

模擬粒子を用いた振動充填燃料の充填挙動評価  
(研究報告)

2000年7月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2000

## 模擬粒子を用いた振動充填燃料の充填挙動評価

### (研究報告)

重留義明\*、鈴木政浩\*、宮本寛\*  
古村誠太郎\*\*、遠藤秀男\*

#### 要旨

振動充填燃料の充填挙動に影響するファクターを明確にするため、各種コールド試験及びミクロな粒子挙動の解明を試みるためシミュレーションを実施した。

球状粒子の充填挙動について幾何学的ファクターと動的ファクターに分けて影響評価を行い、幾何学的ファクターについては充填密度が Ayer により導かれた被覆管及び粒子の径の関数で表される式により一意に定まるものであることを確認した。速度ファクターについては、変位をできるだけ小さくした場合に充填が速やかに進行し、また充填後に偏析が発生しづらいことがわかった。

塊状粒子についても同様な検討を行った。その結果、塊状粒子の場合は細粒の比率を高めるといふ、球状粒子とは異なる比率の方が充填率は高くなった。また速度ファクターについては周波数掃引を行うことにより充填効率を高めることができ、80%の充填率を達成することができた。

また解析コードにより粒子の充填状態及び偏析の挙動評価を行った。

---

\* 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部

\*\* 検査開発 (株)

## Study of vibration packing characteristics with simulated fuel particles

Yoshiaki Shigetome\*, Masahiro Suzuki\*,  
Hiroshi Miyamoto\*, Seitaro Komura\*\*,  
Hideo Endo\*

### Abstract

This report presents the results of vibration packing experiments and computational simulations of particle compaction behavior. Both sphere and shard particles were evaluated in these works.

Experiments with simulated fuel particles were conducted to investigate the factors affecting packing behavior. The factors are classified into geometrical and dynamics factors.

With regard to the geometrical factors for sphere packing, the experimental results prove that the achievable packing fraction can be predicted by the equation derived by Ayer, which is relationship of inner diameter of cladding and diameters of particles. As for the dynamics factors, less vibration displacement is preferable, because it produces faster packing with less segregation.

Similar experiments were conducted for the shard particles. The results indicate the packing characteristics of the shard particles are different from the sphere particles. Optimum weight ratio between particle sizes is different from the ratio given by Ayer's equation. As for the dynamics factors, the sweeping frequencies while packing were sufficient to obtain high packing fraction.

Computational simulations were performed to investigate the particle behavior while packing. The movement of infiltrating and bed particles while packing was well understood.

---

\* Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center

\*\* IDC

## 目 次

1.	緒言	1
2.	目的	2
3.	研究範囲	3
4.	模擬物質の選定	4
4.1	模擬物質の選定方針について	4
4.2	選定した模擬物質	4
5.	球状粒子を用いた充填試験	8
5.1	幾何学的ファクターの影響評価	8
5.2	動的ファクターの影響試験	13
5.3	その他の影響試験	15
5.4	粒子装填治具を用いた充填試験	16
6.	塊状粒子を用いた充填試験	43
6.1	粒径分布に関わる試験	43
6.2	動的ファクターに関わる試験	43
6.3	充填挙動に及ぼす周波数掃引の影響試験	43
7.	振動充填体の密度分布測定と評価	52
7.1	試験条件	52
7.2	試験結果	52
8	3次元解析コードによる充填中の粒子挙動評価	61
8.1	解析手法	61
8.2	解析結果	62
8.3	解析コードによる評価のまとめ	65
9.	まとめ	76
	参考文献	79

## 1. 緒言

FBR 実用化の可能性を示すためには、安全性強化を図ることはもちろん、核燃料サイクル全体の合理化や簡素化により経済性を向上させること、廃棄物発生量を低減すること、核不拡散への配慮等が要求される。

そのため従来のペレット燃料の高度化を図ることは勿論、将来の高速炉燃料を選択する上での選択肢を追加するため、振動充填燃料の可能性評価を行う必要がある。振動充填燃料については、スイスの PSI で内部ゲル化法により球状燃料を調製し振動充填する技術を手がけているほか、ロシアの RIAR では酸化物電解乾式再処理と組み合わせて不定形の塊状粒子を振動充填し燃料製造を行っている。サイクル機構では現在高速増殖炉実用化戦略調査研究の一環として球状・塊状燃料両者を視野に入れた充填技術の評価を進めている。

振動充填燃料の充填工程においては必要な密度まで均一に充填することが要求される。また実用化を考えた上では量産性の観点で充填時間や充填時間のばらつき等の評価が必要であり、核燃料サイクル開発機構（JNC）ではこれら充填工程における技術的課題の抽出とその検討を行っている。

その一環として平成 11 年度に（株）日立製作所殿への委託試験により充填試験を実施した。またその結果を補完するために JNC 内部においても充填試験を実施した。

委託試験では充填挙動に及ぼすファクターを幾何学的ファクターと動的ファクターの二つに明確化し、それぞれの影響評価のための試験を実施した。また粒子個々の動きをシミュレーションにより評価した。JNC 内部では、スフェア燃料における幾何学的ファクターについてより詳細な評価を行うため、一成分系での充填密度測定及び粒度分布の影響評価を行った。また充填時の偏析を抑制するための充填治具の試作を行った。

本報告書は、これら平成 11 年度に実施した試験により得られた技術的知見のまとめを行ったものである。

## 2. 目的

振動充填燃料の充填技術開発においては、必要な密度まで均一にかつ短い時間で充填することが要求される。これらは燃料粒子・被覆管の仕様、振動条件に影響される。現在の段階では燃料や被覆管についてはおおよその仕様はあるものの、詳細には定まっていない。そこで現時点においてはこれらの条件が多少変動しても対応できるような普遍的に体系だった充填技術の開発が要求される。

そこで本研究においては充填挙動に影響するファクターを明確にする事に主眼をおき、各種充填条件による影響評価を行った。なお充填時におけるミクロな粒子挙動の解明を試みるためシミュレーションも実施した。

### 3. 研究範囲

振動充填燃料には球状の燃料を振動充填するスフェアパックと酸化物電解法により得られる塊状燃料を振動充填するバイパックに大別できる。本研究では両者を対象とするが、基本的にはスフェアパックを中心とした検討を行う。

本研究では以下の項目について実施する。

#### (1) 模擬物質の選定

充填試験を行う上でのウラン、MOX 燃料の模擬物質となり得る物質を選定する。

#### (2) 球状粒子を用いた充填試験

スフェアパック燃料を想定した球状粒子を用いた充填試験を行う。充填挙動に及ぼす影響を

- ・幾何学的ファクター（被覆管径、粒子径、粒径比等）
- ・速度ファクター（周波数、加速度、変位等）
- ・その他のファクター（充填量、充填方法、荷重）

に分類してそれぞれの評価を行う。

#### (3) 塊状粒子を用いた充填試験

酸化物電解法による塊状粒子を想定した充填試験を行う。

#### (4) 輸送時想定試験

充填終了後の模擬燃料ピンに輸送時を想定した振動を与えその影響の評価を行う。

#### (5) 3次元解析コードによる充填中の粒子挙動評価

3次元解析コードにより振動充填中のマイクロな粒子挙動をシミュレートし、充填挙動の評価を行う。

#### (6) リテーナーの試作

充填後の燃料粒子を固定する上で必要となるリテーナーの試作を行う。

## 4. 模擬物質の選定

### 4.1 模擬物質の選定方針について

振動充填工程における充填挙動は様々な因子により左右されるものであるが、これらは以下の2種類に大別することが出来る。

- (1) 幾何学的ファクター：粒径や形状など粒子の幾何学的なファクターで、最適充填状態（到達可能な最高充填率）に及ぼすファクター
- (2) 振動ファクター：最適充填状態に至る過程、その後の偏析の発生に影響するファクター

これらに及ぼす因子を評価するために、適した模擬物質を選定する必要がある。そこで模擬物質の選定について以下に示す。

最適充填状態は粒子の形状、粒径、粒度分布といった幾何学的なファクターでのみ決まるので、基本的にはこれらを模擬できればよい。

振動ファクターは上記の幾何学的ファクターの他に振動条件（周波数、加速度、変位等）、被覆管の条件（長さ、管径等）、初期の充填状態、さらに物質の密度や流動性が影響する。

流動性の支配因子は付着力と摩擦係数であるが、これらは安息角と密接に関連している。各種の粒子について安息角を整理した結果を図 4.1-1 に示す。不規則形状であるケイ砂は球状粒子であるガラスや鉛に対して安息角が大きく流動性が悪い。一方ガラスは粒径によらず安息角は同一である。さらにガラスと鉛でも安息角は同一である。

これらの結果は粒子の流動性は粒子形状（球状であるか不規則形状であるか）に依存するが、密度と粒径には依存しないことを示している。従って振動ファクターについての検討においても粒子の形状、粒径のみを模擬するものとする。

### 4.2 選定した模擬物質

上記の選定方針のもとに、実際に使用する粒子と同程度の形状、粒径でありかつ入手可能なものから、球状粒子としてはイットリア安定化ジルコニア、ガラスビーズ、SUS を、塊状粒子としてはガラス片を模擬物質として選定した。以下にそれぞれの物質について示す。

#### (1) イットリア安定化ジルコニア

粒径がそろっていることが特徴である。粗粒は 650, 800 $\mu\text{m}$ 、細粒は 100, 200, 300 $\mu\text{m}$  が入手できる。密度は約 6g/cm<sup>3</sup> である。本研究では粗粒として 650, 800 $\mu\text{m}$ 、細粒として 100 $\mu\text{m}$  を使用した。

#### (2) ガラスビーズ

粗粒から 50 $\mu\text{m}$  の細粒まで入手可能である。粒径はあまりそろっていない。密度は約 2.5g/cm<sup>3</sup> である。本研究では粗粒として公称 800 $\mu\text{m}$ （710~990 $\mu\text{m}$  の範

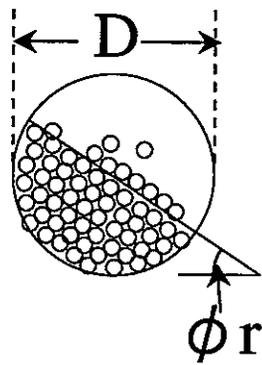
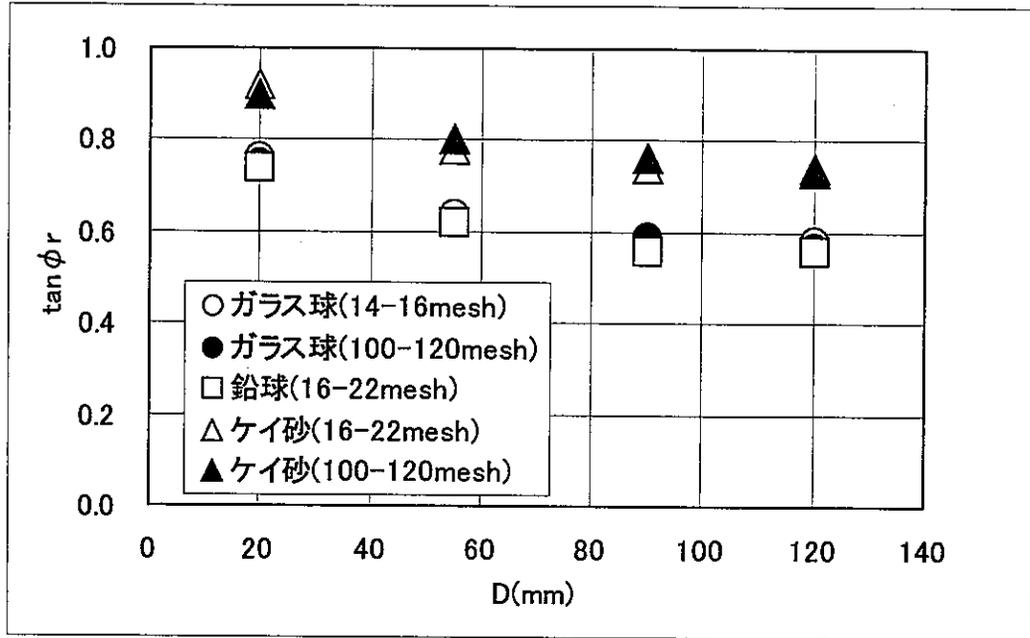
罎)を、細粒として公称  $50\mu\text{m}$  ( $37\sim 63\mu\text{m}$ )、 $100\mu\text{m}$  ( $105\sim 125\mu\text{m}$ )、 $200\mu\text{m}$  ( $177\sim 250\mu\text{m}$ ) を採用した。また粗粒については一部さらに分級を行い平均粒径及び粒度分布を調整した試料も用いた。

(3) SUS

$800\mu\text{m}$  以上ではベアリング用に粒径がそろった真球に近いものが得られる。本研究では約  $800\mu\text{m}$  及び粒径はそろっていない  $75\sim 125\mu\text{m}$  (平均  $100\mu\text{m}$ ) の試料を用いた。密度は約  $7.9\text{g}/\text{cm}^3$  である。

