

水平加振された2層粒子堆積層の挙動

東京農工大学 工学研究科

川喜田明宏 酒井保文 永田裕作 高木隆司

Dept.Mech.Eng, Tokyo Univ.Agric.Tech.

Akihiro Kawakita, Yasufumi Sakai, Yuusaku Nagata, Ryuji Takaki

1. はじめに

本研究の目的は、固体粒子と液体の混合系において、外部から振動を加えた場合の液状化を実験的に観察することである。今までの液状化に関する研究は、主として単層の単一粒子の堆積構造について行われてきた。しかし、実際の地盤は、様々な形態の粒子が層をなす複層複合粒子構造であり、2層間の境界での挙動を考慮する必要がある。さらに、今までの振動層(外部から加振された粒子堆積層をここでは振動層と呼ぶ)に関する研究では、その多くが空気中に粒子を配置した粒子気体系に縦振動を加えるものであった。それに対して、本研究の対象は粒子層が水で満たされている粒子液体系であることと加振が水平振動であることであることから、新しい現象の観察が期待される。

本研究では、粒子の運動が観察しやすいように奥行方向に薄い水槽を作成し、2つの層を堆積させ、外から水平振動を加えて、そこに生じる現象の特徴を調べた。

2. 実験方法

実験装置および用いた粒子を fig.1(a)(b)および table.1 に示す。粒子としては、直径 6mm、比重が 1.06, 2.20 のプラスチック粒子 (6mm 粒子)、および直径 0.07mm、比重が 1.05 のポリエチレン粒子(微細粒子)を使用した。2種類の粒子を用い、水を満たした水槽内に堆積させた。測定部のサイズは 270×210×7mm であるので、その中で 6mm 粒子は 2次元的に、微細粒子は 3次元的に配置し、加振器を用いて測定部を横から水平加振した。それによって粒子が流動する様子をビデオカメラで撮影した。定量的測定は、画像処理装置(DIRECT, DIP95 および DIPP-Motion)を用いて行った。なお、加振を続ける時間は 120 分とした。

