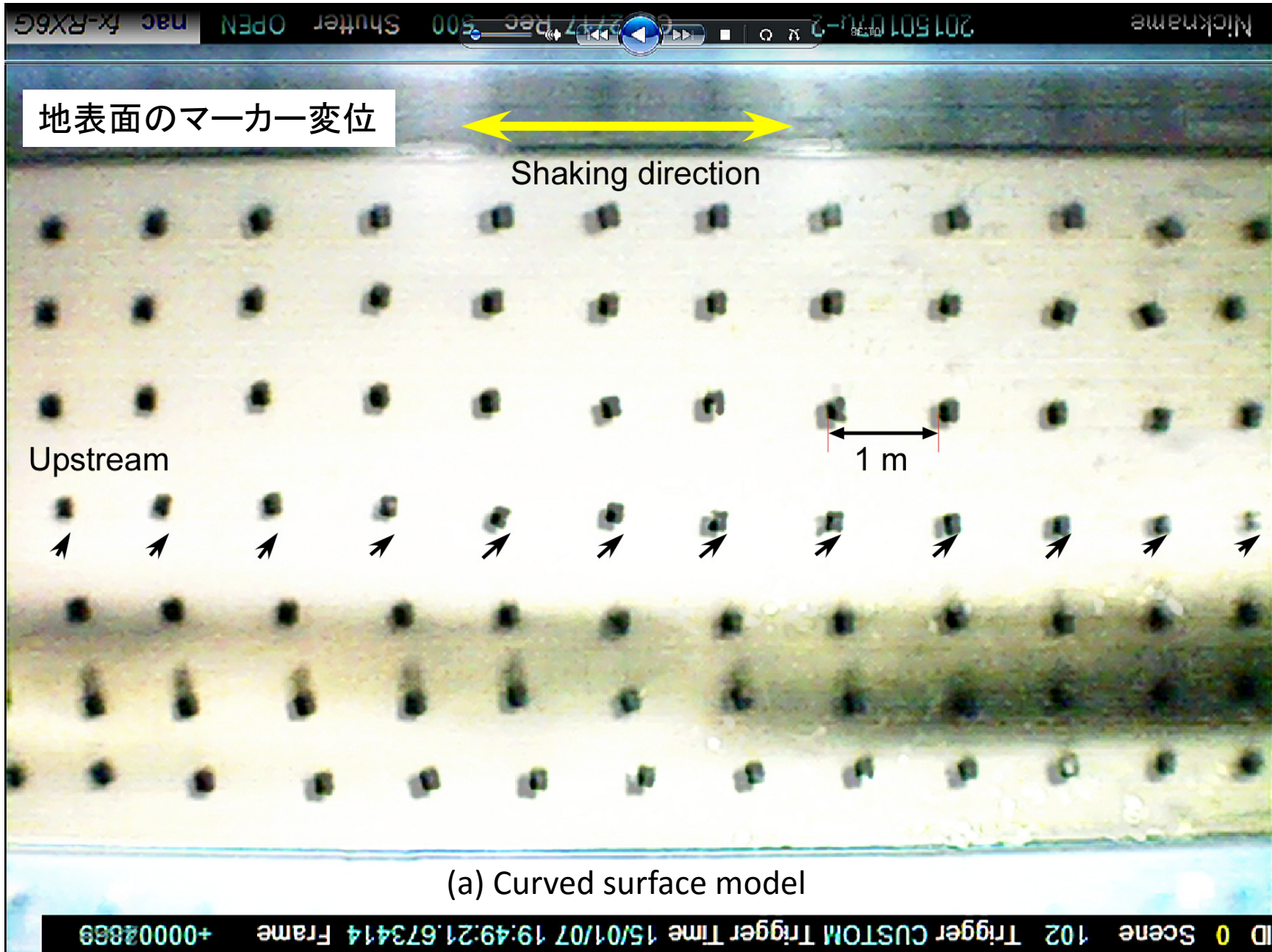
(a) Curved surface



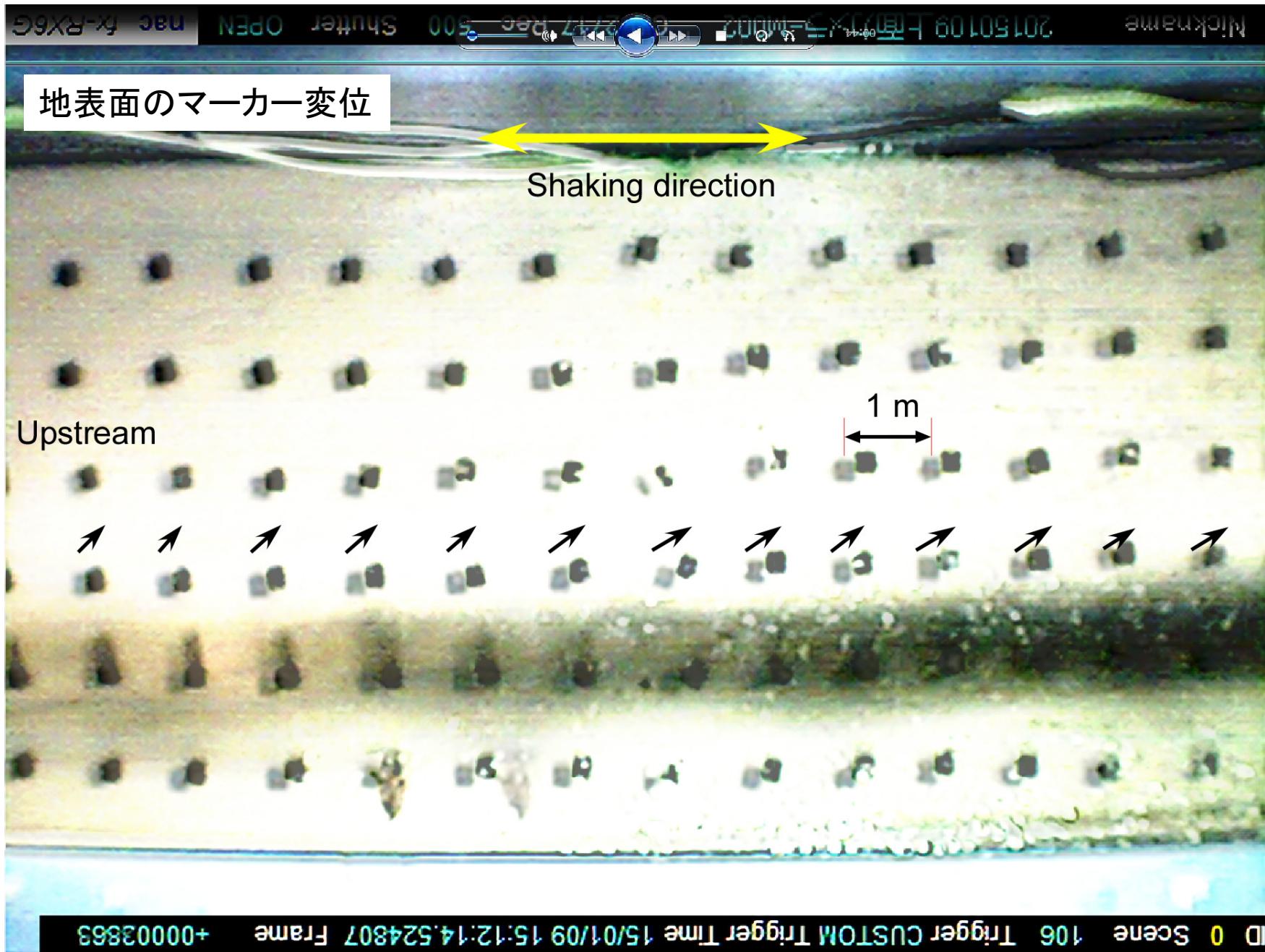
過剰間隙水圧時刻歴(平面モデル)

平面モデル

浅い地点の過剰間隙水圧(P3とP4)の最大値は、初期の有効上載圧付近に留まっている。地盤が流動しても、上載圧が増加していないことを示しているのか？



Motion #4前後の地変面の側方流動の状況(曲面モデル) 「一様に下流側に変位」?