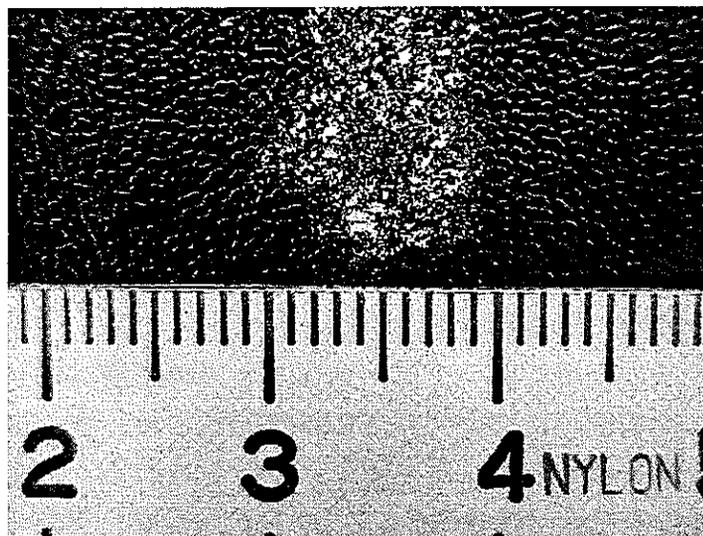
(4) ガラス片

塊状粒子として、ガラスを砕き不規則形状にした試料を篩によって分級した。図 4.2-1 に塊状粒子の形状を示す。

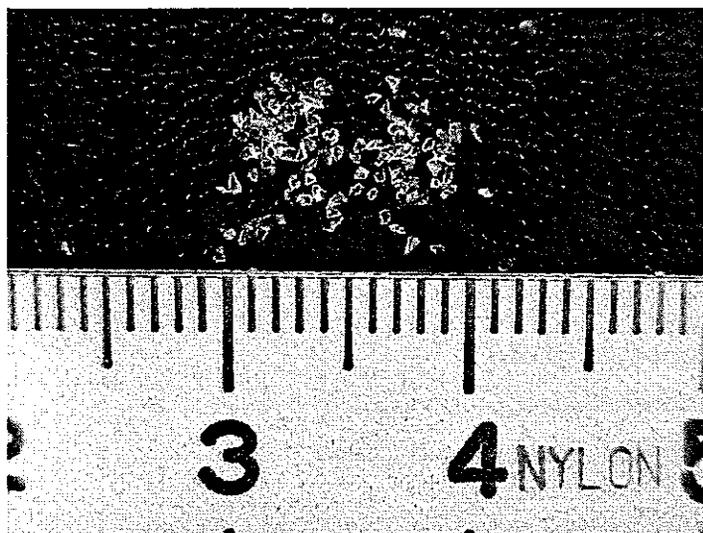


安息角の定義

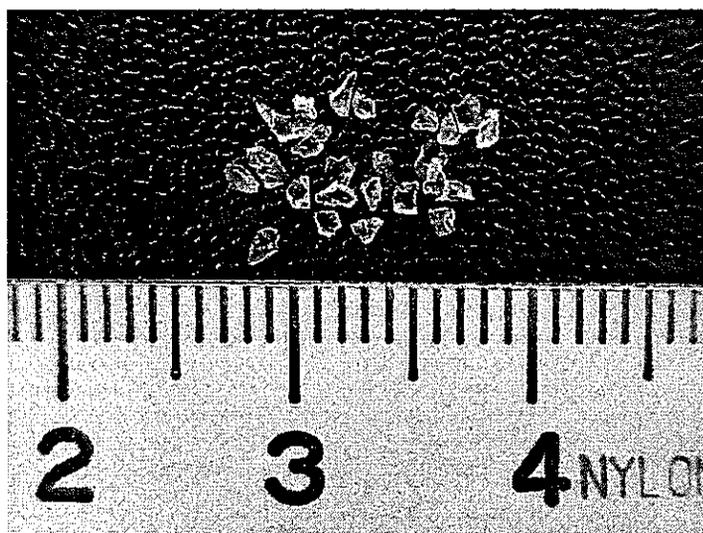
図 4.1-1 種々の粒子の安息角



細粒



中間粒



粗粒

図4. 2-1 塊状粒子の形状 (例)

## 5. 球状粒子を用いた充填試験

4章で述べたとおり、振動充填体の充填状態は幾何学的ファクターと動的ファクターの2種類に影響されることとなる。ここではそれぞれが球状粒子の充填状態に及ぼす影響について評価を行う。

### 5.1 幾何学的ファクターの影響評価

多成分の球状粒子の充填においては、到達する充填密度ははじめに径の大きな球が充填され、その空隙に次の大きさの球が充填され、さらにその空隙に次の大きさの球が充填されるという考え方により計算される。通常一成分の球が最適充填された場合の充填率は0.635となる。しかしながら実際の振動充填では充填される空隙の壁による効果により、0.635より低くなる。

Ayer は模擬物質を用いた充填試験を行い、被覆管の径と粒子の成分数と各成分の粒径の関数で充填率の定式化し、均一に充填が行われた場合の充填率を予想する方法を確立している[1]。

$i$  番目の成分の粒子が充填されたとき、この  $i$  番目の粒子が充填される前の空隙に対する充填率を  $\rho_i$  とすると、以下のように表現される。

$$\rho_1 = 0.635 - 0.216 \exp(-0.313 D_0 / d_1) \cdots (5.1.a)$$

$$\rho_2 = 0.635 - 0.737 \exp(-0.201 d_1 / d_2) \cdots (5.1.b)$$

$$\rho_3 = 0.635 - 0.737 \exp(-0.201 d_2 / d_3) \cdots (5.1.c)$$

ここで  $D_0$  は被覆管の直径、 $d_i$  は  $i$  番目の粒子径である。たとえば直径 10mm の被覆管に 800 $\mu\text{m}$  と 100 $\mu\text{m}$  の2成分粒子が最適充填された状態の充填密度は以下のように計算される。

800 $\mu\text{m}$  の粒子の充填密度は(5.1.a)式より

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 0.635 - 0.216 \exp(-0.313 D_0 / d_1) \\ &= 0.635 - 0.216 \exp(-0.313 \times 10 / 0.8) \\ &= 0.631 \end{aligned}$$

100 $\mu\text{m}$  の粒子の充填率は(5.1.b)式より

$$\begin{aligned} \rho_2 &= 0.635 - 0.737 \exp(-0.201 d_1 / d_2) \\ &= 0.635 - 0.737 \exp(-0.201 \times 0.8 / 0.1) \\ &= 0.487 \end{aligned}$$

大きい粒子が充填された隙間に小さい粒子が充填されることより、2成分系での充填率 $\rho$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}\rho &= 0.631 + (1 - 0.631) \times 0.487 \\ &= 0.811\end{aligned}$$

このように被覆管、粒子径が決まれば最適充填状態の充填率の予測が可能である。そこで Ayer の密度式の成立性を検討するため、粒子材料、粒径、被覆管等を変えた試験を行う。

はじめにガラスビーズを用いた 1 成分系での充填密度について、次いで成分数を 2, 3 成分と増やした場合の充填密度について検討を行った。

### 5.1.1 1 成分系での充填密度

粒径の異なるガラス粒子を用いて 1 成分系での充填密度の測定を行い、Ayer の密度式の成立性の確認を行った。ガラスビーズは公称 50, 70, 100, 800 $\mu\text{m}$  を用いた。

このうち 800  $\mu\text{m}$  については 4 つの異なるロットのものがあ、それぞれ橙、黄、赤、白の色がついている。この粒子については粒度分布が大きい、710, 850 $\mu\text{m}$  の篩により分級を行い平均粒径と粒度分布を調整した。

表 5.1-1 にガラスビーズの平均粒径、粒度分布、真球度を示す。なおこれらの測定はマイクロスコープによる写真を用いて、それを画像解析ソフトにより各試料につき 100 個の粒子について粒径及び真球度を求めた。真球度は長辺/短辺で定義した。

この結果より 50, 70, 100 $\mu\text{m}$  の粒子については真球度が高いことがわかる。また 800 $\mu\text{m}$  についてはもともと最大 10% 程度の粒度分布があり、分級により分布が $\sim$ 5% 程度となっている。真球度については一つのロット（白）だけが悪いものであった。

充填は内径 7mm のアクリル管に 20.0g を装荷したのち振動を加える。この振動により若干充填密度が高くなる。この際の振動条件は各粒径ごとに振動条件をふった結果、最も高くなる条件とした（400 $\sim$ 600Hz, 10 $\sim$ 15G の範囲）。

図 5.1-1 に結果を示す。これより大きい粒子に関しては Ayer の密度式に一致していることがわかる。白い粒子のみが充填率が若干高くなっており、真球度の悪さが影響していると推定される。

50, 70, 100 $\mu\text{m}$  については $\sim$ 3% 程度 Ayer の密度式より低くなっている。細かな粒子は最密状態になりづらいことが示唆される。仮に細粒（100 $\mu\text{m}$ ）の充填率が 63% から 60% に比率として 4.8% 低下した場合、2 成分系における充填率への影

響は、800 $\mu\text{m}$ と100 $\mu\text{m}$ の2成分系での場合は次のようになる。

$$\begin{aligned}\rho &= 0.631 + (1 - 0.631) \times 0.487 \times (0.60 / 0.63) \\ &= 0.802\end{aligned}$$

Ayerの密度式では800 $\mu\text{m}$ と100 $\mu\text{m}$ の2成分系では0.811の充填率と予測されるため、1%程度の充填率の低下が予測される。

### 5.1.2 2成分系での充填密度

#### (1) 混合比の最適化

##### ① 試験概要

2成分系における充填密度の評価を実施するにあたり、混合比の検討を行った。Ayerの密度式において粗粒、細粒それぞれの充填量が計算されるのでこれが最適混合比と推定される。そこで粗粒800 $\mu\text{m}$ 、細粒100, 50 $\mu\text{m}$ （粒径はそれぞれ公称値、以後粒径はすべて公称値を用いる）のガラスビーズを用いて充填比率をパラメータにして充填率を測定した。なおこの組み合わせでは、Ayerの密度式からはそれぞれ77/23, 73/27の（粗粒）/（細粒）比率が最適と予測される。

試験条件は以下の通りである。

被覆管	:	内径7mm、長さ500mmの亚克力管
粒子装荷量	:	粗粒、細粒の合計が26g
振動条件	:	加速度10G、周波数600Hz
充填方法	:	浸透法（粗粒を管に装荷後その上に細粒を装荷して充填）

##### ② 試験結果

図5.1-2に結果を示す。これよりAyerの密度式から予測される混合比において最も充填率が高くなっているのがわかる。したがって今後は混合比についてはAyerの密度式により予測される比率を用いることとする。

#### (2) 2成分系での充填密度評価

##### ① 試験概要

2成分系での充填密度の評価を行った。試験は粗粒に比較的粒度がそろっているイットリア安定化ジルコニア（公称800, 650 $\mu\text{m}$ ）を用いた。また細粒にはイットリア安定化ジルコニア（公称100 $\mu\text{m}$ ）の他、ガラスビーズ（公称50, 100, 200 $\mu\text{m}$ ）を用いてAyerの密度式との比較を行った。また粒子や被覆管の材質の影響を調べるため、SUSの粒子とSUSの被覆管を用いた試験も行った。表5.1-2に試験条件を示す。試験で用いたイットリア安定化ジルコニアの平均粒径とそ

の標準偏差は表 5.1-3 のとおりである。なお管の内径は 7mm で充填は浸透法を用い、充填中は粒子の飛び跳ね防止のため上部に金属棒 (55g) を挿入している。

## ② 試験結果

試験結果を図 5.1-3 に示す。これより細粒径が 100 $\mu\text{m}$  以下の場合には粒子や被覆管の材質によらず Ayer の密度式と一致する結果と極めて近い値となり、この密度式で充填密度が予測できるものであることが示された。

一方、細粒径が 200 $\mu\text{m}$  の場合には細粒が粗粒の間を浸透せず、充填が行えなかった。同条件で混合法と多層法を試みたところ、充填は行えるものの Ayer の密度式による予測値には到達しなかった。これは充填時に偏析が発生してしまった結果、全体の充填密度が上がらなかったためである。仮に均一に混合が行われれば Ayer の密度式による予測値に到達するものと予想される。

## (3) 粒径のばらつきの影響評価

### ① 試験概要

充填対象となる粒子はある幅の粒径のばらつきを持ったものとなる。そこで粒径のばらつきによる影響を評価するため、粗粒に 1 成分の充填試験で用いたガラスビーズの赤のロットを用いた充填試験を行った。細粒は 100 $\mu\text{m}$  のものを用いた。表 5.1-1 に示すように赤のロットは分級により 4 種類の平均粒径、粒度分布を持つ試料が得られている。なお充填は浸透法で行った。

### ② 試験結果

結果を図 5.1-4 に示す。ここで用いた粗粒は平均粒径の標準偏差が 30~100 $\mu\text{m}$  程度あるがいずれも Ayer の密度式による予測値とほぼ一致していることがわかる。これより粒度分布によらず平均粒径により充填密度は予測できるものと考えられる。

また充填に要した時間を図 5.1-5 に示す。これより粗粒と細粒の粒径比が大きいほど充填に要する時間は短くなるものと考えられる。

## 5.1.3 3 成分系での充填密度

### ① 試験概要

3 成分系での充填密度に関して、2 成分系と同様に大きい粒子から順次残された空間に満たしていく場合 (逐次充填) を検討する。内径 7mm の管に 3 成分の粒子を充填した場合の充填率を Ayer の密度式から算出して図 5.1-6 に示す。ゲル化法により製造可能な粒子は最大 800 $\mu\text{m}$  程度、最小 100 $\mu\text{m}$  程度である。したがってこの中間の径の粒子を使用した場合の充填率を示している。また波線で

は中間粒を使用しなかった場合を示している。

図より細粒径が  $40\mu\text{m}$  以上では、中間粒を使用した場合には 2 成分系よりも充填率は低下する。このような中間粒の使用は充填率の向上ではなく、製造の困難な細粒の数を減らす方策となる。

今回の試験では粗粒、中間粒、細粒の径をそれぞれ  $800, 200, 100\mu\text{m}$  とした場合の試験を行った。粒子の材質は粗粒はイットリア安定化ジルコニア、中間粒と細粒はガラスとした。試験条件を表 5.1-4 に示す。充填方法は混合法を用いた。これはこの粒子比率では小粒子が浸透できないためである。なお各成分の重量比は逐次充填理論による比率とした。また 3 成分系についてはロシアの原子炉科学研究所 (RIAR) が塊状粒子に対して、経験的に求めた逐次充填比率とは異なる比率を採用している[2]。球状粒子に適用されるものであるか検討するため、本比率による試験も実施した。

## ② 試験結果

図 5.1-7 に各試験における充填率の時間変化を示す。各試験とも約 3 分間で充填率の増加が止まっている。逐次充填に基づく比率では充填率は 0.735 で Ayer の密度式による予測値の 0.768 に達しなかった。また RIAR が塊状粒子で採用した充填比率での試験ではさらに充填率は低かった。RIAR が用いた細粒が多い比率は球状粒子にはあてはまらないものと推定される。

また試験後に粗粒が上部で著しく偏析しており、最適充填状態に達していなかったことがわかる。予測値より低い充填密度となったのはこれが原因と考えられる。

### 5.1.4 幾何学的ファクターの影響評価のまとめ

1~3 成分系での充填試験を行い Ayer の密度式の成立性を検討したところ、試験結果はほぼ密度式による予測値と同じ値となることがわかった。試験条件によっては予測値より低くなることがあったが、これは偏析が発生していることが原因であった。以上より最適充填状態であれば粒子材料や管の材料によらず充填率は Ayer の密度式で表されることがわかった。

なお粒子材料により充填密度に若干の違いがあるが、この原因を特定することは試料の比重、表面性状、各成分内での粒度分布等の条件すべてが異なっているため困難である。

以上の試験の結果、現在 MOX 粒子の製造可能な粒径範囲 ( $50\sim 850\mu\text{m}$ ) 内では 2 成分系が最も高い充填率が達成でき、燃料仕様として要求される 80% 以上を達成することができた。したがって球状粒子については 2 成分系とすることが最適であると考えられる。1 成分系では 63.5% が最大であり、3 成分では 2 成

分系より到達可能密度が低い上、充填時の偏析の発生が避けられないためそれより実際の充填密度は低くなる。

図 5.1-8 に Ayer の密度式より求めた 2 成分系における粗粒径、細粒径と到達可能充填密度の関係を示す。これは被覆管内径を 0.7mmφ の場合である。これより 10μm 程度の小さな粒子を製造することが可能であれば、粗粒径は小さい方が (5.1.a) 式中の  $D_0/d_1$  が大きくなり高充填率となることがわかる。逆に小さい細粒径粒子を製造できない場合は、粗粒径が大きい方が (5.1.b) 式中の  $d_1/d_2$  が大きくなり高充填率となる。