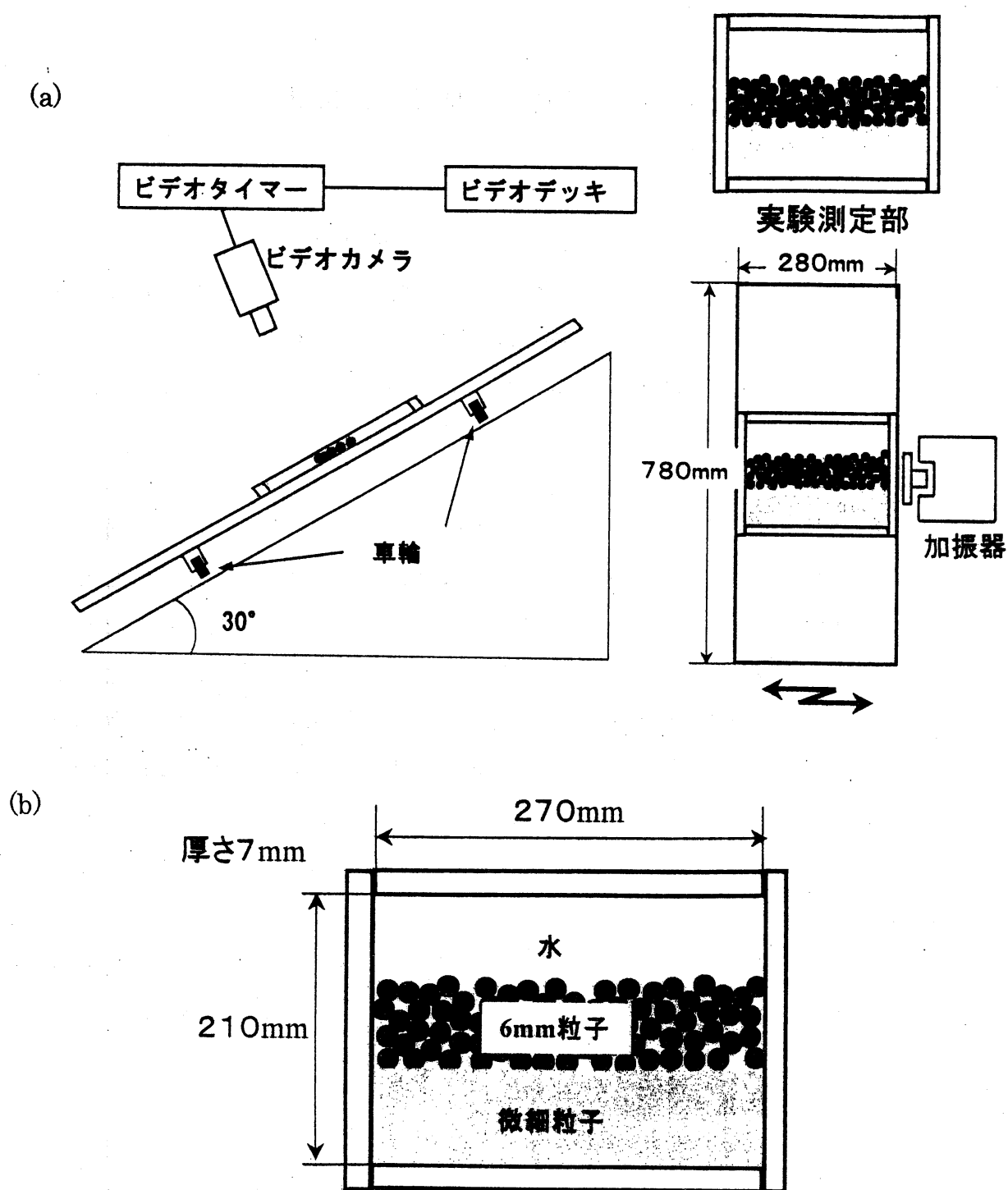


fig.1 (a) 実験装置の概略 (b) 測定部のサイズと粒子堆積の例

	形状	直径	比重
6mm 粒子	●	6.0mm	1.01
6mm 粒子	●	6.0mm	2.20
微細粒子	*	0.7mm	1.03

table.1 粒子データ

実験条件として、table.2 に示すような 3 種類を選んだ。

振動数 f ，粒子数 N

	固定パラメータ	変動パラメータ	観察項目
実験 A	加振器の取付け位置	f ， N ，初期配置	現象の特徴
実験 B	f ， N	加振器の取付け位置，初期配列	加振器の影響
実験 C	f ，加振器の取付け位置	table.4 参照	数値実験との比較

Table.2 実験条件

3.実験結果

3.1 実験 A

実験 A は振動数 f ，初期の粒子配置，粒子数 N を変化させて、そこに生じる現象の特徴を調べた。

3.1.1 振動数依存性

振動数の変化による影響を調べるために、比重のほぼ等しい 6mm 粒子と微細粒子を使用し、下層に微細粒子、上層に 6mm 粒子を配置して、table.3 に示すような水平振動を加えた。

振動数 (Hz)	60	30	20	10	10
振幅 (mm)	0.3	0.4	0.6	0.8	1.6

table.3 加振条件

その結果、振動数が 60Hz(振幅 0.3mm)の場合と、振動数が 30Hz(振幅 0.4mm)場合のみ、液状化を確認することができた。他の場合には粒子層の境界にわずかな湾曲が見られたものの液状化には至らなかった。以下の実験では、最も早く液状化が起きた振動数 30Hz(振幅 0.3mm)の場合について実験を行った。

3.1.2 初期の粒子配列依存性

初期の粒子配列として上下の粒子堆積層を入れ替え、それによって現象に違いが生じるかどうかを調べた。比重のほぼ等しい 6mm 粒子と微細粒子を使用し、振動数を 30Hz(振幅 0.4mm)として、初期配列を上下入れ替えた 2 つの場合について実験を行った結果、初期の粒子の配列に関係なく、ともに活発な液状化現象が観察できた。そ

の様子を fig.2,3 に示す。

いずれのいずれの場合にも液状化にともなって反時計回りの回転運動が生じた。また、6mm粒子の局所的な吹き上げなど (fig.4 参照)、複雑な挙動が生じていることがわかった。液状化が生じると、その領域は粒子の様な混合が生じた。ただし、その領域は実験測定域の右側に偏る傾向があった。

3.1.3 粒子サイズ差異の効果

粒子サイズ差異の効果を調べるために、比重の異なる二種類の6mm粒子を使用し、振動数を 30Hz (振幅 0.4mm)に固定して、粒子数を変化させて2層の堆積構造を作成して加振する実験を行った。しかし、いずれの場合にも液状化の確認をすることは難しかった。これは、振動を加えると粒子がすぐに細密構造を形成してしまい、その後振動を加えつづけても容易にはその構造が壊れなかったためである。

粒子径の異なる二種類の粒子を用いた場合は活発な液状化が確認できたことと比較すると、振動による液状化には異なる粒子サイズの存在が重要である可能性がある。

3.2 実験B

液状化の過程で回転する方向が反時計回りに限られていることが、加振器の取付け位置に関係する可能性がある。今までの実験装置は右側に加振器が取り付けられてため、右側に偏った液状化や反時計回りの回転運動をした可能性がある。そこで、加振器の取付け位置を左右逆転させて2層の境界がどのように変化するかを観察した。

実験条件は、最も液状化が生じやすい条件に設定した。すなわち比重のほぼ等しい6mm粒子と微細粒子を使用し、振動数を 30Hz(振幅 0.4mm)として、初期配置として上下の粒子層を入れ替え、加振器の取付け位置を左右入れ替える実験を、それぞれについて5回づつ行った。その結果を fig.4~7 に示す。

その結果、加振器が右側にある場合、反時計回りの回転運動が多く観察されたのに対し、加振器が左側にある場合、時計回りの回転運動の場合と両方向の回転運動が共存する場合があった。このことから、加振器の取付け位置によって回転方向が変化することがわかった。その原因としては、加振器の振動の波形が正確な正弦波ではないこと、あるいは、実験装置全体が完全な水平運動ではなく楕円や8の字の運動をしている可能性が考えられる。