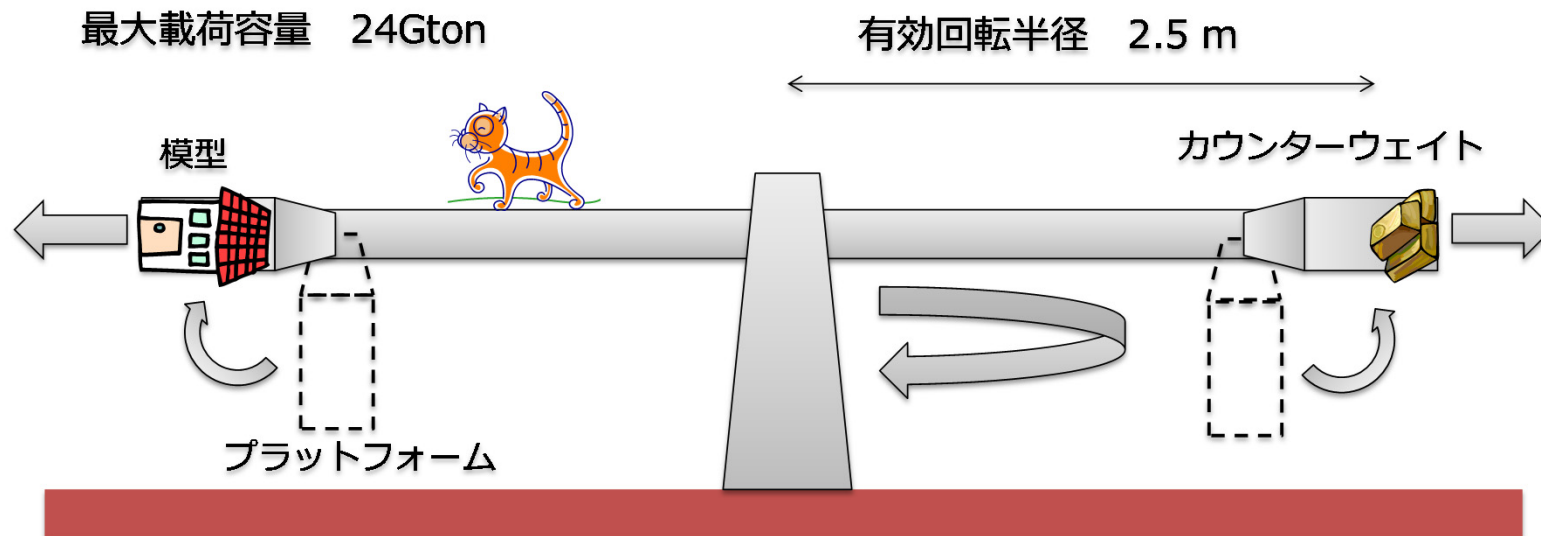


Motion #4前後の地変面の側方流動の状況(平面モデル)