この図に示すように、必要となる充填率と被覆管径、製造可能な粒子径が決まれば、Ayer の密度式より適切な粒子径を選択することが可能である。

## 5.2 動的ファクターの影響試験

2 成分系での充填挙動に与える動的ファクター（周波数、加速度、変位）について検討を行った。まず周波数及び加速度の影響について評価を行い、その結果変位により充填挙動が異なることが示唆されたため、ついで変位による影響試験を実施した。

### 5.2.1 周波数、加速度の影響試験

#### (1) 試験概要

はじめに周波数の影響評価を行うため加速度を一定として 70Hz～300Hz の範囲で周波数を変化させた試験を行った。ついで加速度が大きい場合の条件として、加速度を 20G とし、周波数を 200～400Hz の範囲で試験を行った。

#### (2) 試験結果

図 5.2-1 に加速度 5G での充填率の時間変化を示す。周波数が 70Hz では充填率が 0.80 に達する前に充填率の低下が始まっており、Ayer の密度式による予測値に達していない。100Hz の場合、充填率は 0.80 に達するがやはり充填率の低下がみられる。125, 150, 200Hz ではほぼ同じ時間で充填率が 0.80 に達し、密度の低下は周波数が高いほど遅くなっている。300Hz になると充填率が上がるのが非常に遅くなってしまっている。

ついで加速度を 20G とした場合の結果を図 5.2-2 示す。5G の場合と比べ最大充填率に達するのに 2～3 倍時間がかかっている。図 5.2-3 に 200Hz とした場合の 5G、20G での結果を示す。20G では最大充填に達する時間が長くなっているにもかかわらず、その後の充填率の低下が急速である。偏析による充填率の低下は振動時の変位が大きいほど著しいことがこれまで報告されている。200Hz, 5G では変位は 31μm、200Hz, 20G では変位は 124μm である。

この現象は浸透が遅くならない限りは変位を小さくした方が充填速度は速くかつ偏析が生じにくいことを示唆する。5G, 300Hz では変位は  $14\mu\text{m}$  であり、変位が小さすぎる場合は浸透が進まないものと考えられる。

以上より充填挙動は周波数や加速度の影響は受けず、変位の影響を受けるものであることが示唆される。

## 5.2.2 変位の影響試験

### (1) 試験概要

5.2.1 項で得た知見をもとに管の変位に着目した試験を実施した。変位は 248,  $31\mu\text{m}$  となるように加速度と周波数を設定した。前者の変位は細粒の径よりも変位が大きく後者は小さい。また細粒についてはガラスビーズと比較的浸透しやすいイットリア安定化ジルコニアを用いた場合の両ケースの試験を行い比較を行った。

### (2) 試験結果

まず細粒にガラスビーズを用いた場合の結果を図 5.2-4 に示す。0.9G 及び 1.25G では加速度が小さいため浸透が遅かった。その他の 2 ケースでは充填は進行するが、変位の大きい 6.4G では密度低下も激しかった。

ついで細粒にイットリア安定化ジルコニアを用いた場合の結果を図 5.2-5 に示す。この場合は加速度が 0.9G では同じく浸透が遅いのに対し 1.25G では浸透が行われた。浸透が行われるかどうかは 1G 付近にしきい値があることが示唆される。充填後の偏析の進行は変位が  $248\mu\text{m}$  では著しいのに対し、 $31\mu\text{m}$  の場合には偏析は発生せず、長時間にわたり高い充填密度を維持していた。

以上の結果、変位を細粒の径より小さくなる程度に設定し、最低 1G 以上の加速度を与えると充填が進行しかつ充填終了後も偏析が生じにくいものであることが示された。

## 5.2.3 振動波形の影響

### (1) 試験概要

これまでの試験においては充填時に与える振動は一定周波数であったが、周波数をランダムにふった場合の影響を調べるため、加速度を 5G とし周波数は 200~300Hz でランダムにした試験を実施した。なお、比較のため 200Hz、300Hz でそれぞれ一定とした場合の結果も示す。粒子は粗粒、細粒ともイットリア安定化ジルコニアとした。

### (2) 試験結果

結果を図 5.2-6 に示す。周波数をランダムにした場合は振動初期の充填速度が一定周波数に比べて遅かったが、その後の挙動は 200Hz と 300Hz の一定周波数の場合の間となり、特異な挙動を示すものではなかった。

### 5.3 その他の影響試験

振動充填における幾何学的ファクターと動的ファクター以外のものとして、充填量、充填方法、荷重が考えられる。そこでこれらの影響を評価する試験を行った。

これらの試験ではすべて粗粒径 800 $\mu\text{m}$ 、細粒径 100 $\mu\text{m}$  とし、振動条件は 200Hz、5G とした。

#### 5.3.1 充填量の影響評価

##### (1) 試験概要

充填量が変わった場合の影響を評価するため、3 種類の長さの管 (300mm, 500mm, 1000mm) を用意し、それぞれでの最大充填高さが約 170, 350, 700mm となるように充填量を調節し、充填試験を行った。粒子は粗粒、細粒ともイットリア安定化ジルコニアとした。

##### (2) 試験結果

図 5.3-1 に結果を示す。300mm の管を使用した場合は充填は急速で、一時的に充填率が 0.83 を越えた。しかしその後高い充填率を維持できずに低下し 0.81 程度で一定となる。500, 1000mm の管ではゆっくりと最大充填率に達し、その後の低下もゆっくりである。1000mm の管は特に安定で、1 時間の振動を加えても充填率は 0.806 であった。

#### 5.3.2 充填方法の影響評価

##### (1) 試験概要

これまでの充填試験では、浸透法 (粗粒を装荷したのちに細粒を装荷して粗粒の間隙に細粒を浸透させる) で行ってきたが、その他の充填方式として混合法 (振動前にあらかじめ混合して装荷) と、多層法 (粗粒・細粒をいくつかの層に分けて装荷する) について試みて、浸透法との違いを検討した。

混合法ではあらかじめ粗粒と細粒を攪拌混合した上で管に装荷した。多層法ではまず粗粒の 1/5 を装荷し次いで細粒の 1/5 を装荷、次にまた粗粒の 1/5 を装荷するといった具合に 10 層に分けて装荷した。

粒子は粗粒にイットリア安定化ジルコニアを、細粒にガラスを用いた。

## (2) 試験結果

図 5.3-2 に結果を示す。いずれの場合も多層法及び混合法では急速に充填が進行するが、充填率は浸透法には及ばず、また著しく偏析が生じていた。これより混合法、多層法では偏析が発生しやすく、高密度の充填を行うのは困難であると考えられる。

### 5.3.3 荷重の影響評価

#### (1) 試験概要

高密度の充填体を作るため、振動充填時に荷重をかけるとよい結果が得られる可能性がある。ここでは荷重をかけた状態での試験を行い、無荷重の場合と比較した。

これまでの充填試験では飛び跳ね防止のために金属棒を挿入しているが、この金属棒に 1kg の重りを固定した。粒子は粗粒・細粒ともイットリア安定化ジルコニアを用いた。

#### (2) 試験結果

図 5.3-3 に結果を示す。偏析はまったく起こらず 0.81 以上の高い充填率を維持した。これより荷重をかけた方が充填率は高くなり、充填後も安定して高い充填率を維持することがわかる。

## 5.4 粒子装填治具を用いた充填試験

### 5.4.1 充填方法の改良

振動充填では、押さえ棒を載せず粒子上面がオープンな状態で振動を加えて試験を実施した場合、大きめの加速度を加えると上部の粒子が飛び跳ねる現象が起き、粗粒の偏析が起きてしまう（図 5.4-1(1)参照）。ここで粗粒の偏析を押さえることができれば、偏析のない高密度な充填体を得られるはずである。

偏析を起こさないためには、粗粒が振動によって動くのを防ぐ必要がある。この方法の一つとして粒子を装荷した後、その上から押さえ棒を装荷して粒子を押さえ込む方法がある。しかしこの方法でも偏析が発生してしまう場合がある（図 5.4-1(2)参照）。

振動条件によらず粗粒の偏析を防止する方法として、細粒を浸透させる際に粗粒と細粒の間にメッシュ状の仕切をはさみ、粗粒が上部に上がるのを防ぐ治具を製作した。治具の構造はパイプ状で、その先端部に細粒のみが通り抜けるメッシュがある。治具の中に細粒を装荷し、さらにそれを粗粒の上に装荷した状態で振動を開始させる。これにより粗粒の動きがほとんどなくなり、偏析を防ぐことができる（図 5.4-1(3)参照）。

今回製作した粒子装荷治具の外観を図 5.4-2 に示す。本節では、この治具を使用した試験を実施した。

#### 5.4.2 充填治具を用いた場合の充填挙動の把握

##### (1) 試験概要

粒子装荷治具を用いて 2 成分系による振動充填を行った場合、充填時間における充填率変化の確認をおこなう。長時間行った場合の充填状況の把握も行い、偏析、細粒層の発生が起きるかどうかの確認も行う。

##### (2) 試験方法

粗粒は今までと同様に 20.0 g を装荷し、粒子装荷治具には 10.0 g 細粒を入れておく。1 分間振動を加えた後、治具の中に残った細粒の重量を測定し、すでに充填された細粒の重量を求める。細粒と治具を元に戻して 1 分間振動を加え、同様のことを繰り返す。粗粒の隙間がなくなり充填が終了した後も数分間について行い、充填終了後の状況も確認する。試験は粒径比が 7.0 と 8.4 について実施した。

##### (3) 試験結果

試験結果を図 5.4-3 に示す。充填過程の様子（図 5.4-4）を見てわかるように、振動を開始させると細粒が治具から落ちだし、粗粒の中に浸透しているのがわかる。浸透が終了すると、しばらくの間は充填状態に変化がない。この間では充填率に変化はなく、外観上細粒が充填されていない箇所や細粒層がないため、この間のどのタイミングで振動を停止させても同様の充填体を得られるはずである。しかし、ある時間を過ぎると、上部に細粒層が生成し細粒がたまり始める。このたまりは時間が経つにつれて大きくなっていくが、ピン全体の充填率自体に大きな変化はない。

粒径比が 7.0 の場合では、充填体に達するまで約 11 分であり、充填後偏析の発生が開始するまで約 3 分間ある。粒径比が 8.4 の場合は、到達時間が 3 分と短く、偏析の開始までは 5 分近くある。これは粒径比が大きい方が充填が速やかに進行することを示す。

以上の結果、充填治具により均一にかつ偏析の発生をおさえつつ充填する事が可能であることが示された。

#### 5.4.3 充填結果の再現性確認試験

##### (1) 試験概要

同一条件で繰り返し充填試験を行った際の、充填率及び充填時間のばらつき

がどのくらいあるか把握する。

全く同じ条件で充填試験を繰り返し行い、到達充填密度および充填時間を測定し、そのばらつきを調べた。試験では粒径比が 7.0 と 8.4 について 3 回ずつ繰り返し実施した。

## (2) 試験結果

充填率と充填時間の再現性試験の結果を図 5.4-5 に示す。図からわかるように充填率に関しては、ばらつきがほとんどない結果となった。充填率は、装荷重量と装荷高さより計算で求めるが、測定誤差を重量で 0.1 g、高さで 1 mm とした場合では充填率の測定誤差は約 0.5% となる。繰り返し試験を行った結果は測定誤差範囲内となっており、充填率に関してはばらつきがなく安定した充填率を得ることができるといえる。

しかし、充填が完了するまでの時間には数分のばらつきがある。そのため、複数のピンを同時に充填する場合など振動時間を一定として充填を行った場合、充填体ごとの充填率にばらつきが出る可能性がある。

以上より、充填率の再現性はよく、毎回ほぼ安定した充填率を得ることが可能であることがわかった。充填時間に関しては粒径比が大きく充填時間が短い場合は、充填時間のばらつきは小さいが、粒径比が小さくなり充填時間が 10 分以上掛かる場合は、数分のばらつきが生じることがわかった。これより数本同時に充填を行うなど振動時間を一定とすることを想定した場合はなるべく粒径比が高いことが望ましいことがわかる。

表 5.1-1 ガラスビーズの粒度分布と真球度

サ ン プ ル			粒 度 分 布		真 球 度	
色	名 称	分 級 範 囲	平 均 粒 径	標 準 偏 差	真 球 度	標 準 偏 差
橙	橙 1	そのまま	795 $\mu\text{m}$	42	1.02	0.01
	橙 2	710~850 $\mu\text{m}$	787 $\mu\text{m}$	28		
黄	黄 1	そのまま	798 $\mu\text{m}$	96	1.04	0.04
	黄 2	~710 $\mu\text{m}$	648 $\mu\text{m}$	36		
	黄 3	~850 $\mu\text{m}$	705 $\mu\text{m}$	63		
	黄 4	710~850 $\mu\text{m}$	776 $\mu\text{m}$	33		
	黄 5	850 $\mu\text{m}$ ~	890 $\mu\text{m}$	37		
赤	赤 1	そのまま	840 $\mu\text{m}$	103	1.03	0.02
	赤 2	~710 $\mu\text{m}$	675 $\mu\text{m}$	30		
	赤 3	710~850 $\mu\text{m}$	781 $\mu\text{m}$	30		
	赤 4	850 $\mu\text{m}$ ~	930 $\mu\text{m}$	38		
白	白 1	そのまま	891 $\mu\text{m}$	68	1.13	0.12
	白 2	710~850 $\mu\text{m}$	844 $\mu\text{m}$	59		
	白 3	850 $\mu\text{m}$ ~	945 $\mu\text{m}$	49		
	100 $\mu\text{m}$	そのまま	111 $\mu\text{m}$	14	1.02	0.02
	70 $\mu\text{m}$	そのまま	81 $\mu\text{m}$	7	1.02	0.01
	50 $\mu\text{m}$	そのまま	61 $\mu\text{m}$	4	1.02	0.01

表 5.1-2 2成分系での充填試験条件

粗 粒		細 粒		管の材質	(粗粒)/(細粒) 比率
粒径( $\mu\text{m}$ )	材質	粒径( $\mu\text{m}$ )	材質		
800	ZY*	50	ガラス	アクリル	(0.73)/(0.27)
800	ZY	100	ガラス		(0.77)/(0.23)
800	ZY	200	ガラス		(0.84)/(0.16)
800	SUS	100	SUS		(0.77)/(0.23)
800	ZY	100	ZY		(0.77)/(0.23)
650	ZY	100	ガラス		(0.79)/(0.21)
800	ZY	100	ガラス	SUS	(0.77)/(0.23)

\* イットリア安定化ジルコニア

表 5.1-3 試験でを使用したイットリア安定化ジルコニアの平均粒径

公称値 (μm)	平均値 (μm)	標準偏差 (μm)
100	113	7
650	698	23
800	831	18

表 5.1-4 3成分充填試験の試験条件

	粒径			充填比率	加速度 (G)	周波数 (Hz)
	粗粒	中間粒	細粒			
逐次充填による比率	800	250-400	105-125	0.621:0.077:0.070	5	200
RIARの採用比率				2:3:5		