3.3 実験C

振動層の挙動に対する数値実験を行った。数値実験では、計算できる粒子数に制限があるため、それに対応する実験も同時に行った。数値計算法では、液体—固体粒子の混合率の挙動を調べるために開発したものであり、流体については分散について成り立つナビエ・ストークス方程式を用いて粒子どうし、あるいは粒子と壁との接触にはバネ+ダッシュポットによる反発力、および近接粒子どうしの潤滑力(ヘレショウセル近似を用いて表現したもの)を用いた。加える振動は、鋸型波 $A\sin \omega X + 0.2A\sin 2\omega X$ (振幅 0.4mm 振動数 30Hz) とした。それ以外の、数値計算と実験の相違点を table.4 に示す。

	粒子						水槽
		粒径	比重	厚さ	形状	粒子数	
数値計算 (2D)	上層	6mm	1.01	1mm	円柱	200	270×210×1 鉛直
	下層	1mm	1.03	1mm	円柱	7300	
実験 (準2D)	上層	6mm	1.01		球	250	270×210×7 水平より 30° の傾斜
	下層	1mm	1.03		球	70cm ³	

Table.4 数値計算と実験の相違点

数値計算結果を fig.8, 実験結果を fig.9 に示す。実験では右側から粒子の隆起がみられるのと同様に数値計算の結果でもわずかではあったが右側の領域で微細粒子が 6mm の間に入り込んでいることがわかる。しかし、今回の数値計算では計算する粒子数が非常に多く、経過時間 100 秒分しか計算できなかった。また粒子形状が円柱のため 6mm 粒子の間に微細粒子が入り込みにくいなどの効果がある。しかし、数値計算と実験結果で同じ兆候が確認できた。

4. 結論と考察

- ・ 2層2種粒子層の水平方向加振による全域的な運動は、振動数や振幅、初期粒子配列、加振器の取付け位置などに影響され、多様な挙動を示す。
- ・ これらの挙動が生じる仕組みは十分に解明できなかった。しかし、今までの液状化や振動層の研究にはない特徴的な現象を観察できた。

次に、実験方法等についての問題点を指摘し、今後の参考にしたい。すでに指摘したように、完全に水平方向に実験装置を加振していたのではない可能性がある。また、加振器を始動させたとき、最初の運動方向が決定的な役割を果たす可能性がある。

参考文献

- ・ Ishihara, K., J. Lysmer, S. Yasuda and H. Hirao : Prediction of Liquefaction in Sand deposits During Earthquakes, 土質工学会論文報告集, Vol.16, No.1, pp.1-16 (1976)
- ・ G.H. Ristow, G. Strassburger & I. Rehberg : Phys. Rev. Lett., 79, 833 (1997)
- ・ K. Liffman, G. Metcalfe & P. Cleary : Phys. Rev. Lett., 81, 794 (1998)

図説明

- fig.1 (a) 実験装置の概略 (b) 測定部のサイズと粒子堆積の例
- fig.2 実験A 下部微細粒子－上部6mm粒子の時間的変動
- fig.3 実験A 下部6mm粒子－上部微細粒子の時間的変動
- fig.4 実験B 下部微細粒子－上部6mm粒子, 右側加振の結果 (run1～5)
- fig.5 実験B 下部6mm粒子－上部微細粒子, 右側加振の結果 (run1～5)
- fig.6 実験B 下部微細粒子－上部6mm粒子, 左側加振の結果 (run1～5)
- fig.7 実験B 下部6mm粒子－上部微細粒子, 左側加振の結果 (run1～5)
- fig.8 実験C 数値実験結果
- fig.9 実験C 実験結果