マーカ変位が斜め下流方向！？

プラットフォームがきちんと上がっていないのか？

防災研究所の遠心力装置（2号機2010年から）

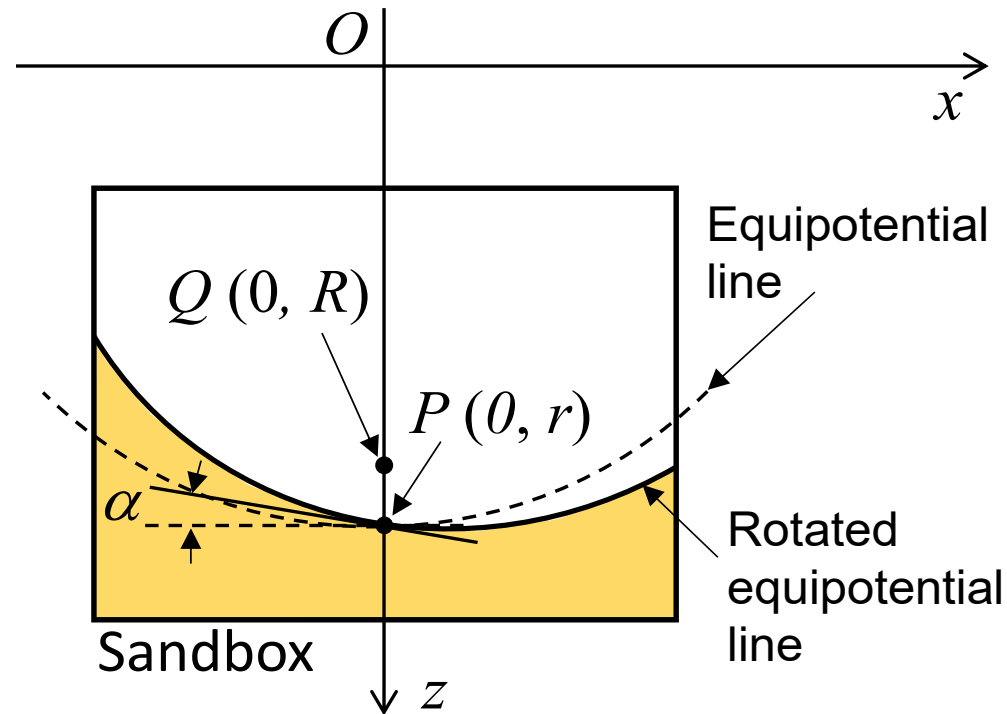


ビーム型遠心力装置

長所：模型作成が容易．装置の大型化が可能

短所：模型サイズに限られる

曲面を描く遠心場に対して傾斜地盤をいかにつくるか.