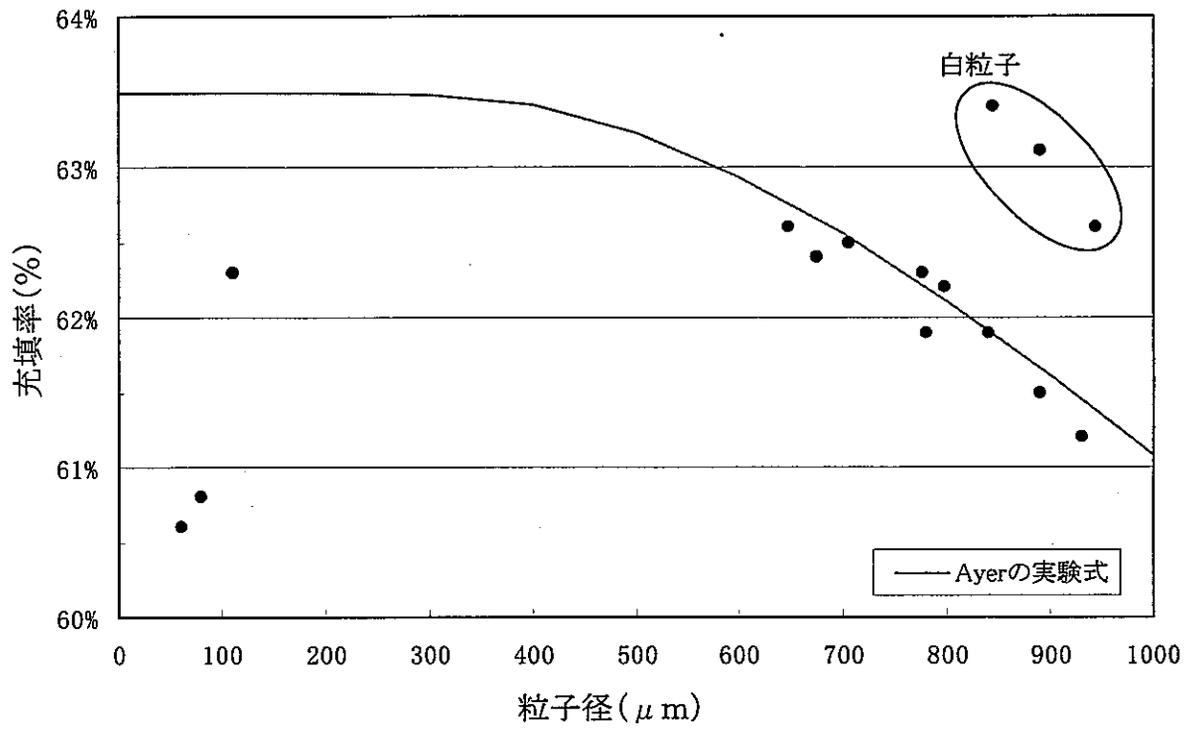


図5. 1-1 1成分における粒度分布と充填率の関係

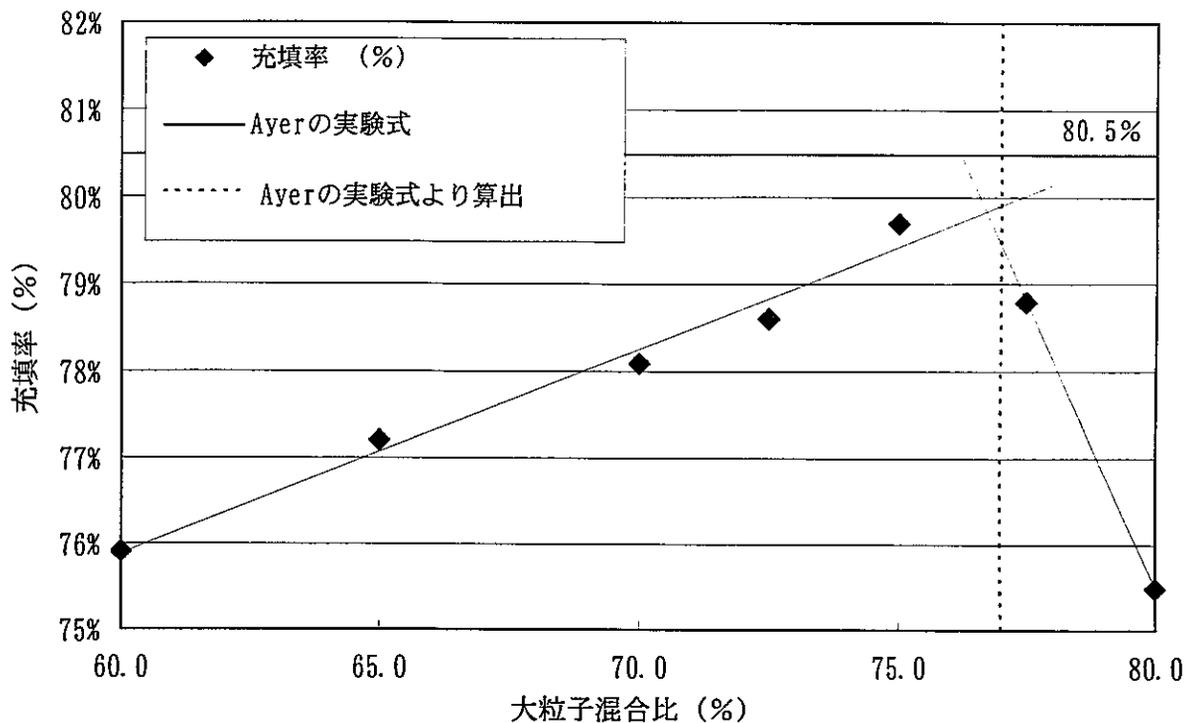


図5. 1-2 (a) 混合比と充填密度の関係 (800  $\mu$ m : 100  $\mu$ m)

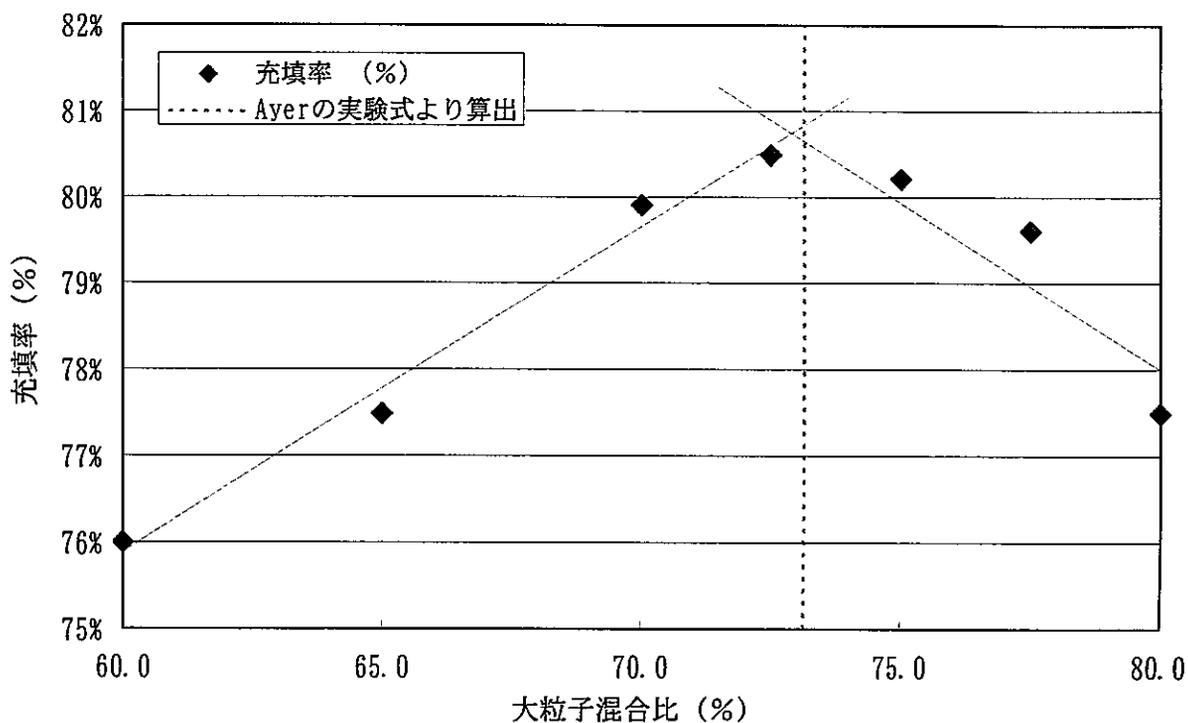


図5. 1-2 (b) 混合比と充填密度の関係 (800  $\mu$ m : 50  $\mu$ m)