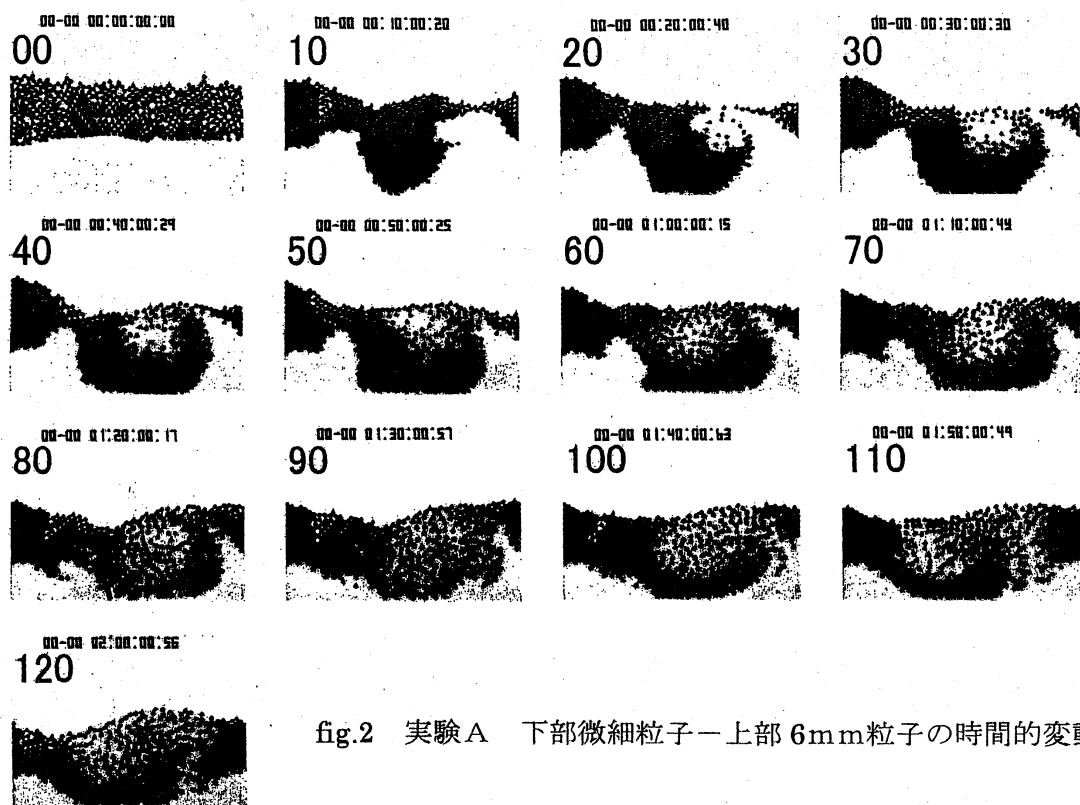


fig.2 実験A 下部微細粒子—上部 6mm 粒子の時間的変動

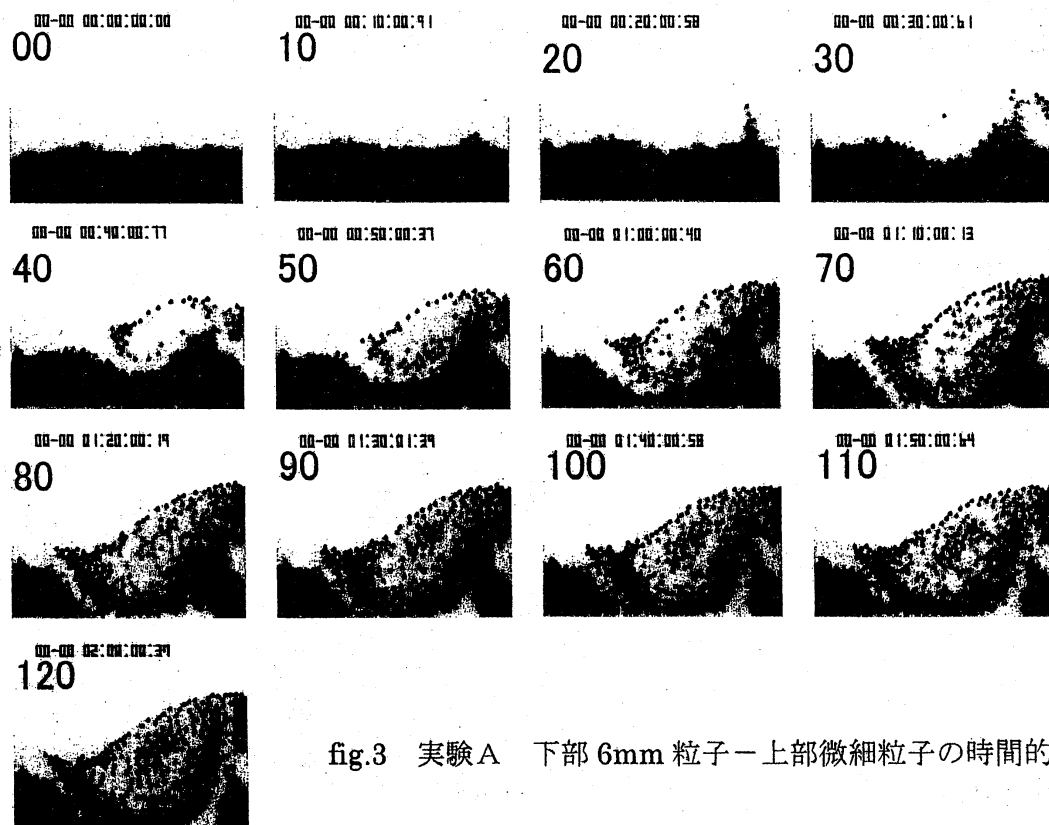