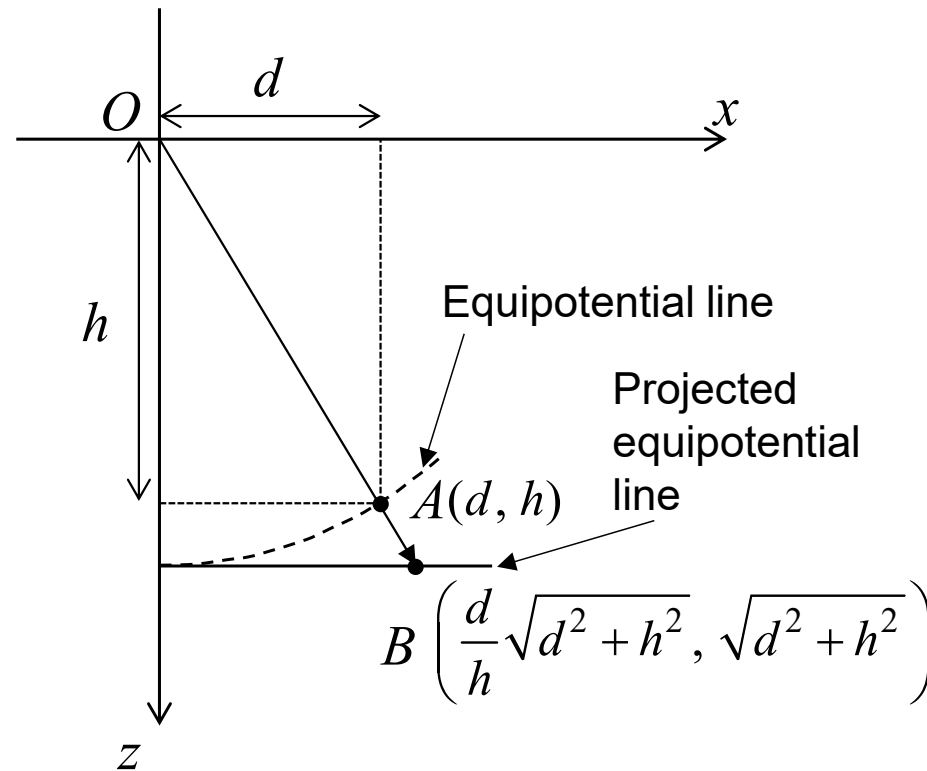


点(0, r)に関する座標変換

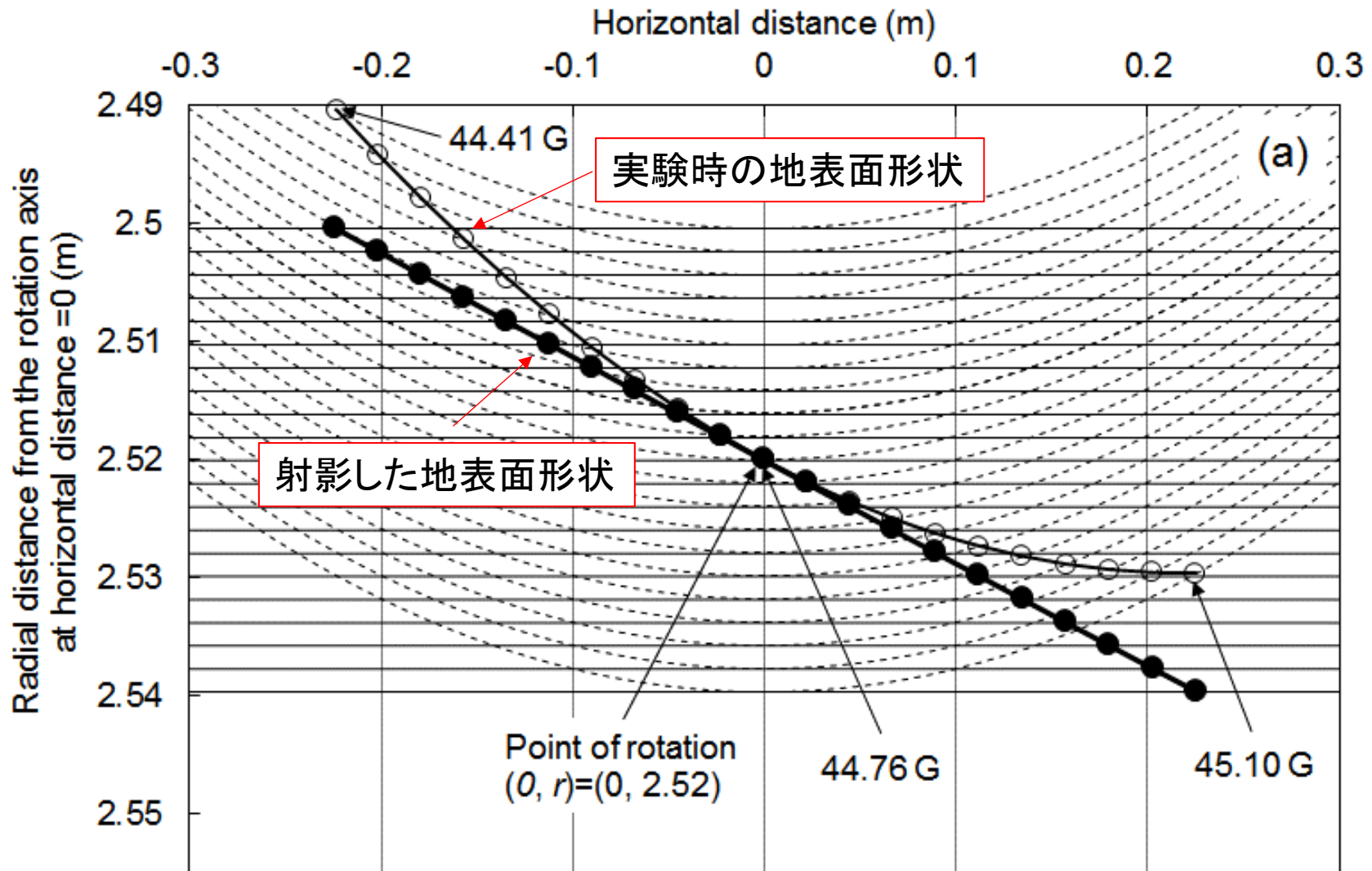
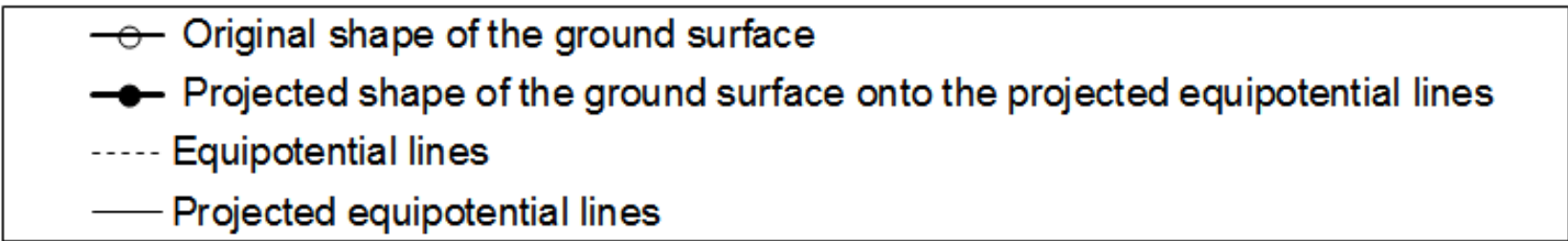
$$\begin{pmatrix} x' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z - r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ r \end{pmatrix}$$