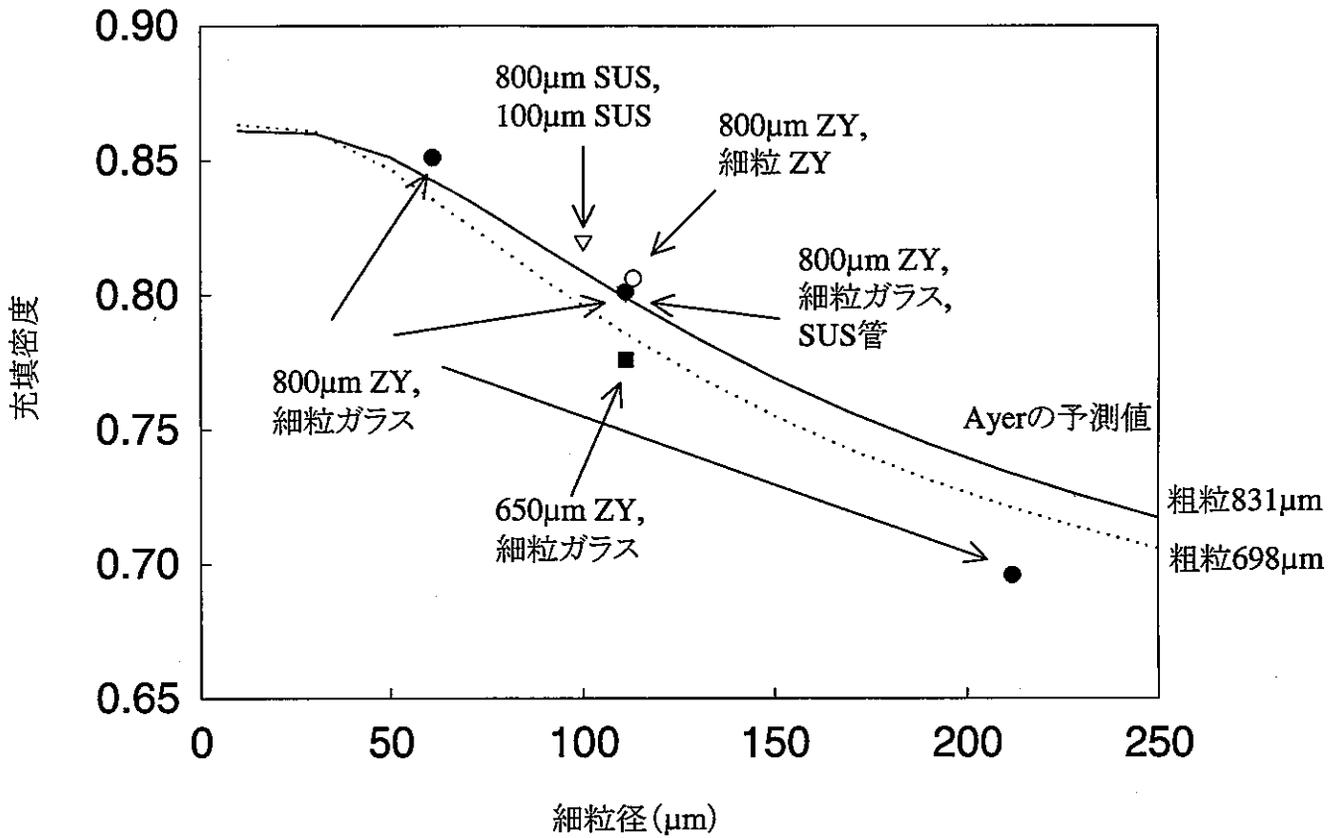


図5. 1-3 2成分系における充填密度

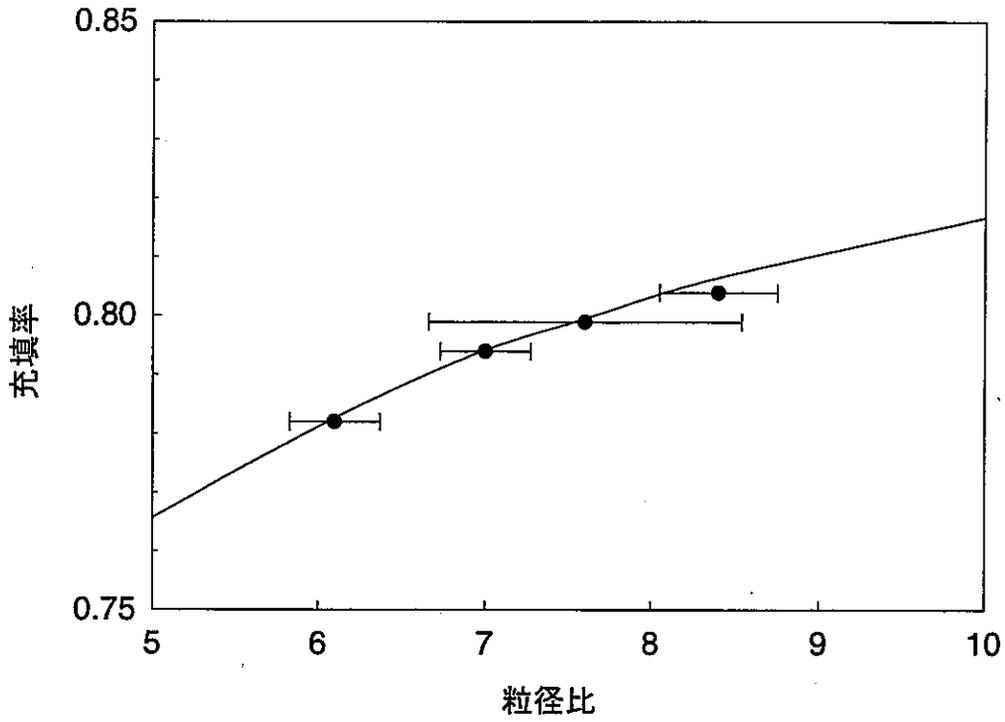


図5.1-4 粒径のばらつきの充填率への影響

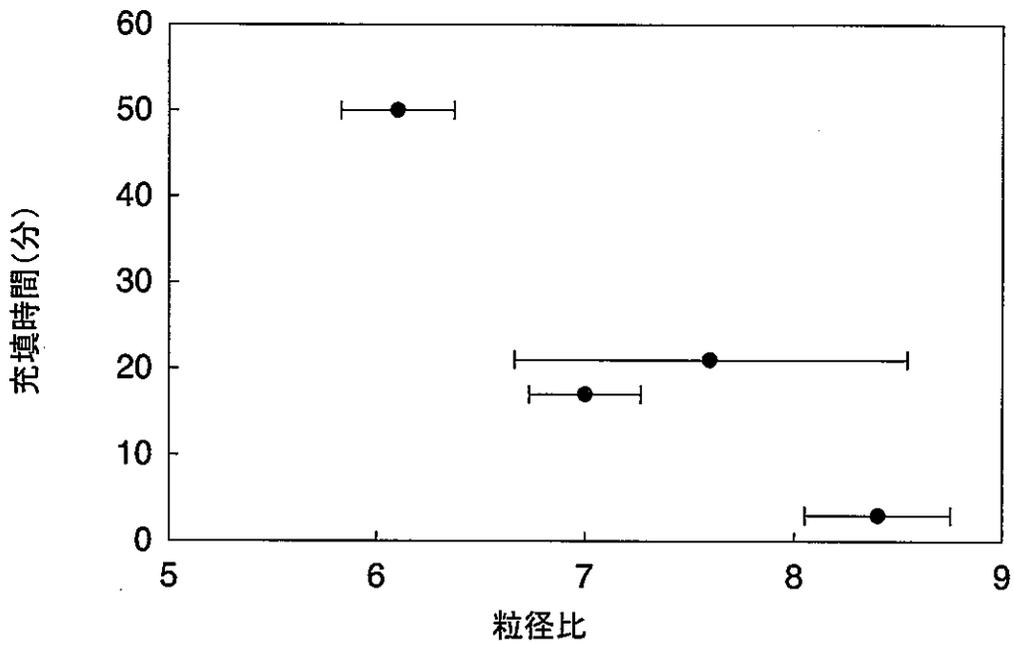


図5.1-5 粒径のばらつきによる充填時間への影響

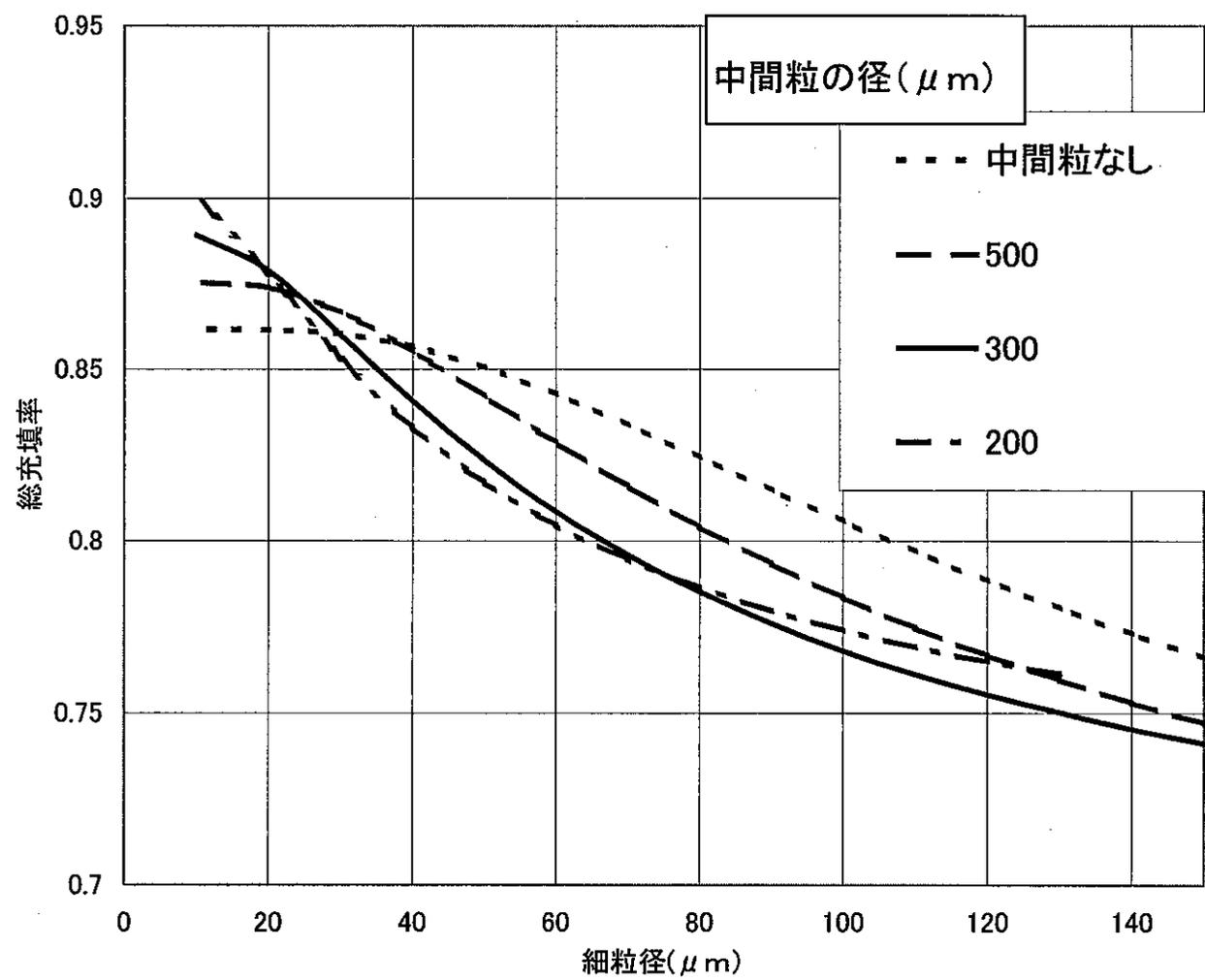


図5.1-6 Ayerの密度式に基づく3成分系の充填率

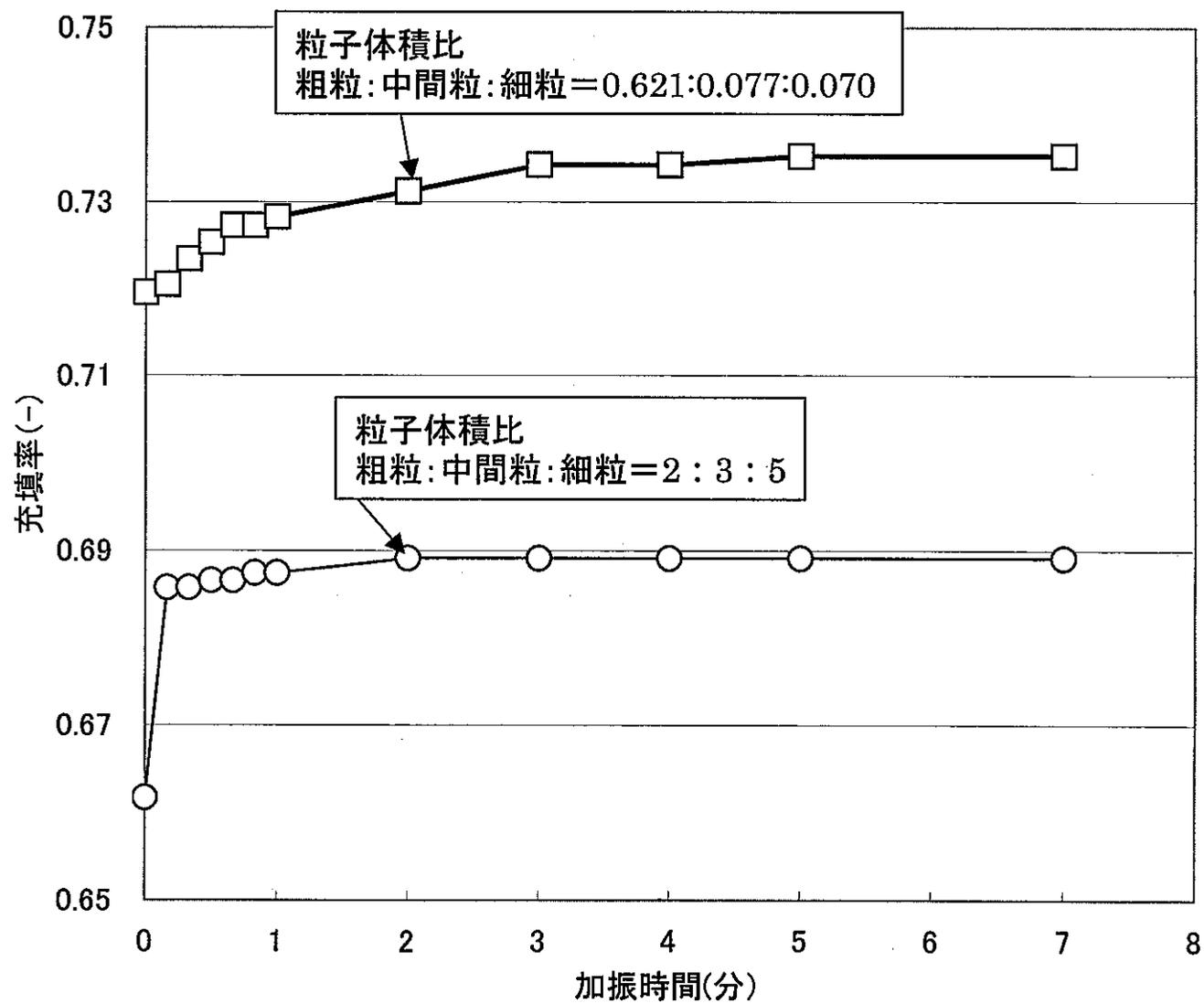


図5. 1-7 3成分球状粒子の充填挙動

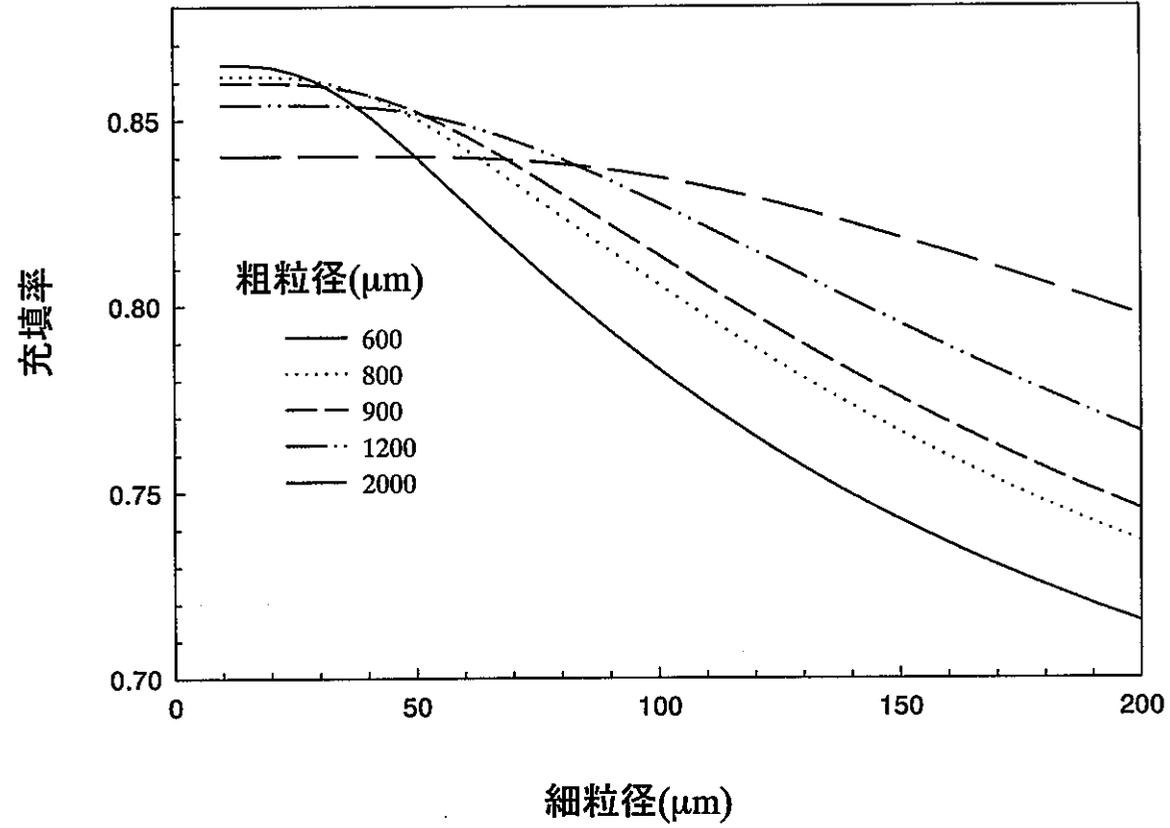


図5.1-8 Ayerの密度式に基づく2成分系の充填率

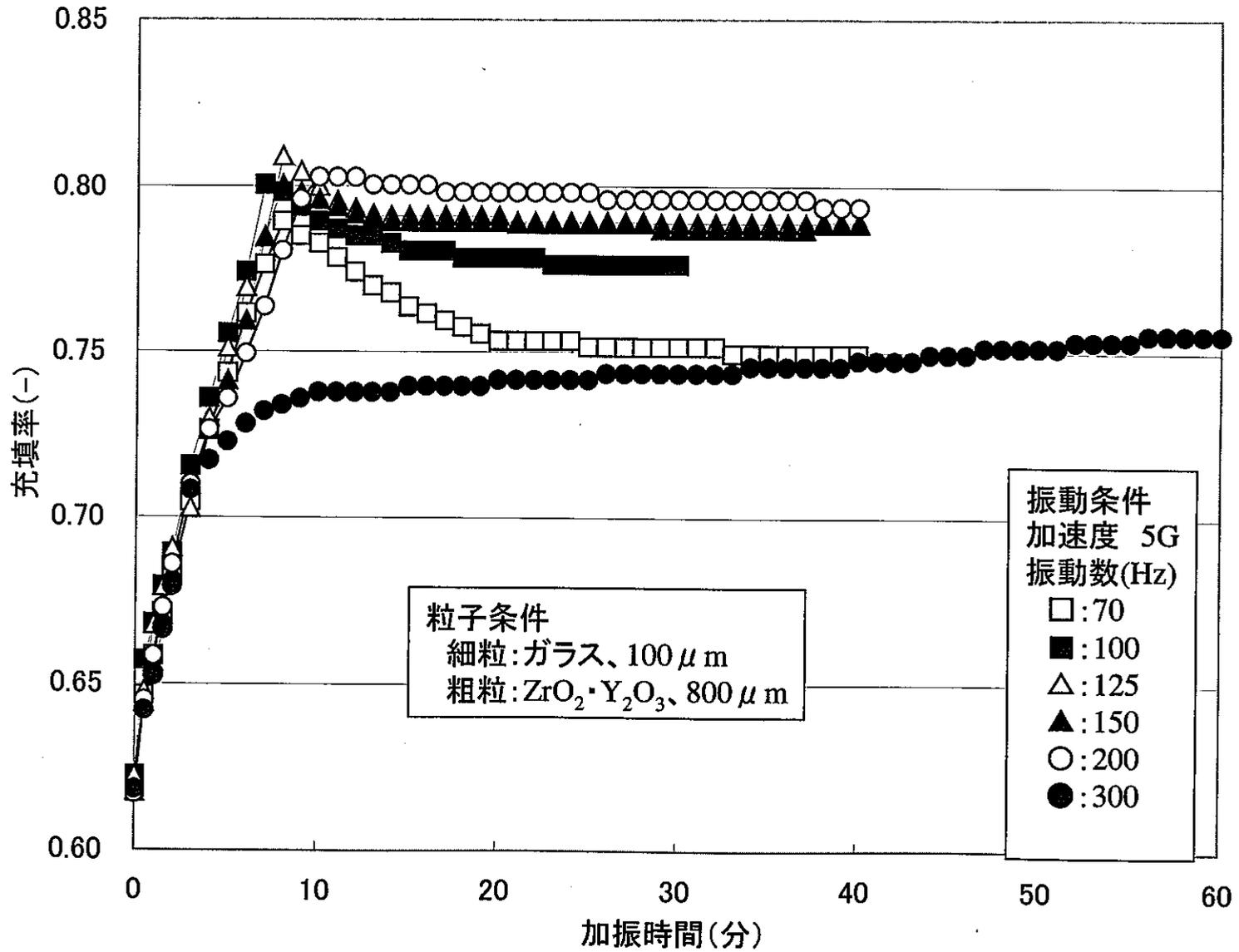


図5. 2-1 充填挙動に及ぼす周波数の影響 (5G)