fig.3 実験A 下部 6mm 粒子—上部微細粒子の時間的変動

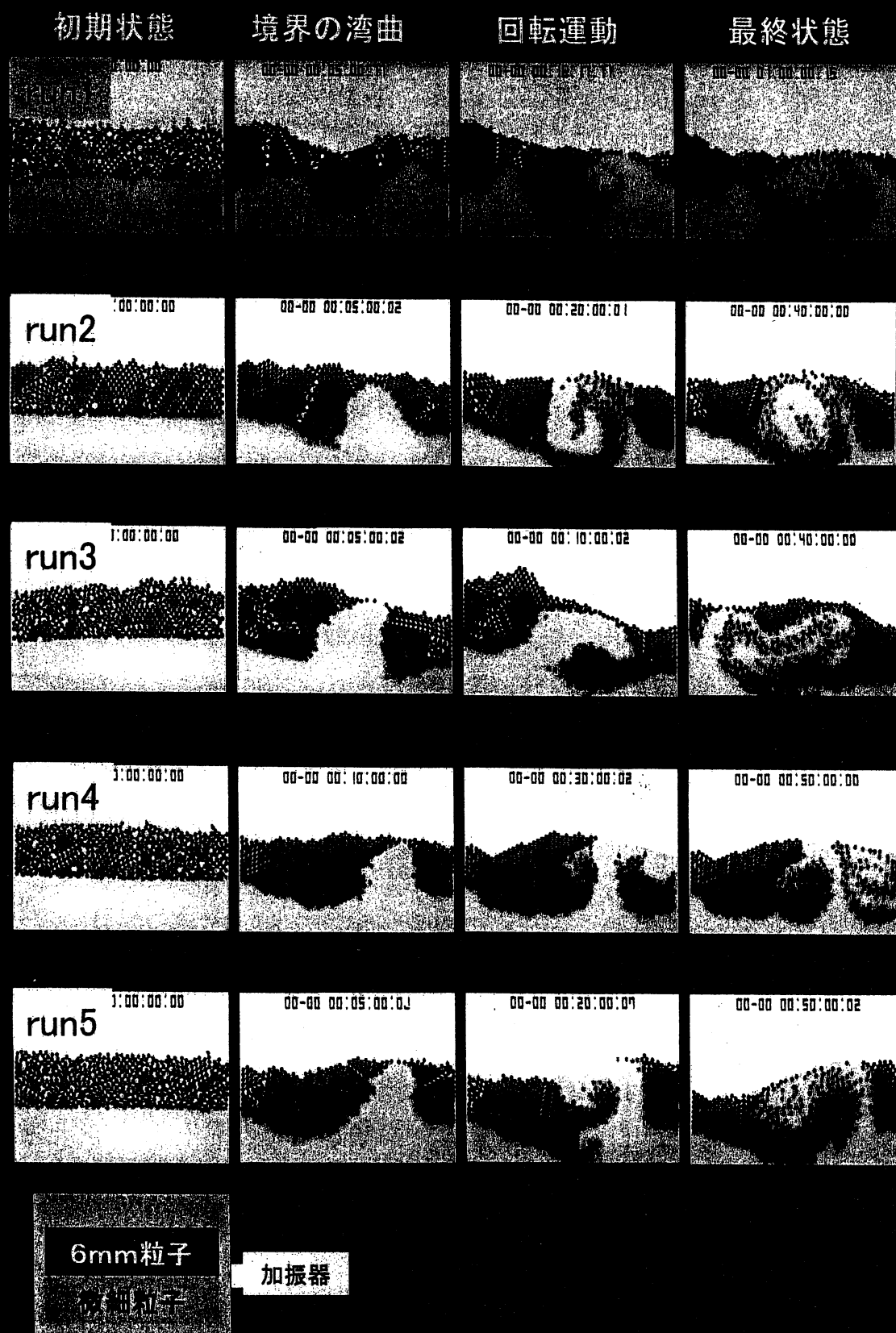


fig.4 実験 B 下部微細粒子—上部 6 mm 粒子，右側加振の結果 (run1~5)