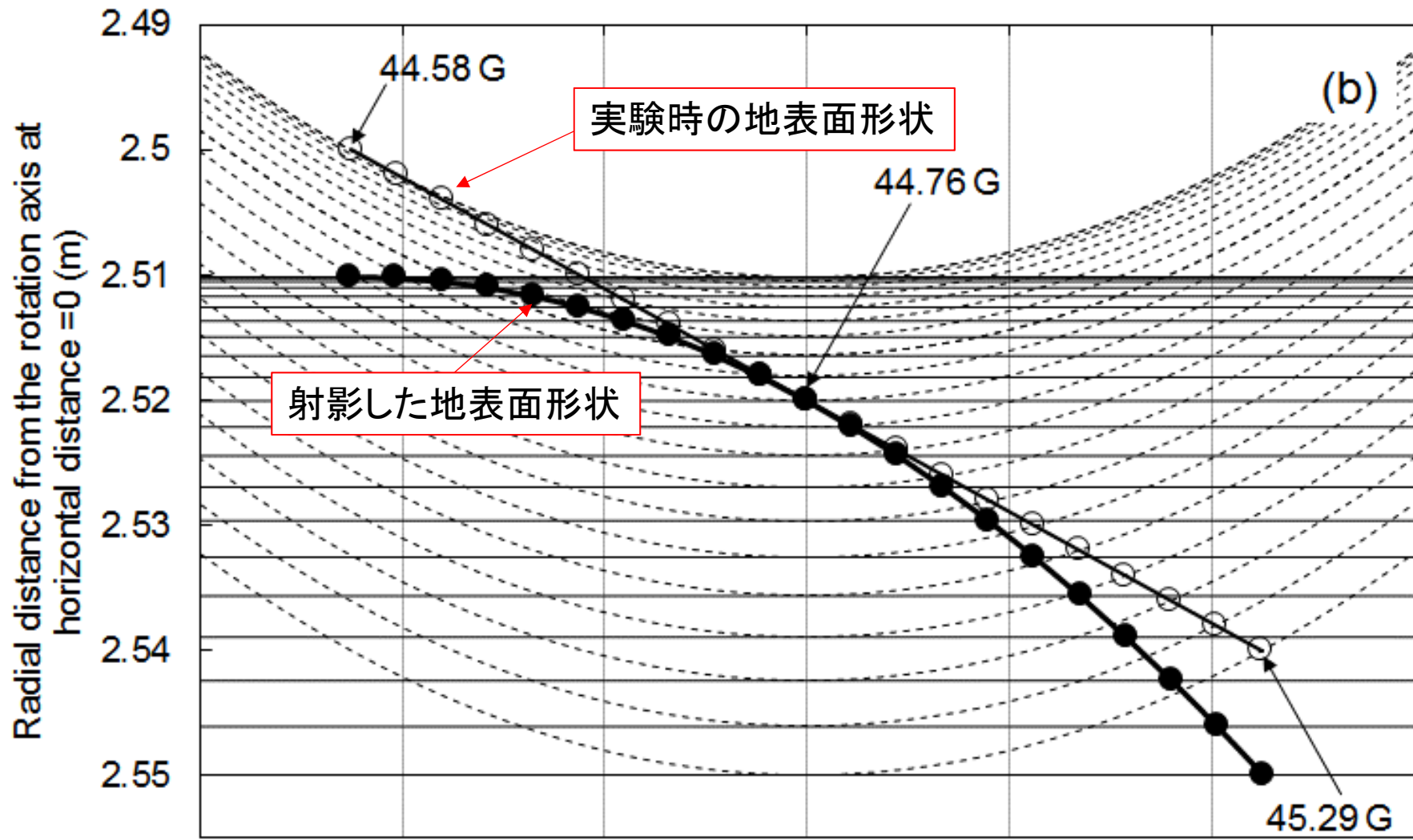
曲面モデルの作成方法

曲面を描く遠心力場を，平面上に投影してみる．こうすることで，実験模型がどのような重力場にあるのかがわかる．



曲がった等遠心力線の直線への射影





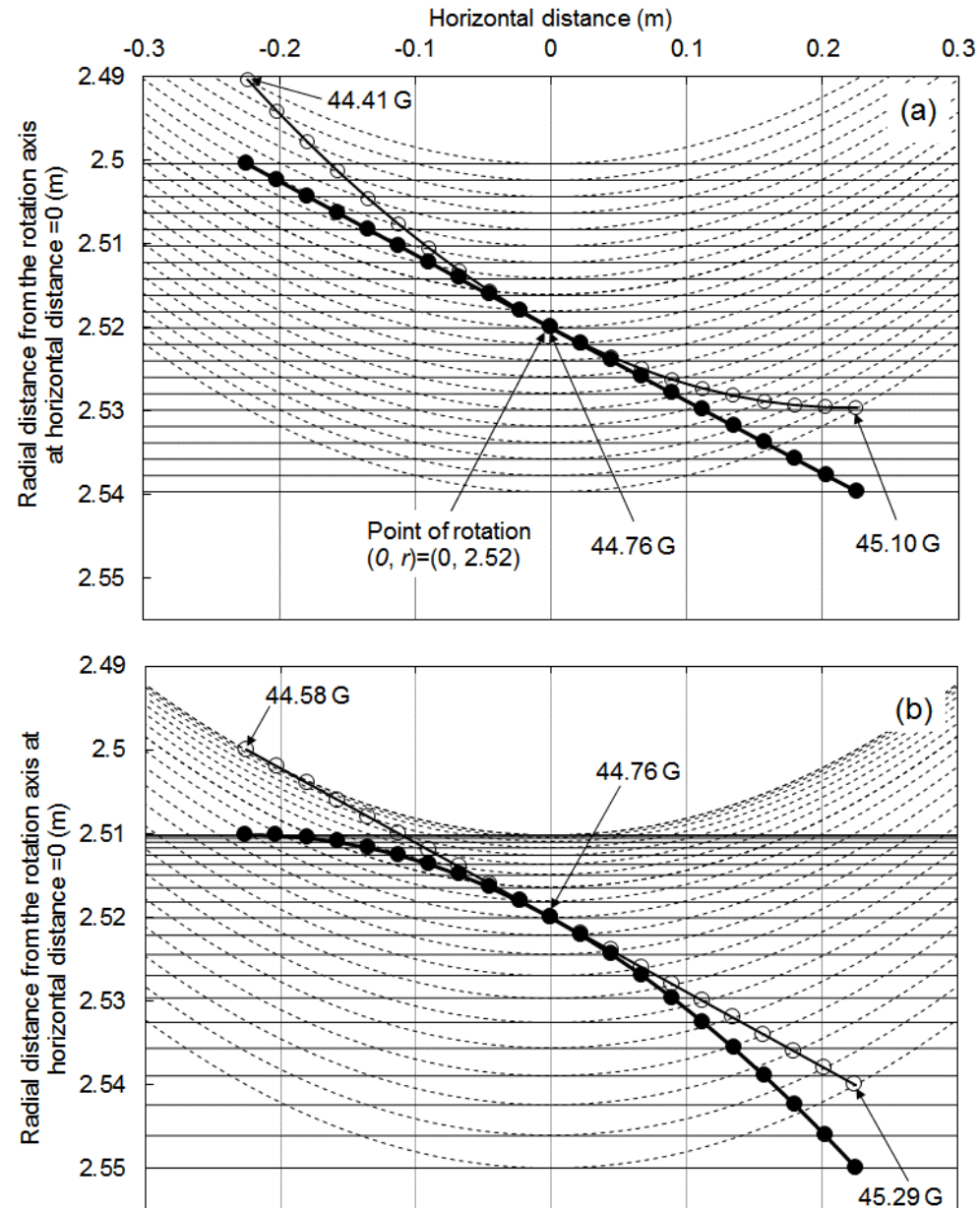


Figure 19 Original shape and projected the ground surface: (a) Curved surface and (b) Plane surface.

まとめ

教訓：常に批判精神を持っていれば，実験結果を盲信する遠心原理主義者にはならない

飽和傾斜地盤に対する振動実験を行い，斜面形状が「曲面」と「平面」の場合の応答の違いを比較した。

- サイクリックモビリティによる加速度時刻歴のスパイクの出方に明らかな差
- 「曲面」模型：過剰間隙水圧の最大値が初期有効拘束圧より大きくなる
- 「平面」模型：側方流動量がやや大きい
- いずれも模型も側方流動方向は斜め下流方向
- 等ポテンシャル面上では，「平面」模型の傾斜が下流に向かって急になる