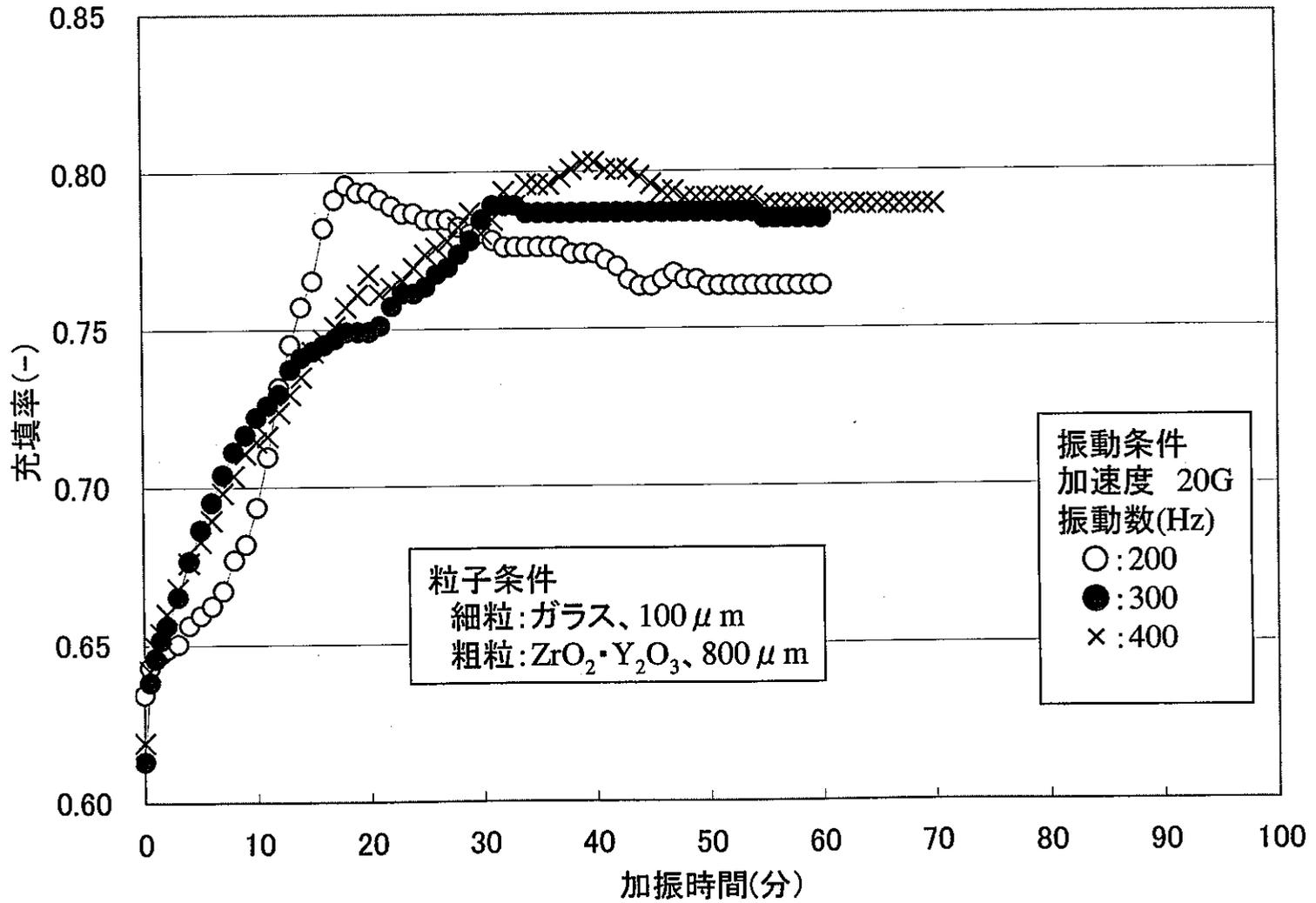


図 5.2-2 充填挙動に及ぼす周波数の影響 (20G)

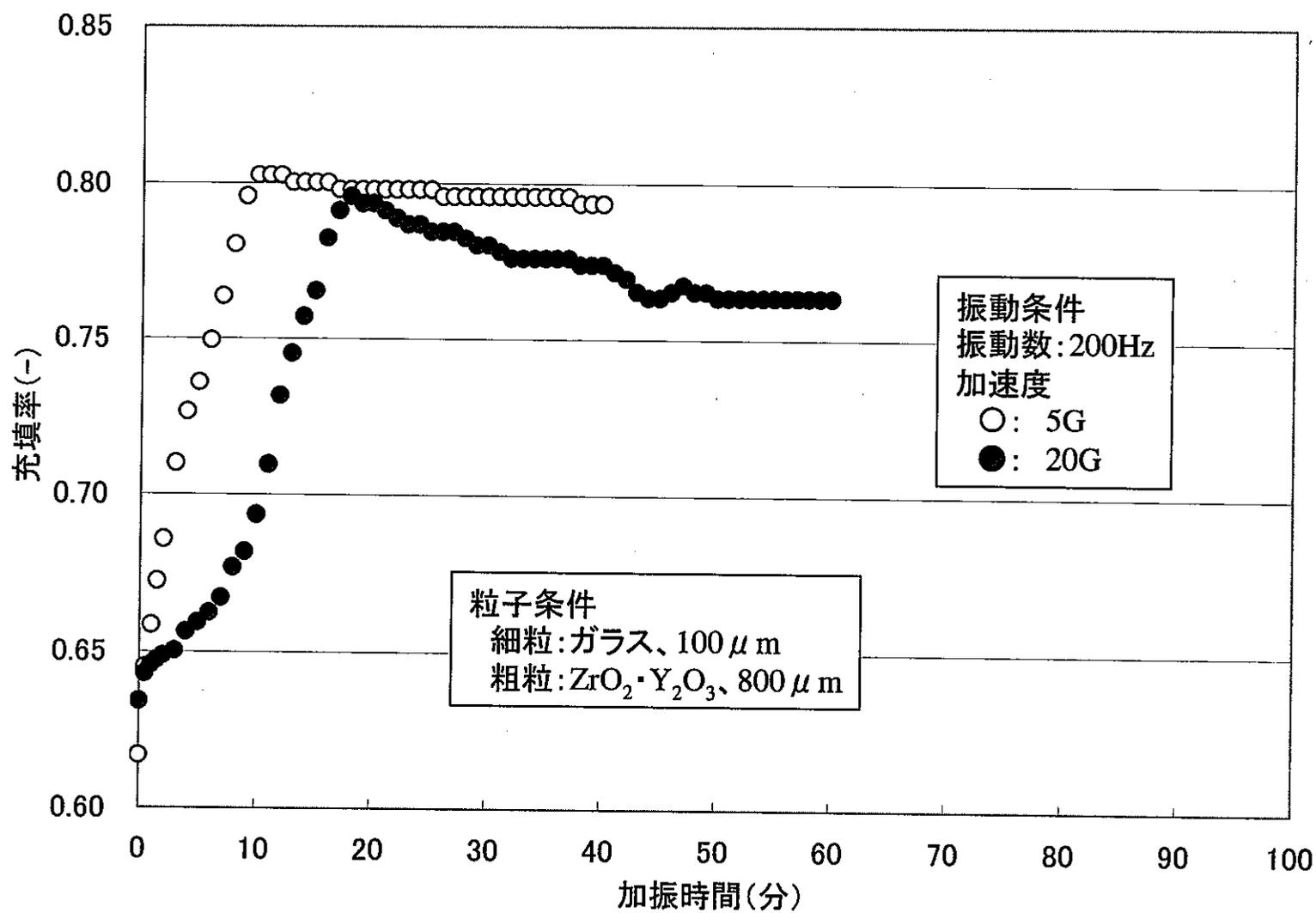


図 5.2-3 充填挙動に及ぼす加速度の影響 (200Hz)

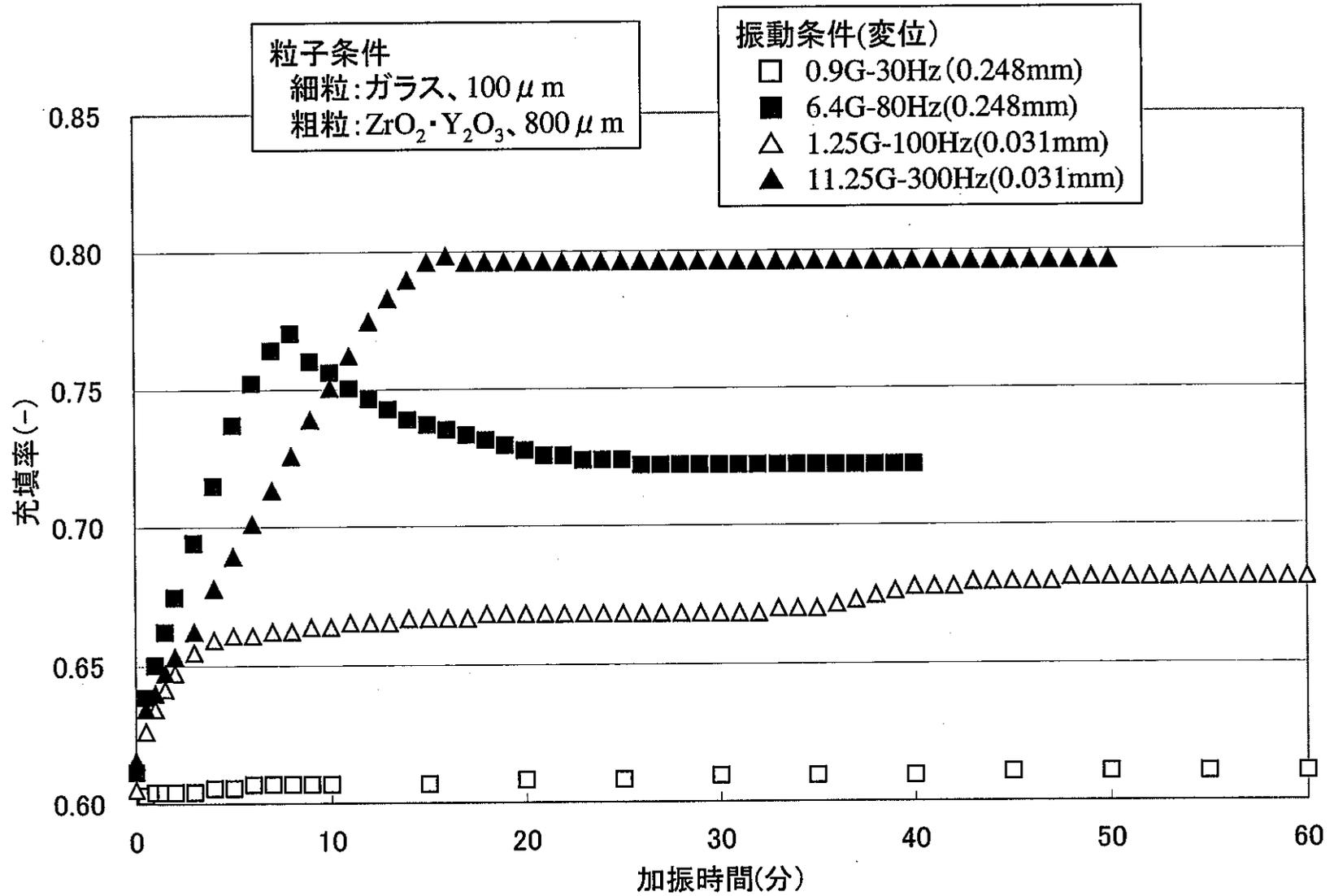


図5. 2-4 充填挙動に及ぼす変位の影響 (ジルコニア-ガラス)

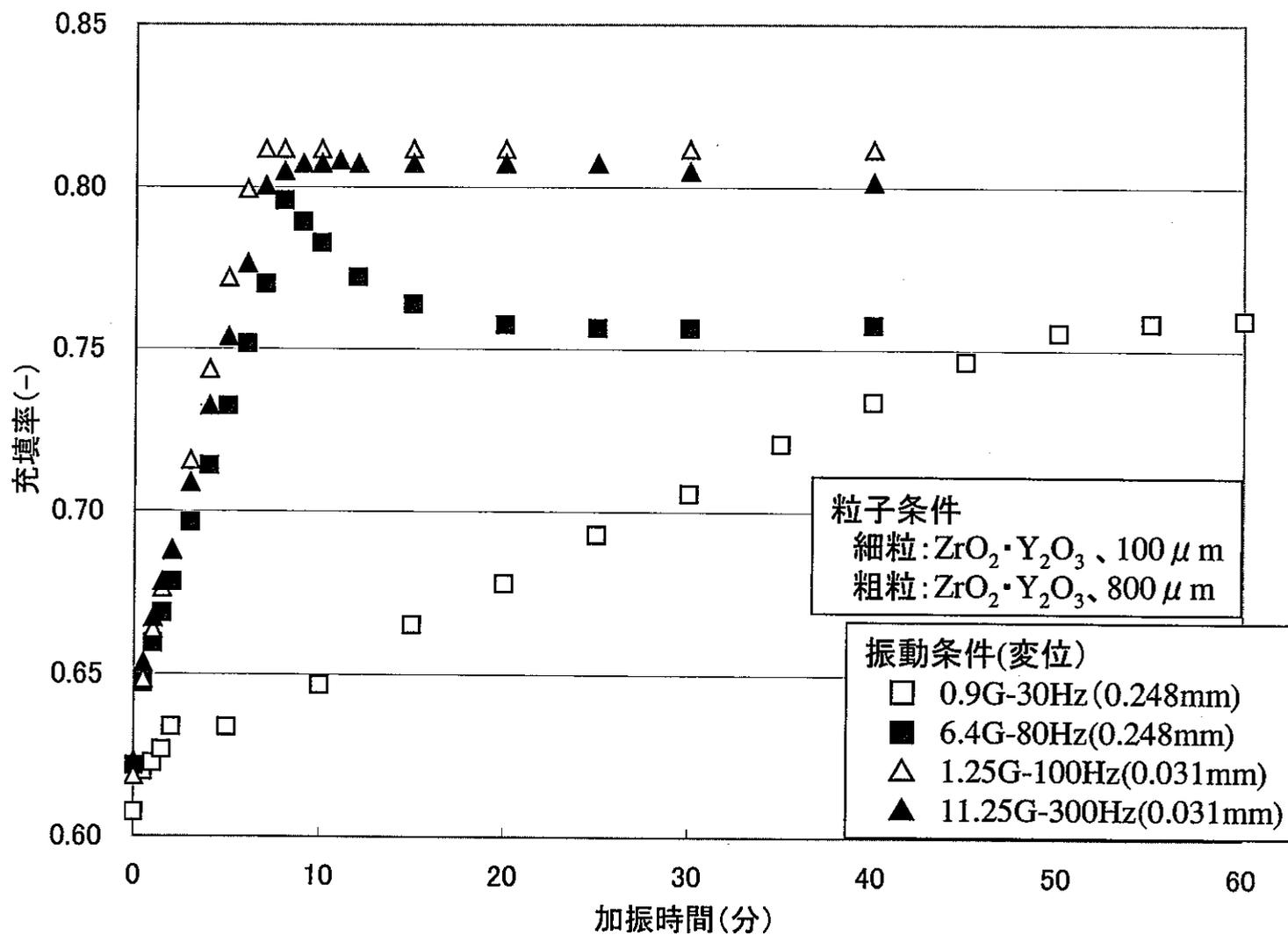


図5. 2-5 充填挙動に及ぼす変位の影響 (ジルコニア-ジルコニア)