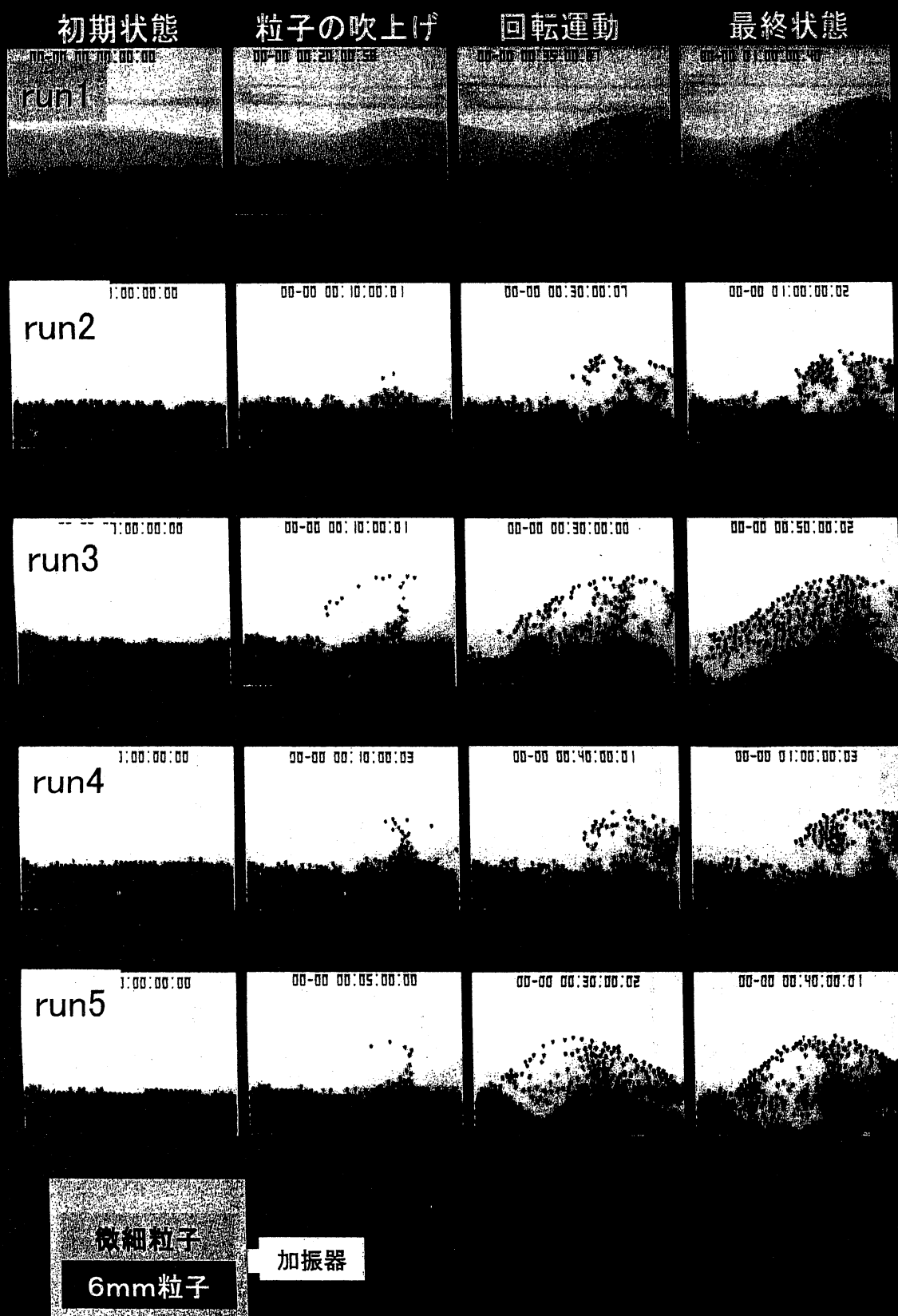


fig.5 実験 B 下部 6mm 粒子—上部微細粒子，右側加振の結果 (run1~5)

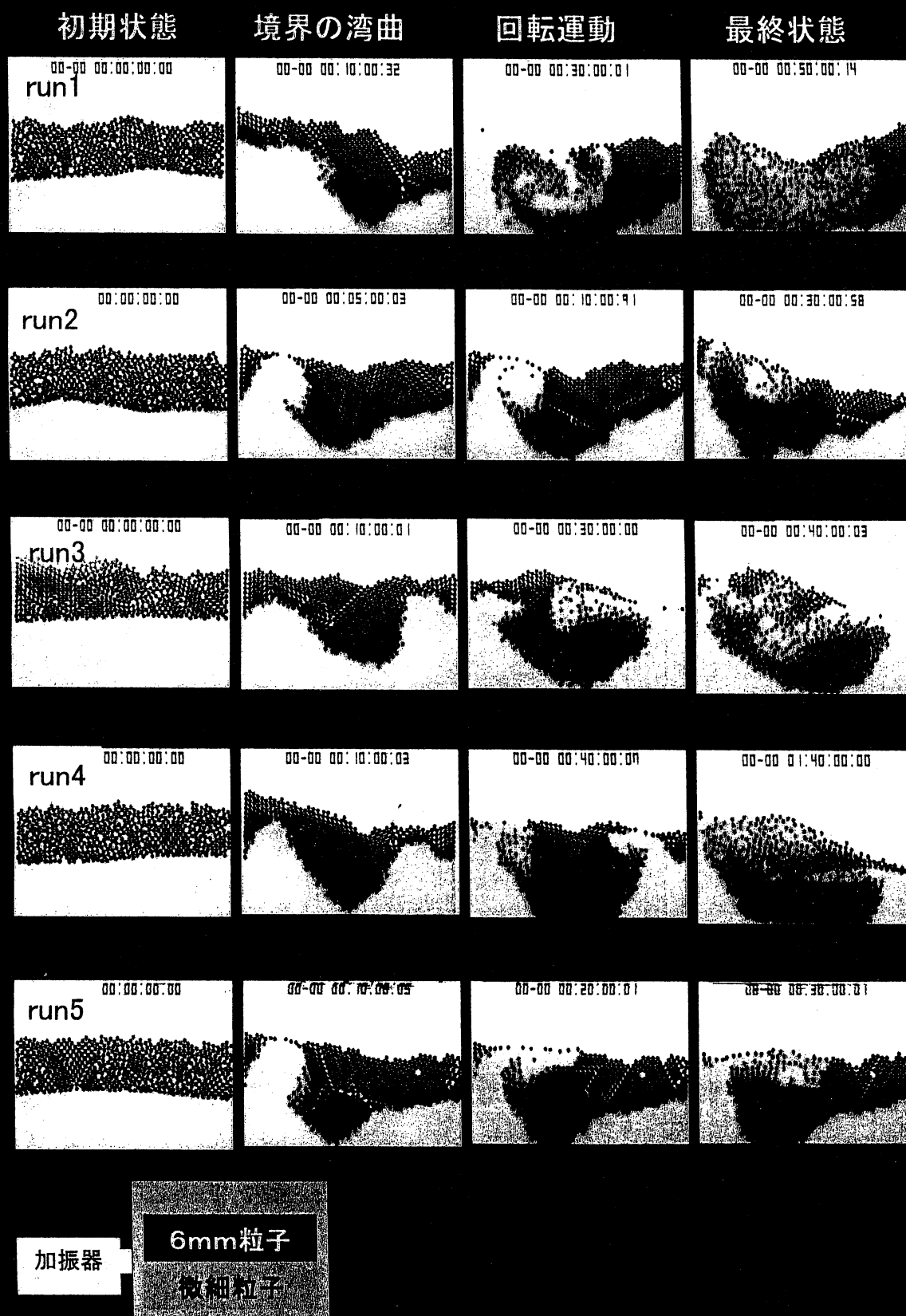


fig.6 実験 B 下部微細粒子—上部 6 mm 粒子, 左側加振の結果 (run1~5)

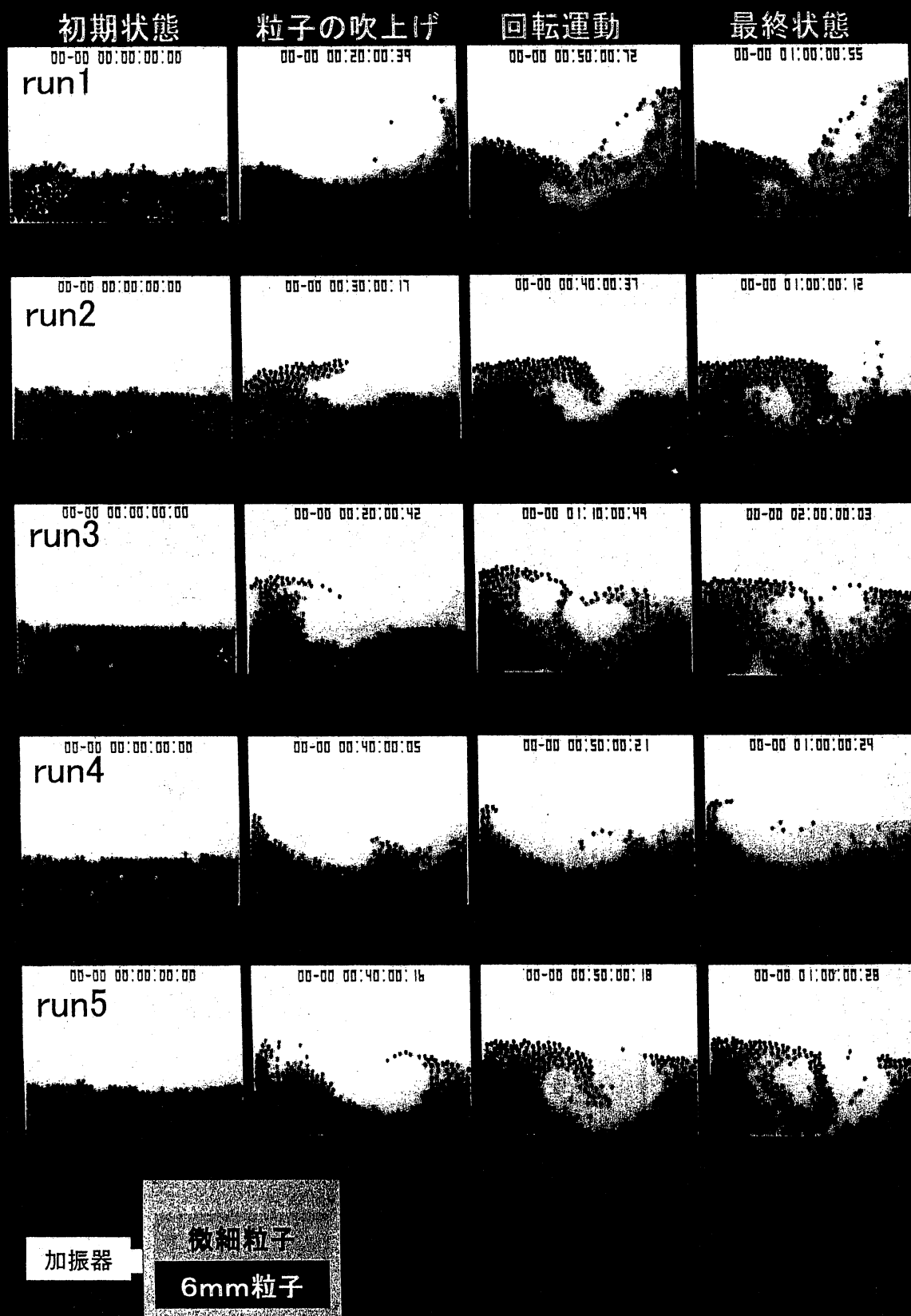


fig.7 実験 B 下部 6mm 粒子—上部微細粒子, 左側加振の結果 (run1~5)