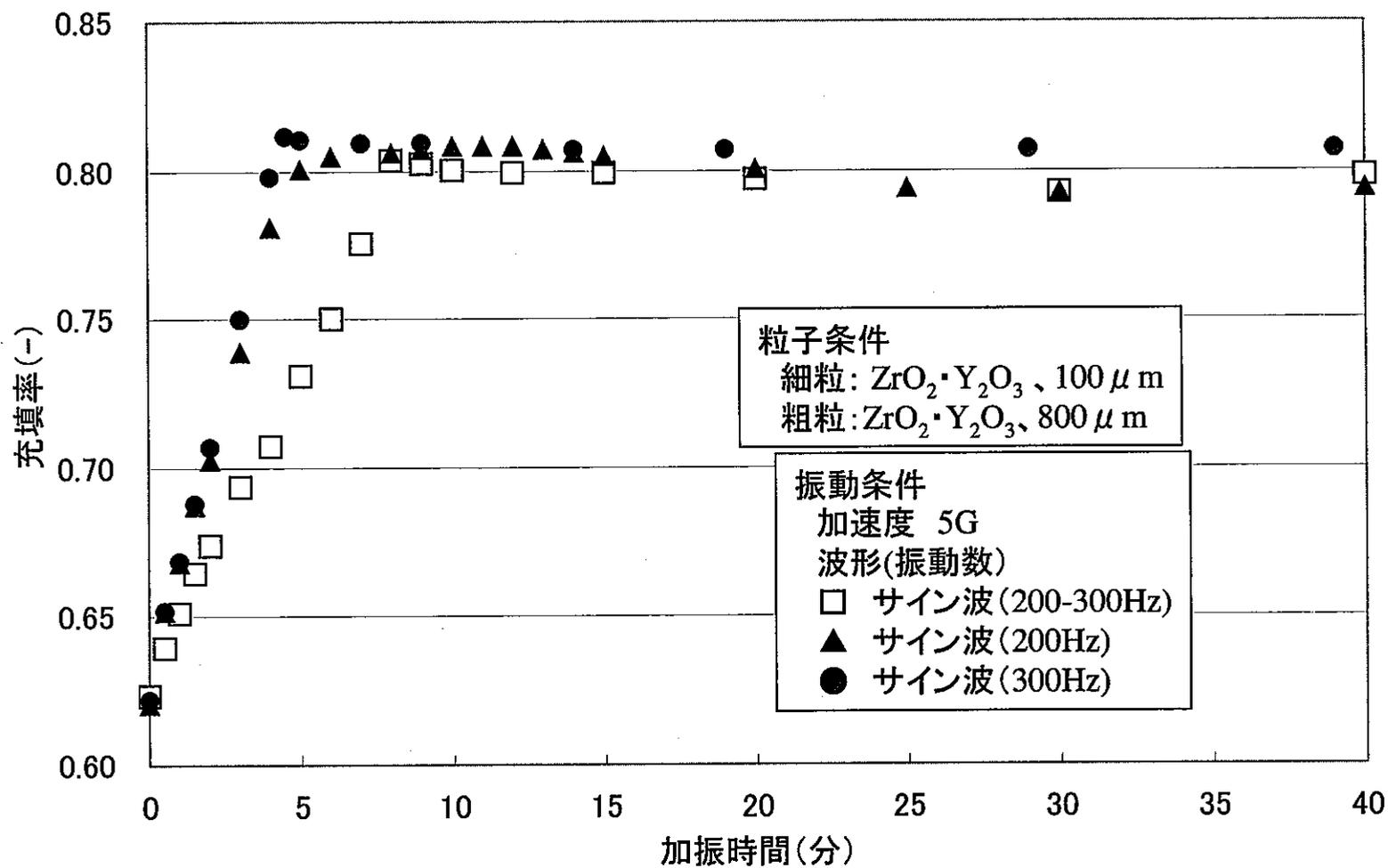


図5. 2-6 充填挙動に及ぼす振動波形の影響

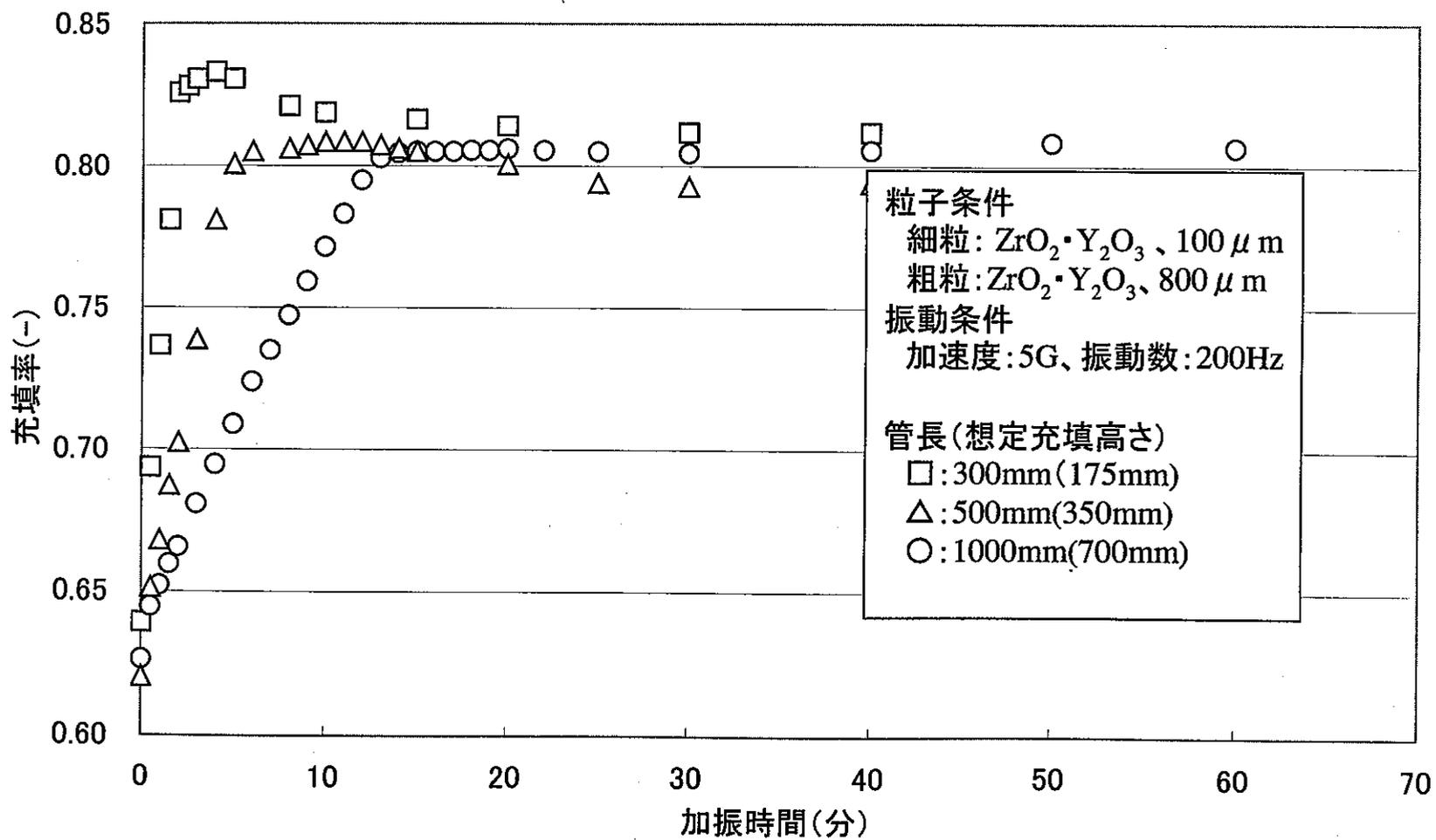


図5. 3-1 充填挙動に及ぼす充填量の影響

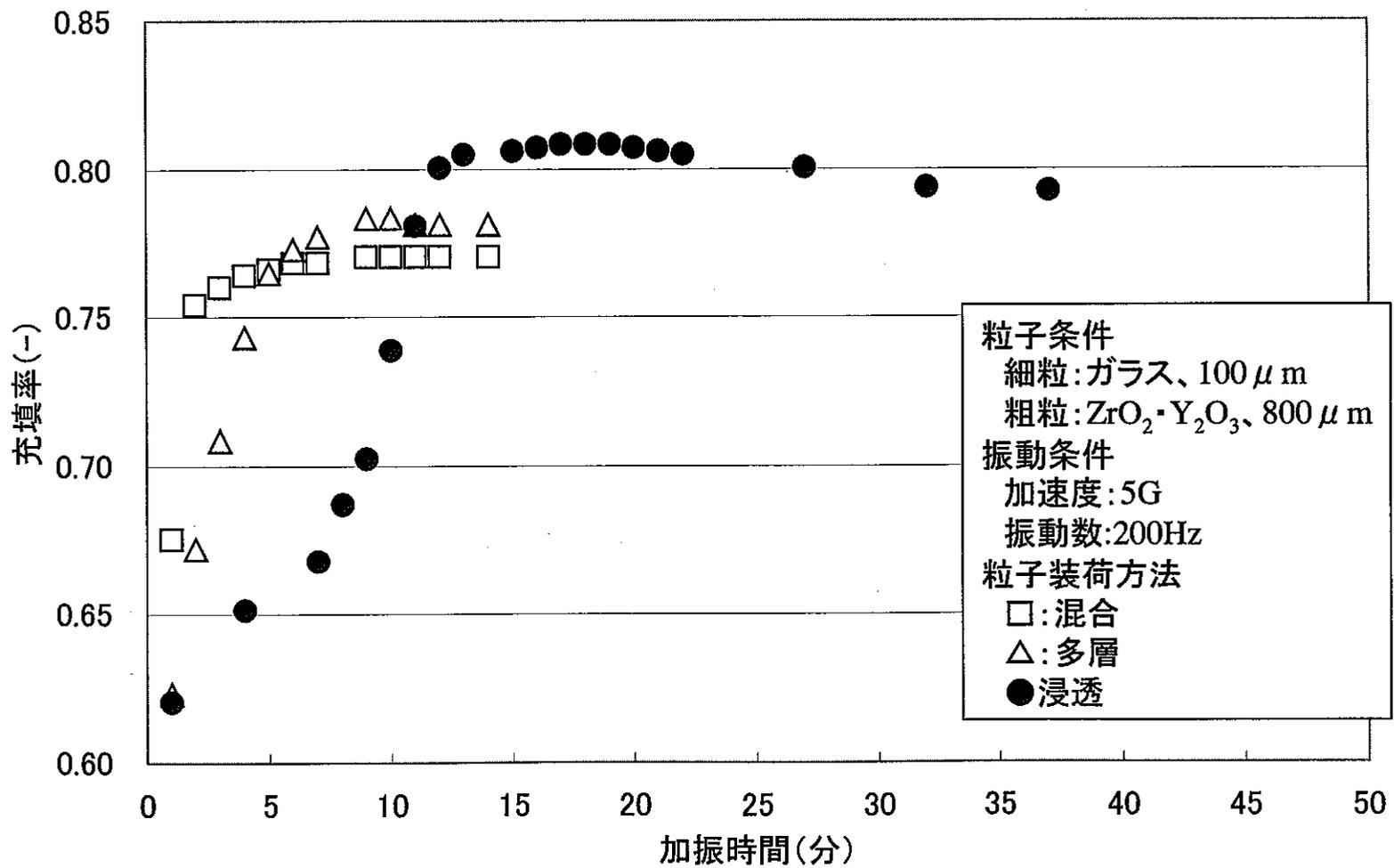


図5. 3-2 充填方法の影響

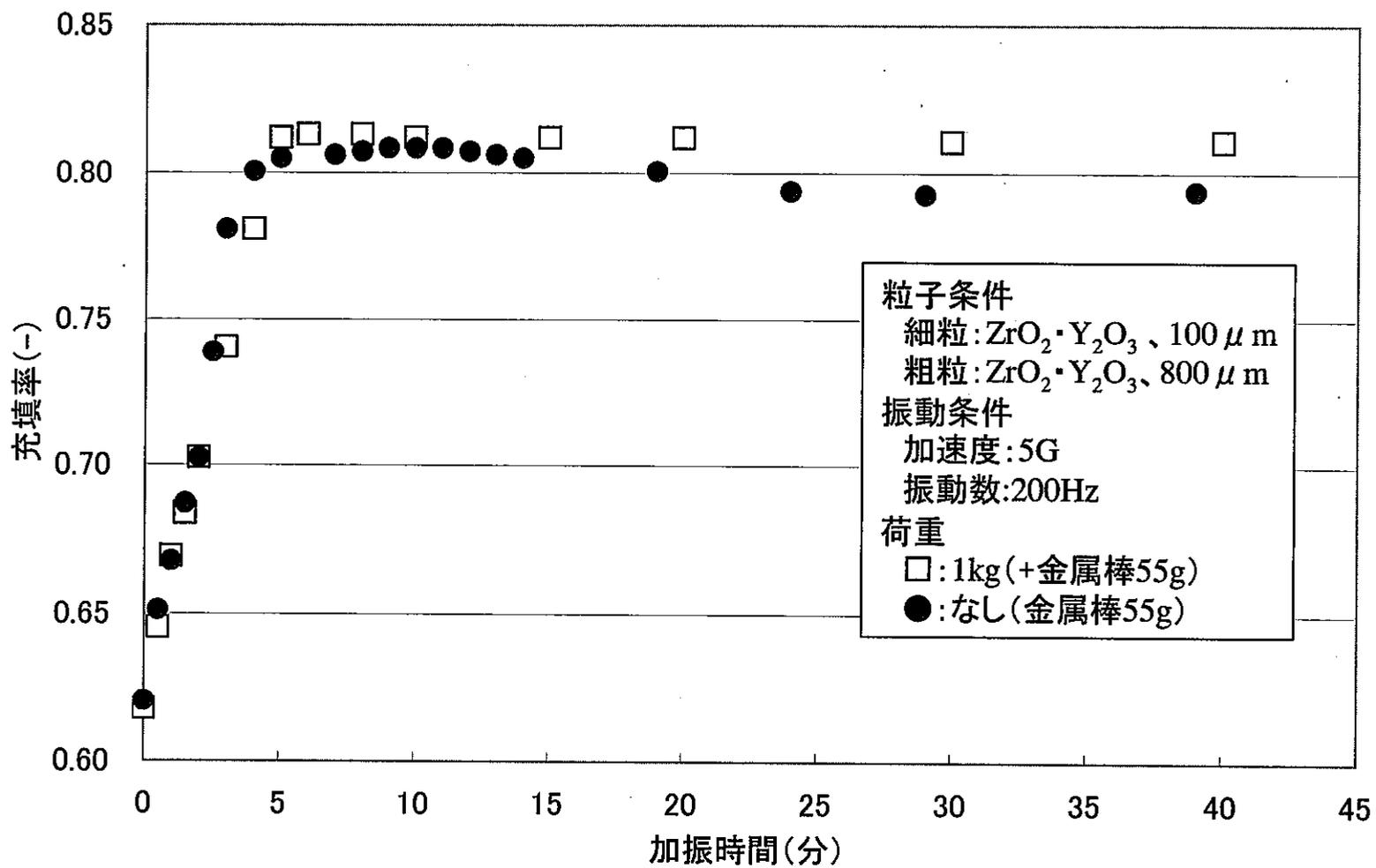
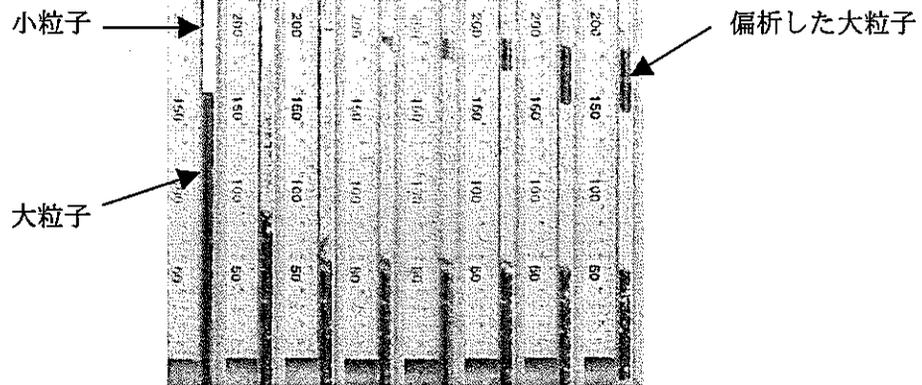
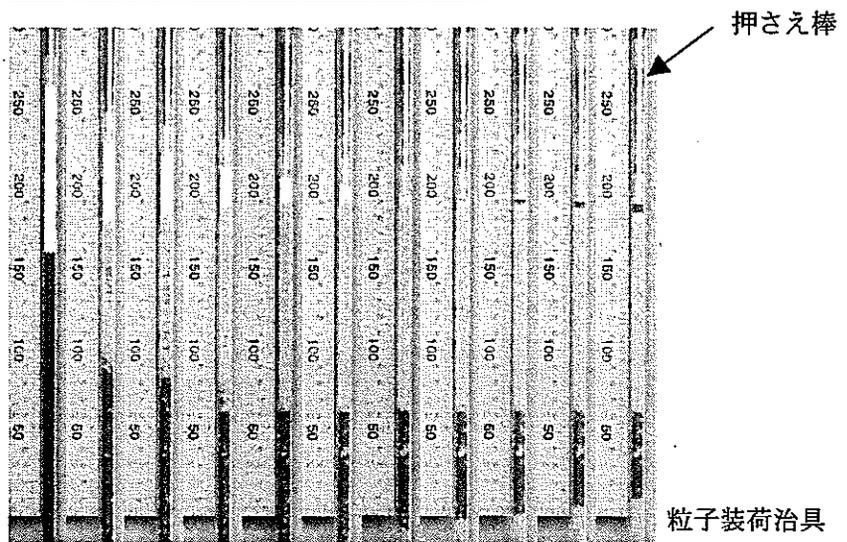


図5. 3-3 充填方法に及ぼす荷重の影響