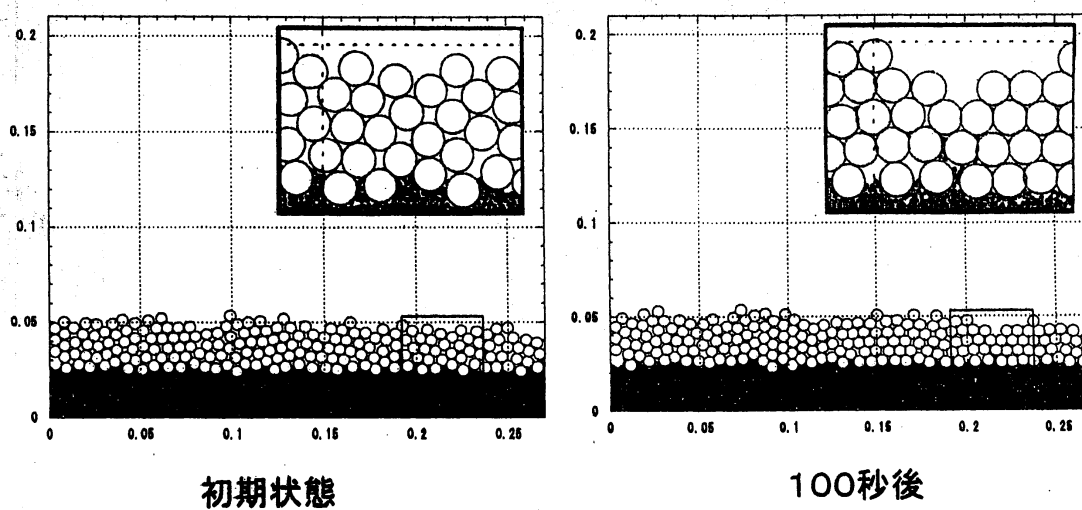


fig.8 実験 C 数値実験結果

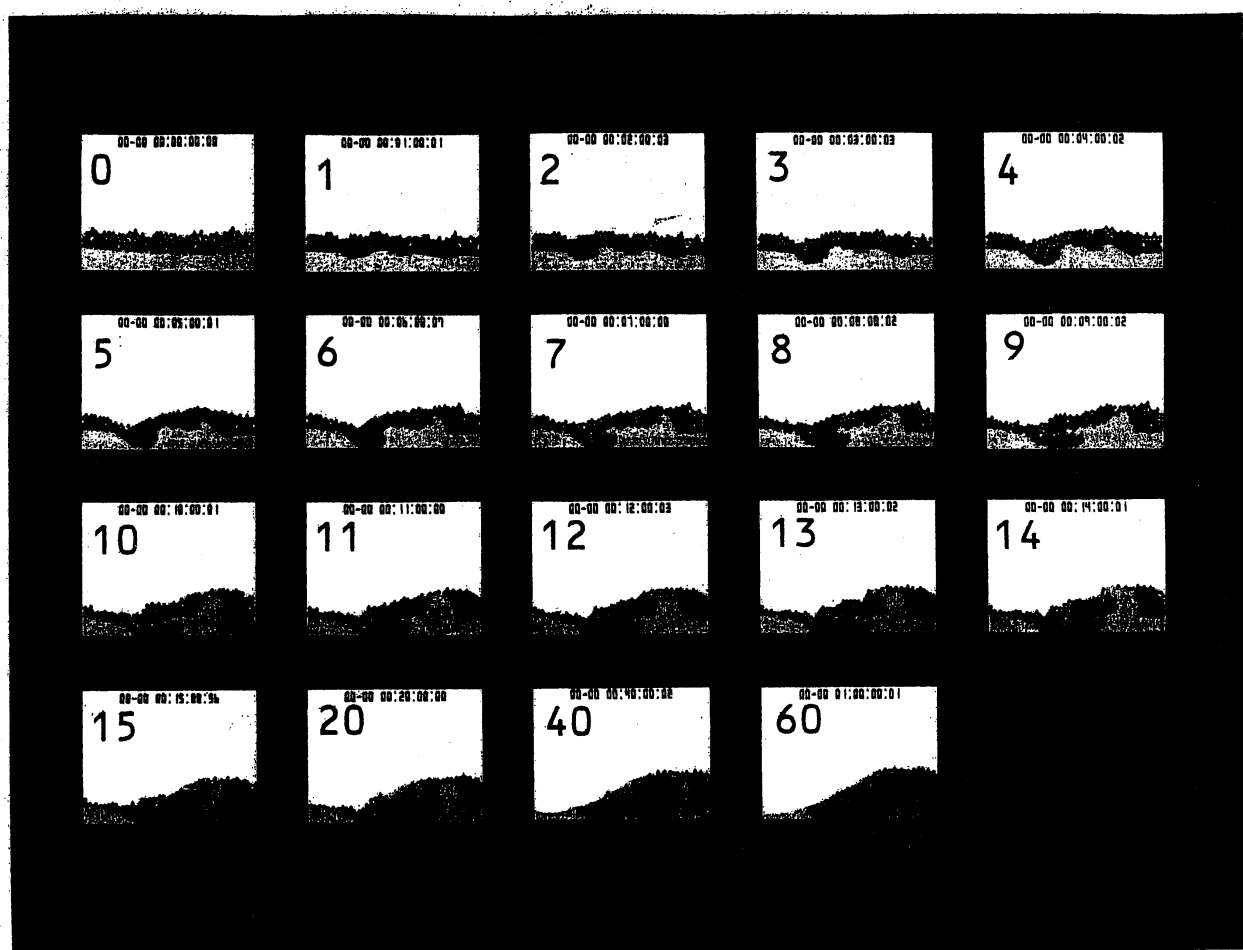


fig.9 実験 C 実験結果