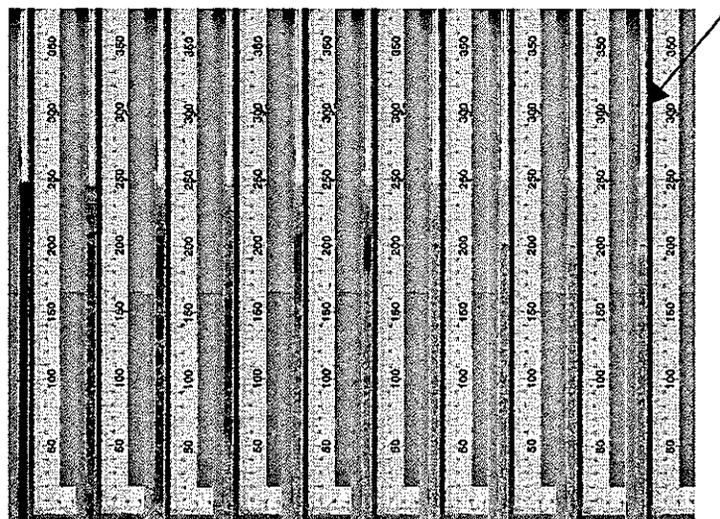
(a) 押さえ棒なし



(b) 押さえ棒あり

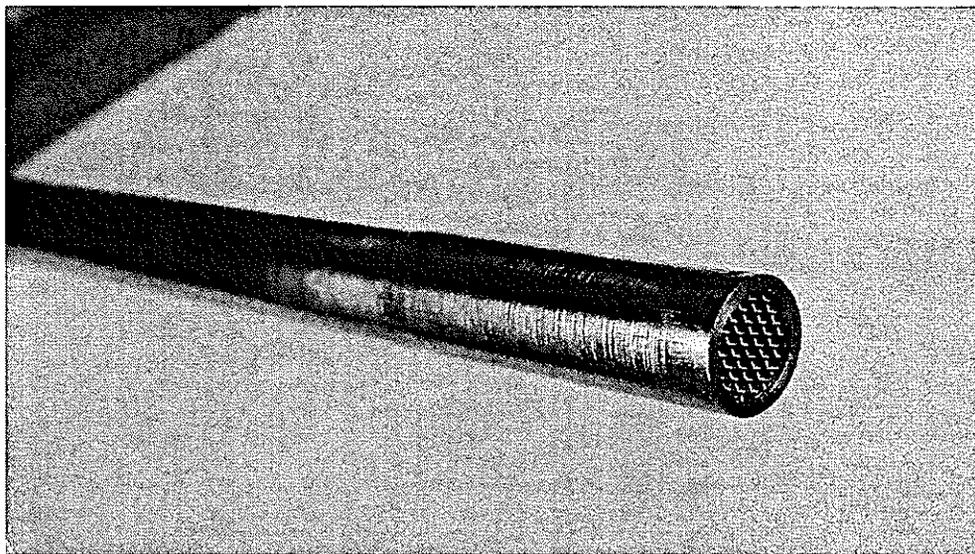
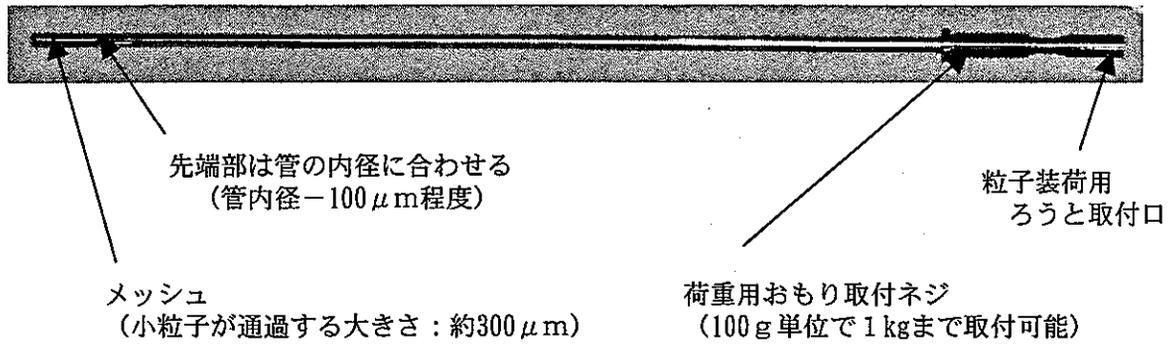


(c) 粒子装荷治具



注) 定規の読み値は+100mmである。

図5. 4-1 粒子装荷治具の効果



先端部拡大写真

図5. 4-2 粒子装荷治具

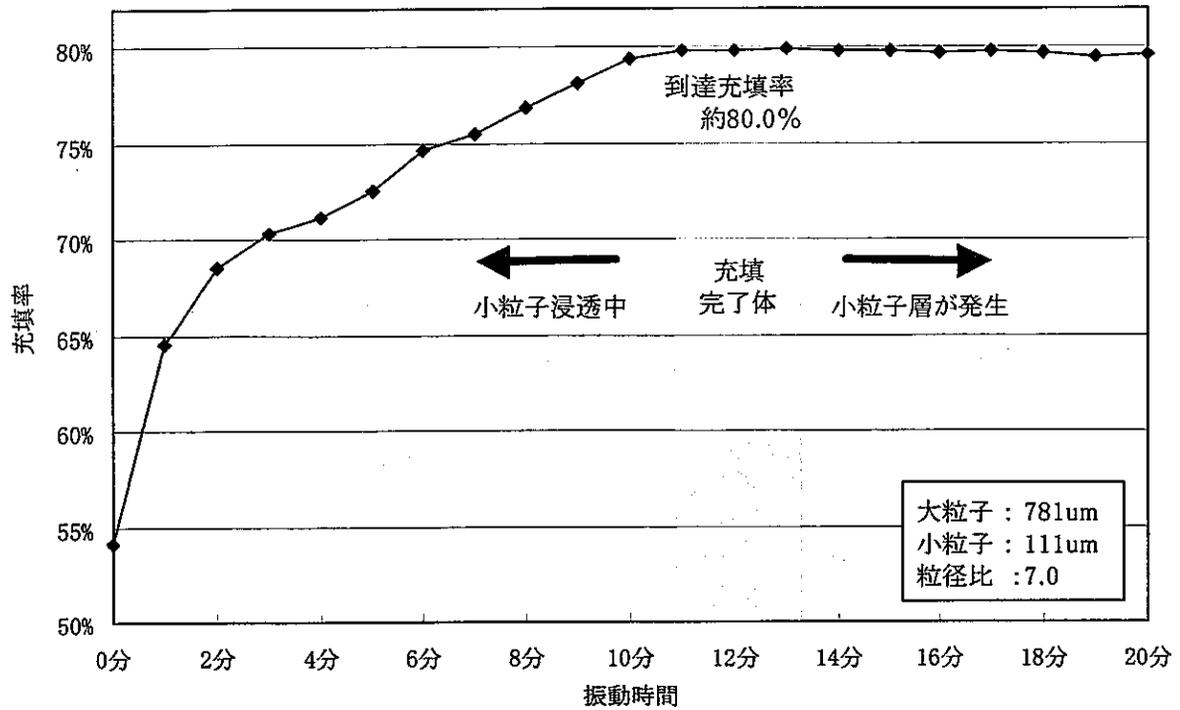


図5. 4-3 (1) 振動時間と充填率の関係 (粒径比 : 7. 0)

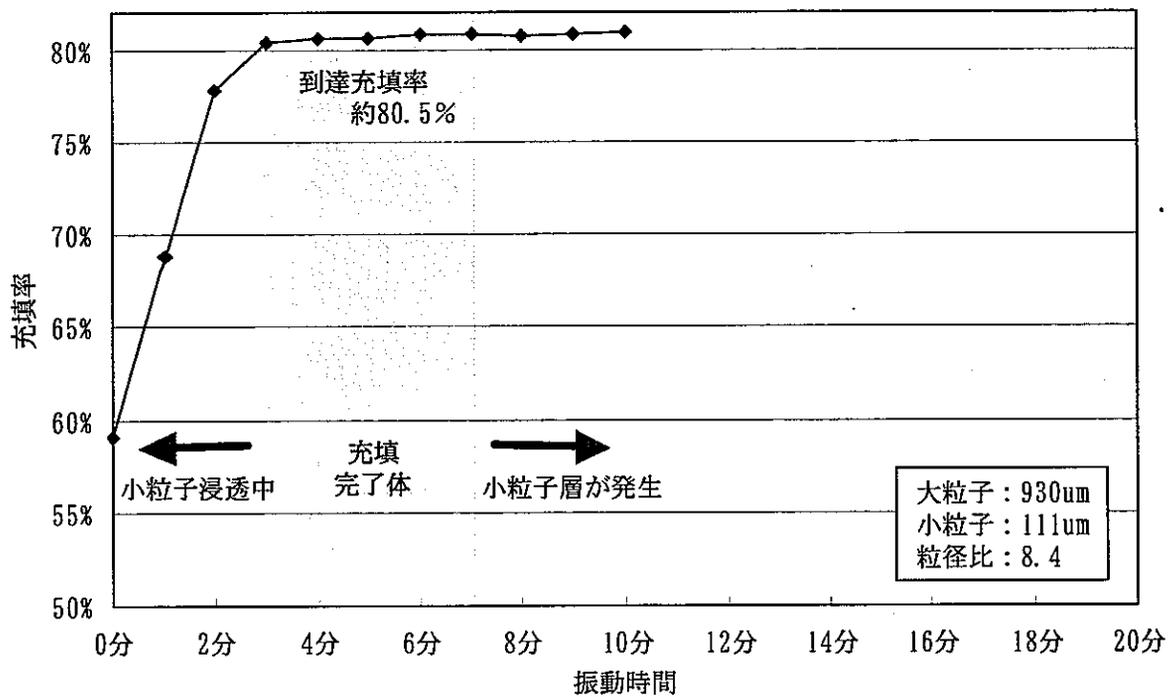
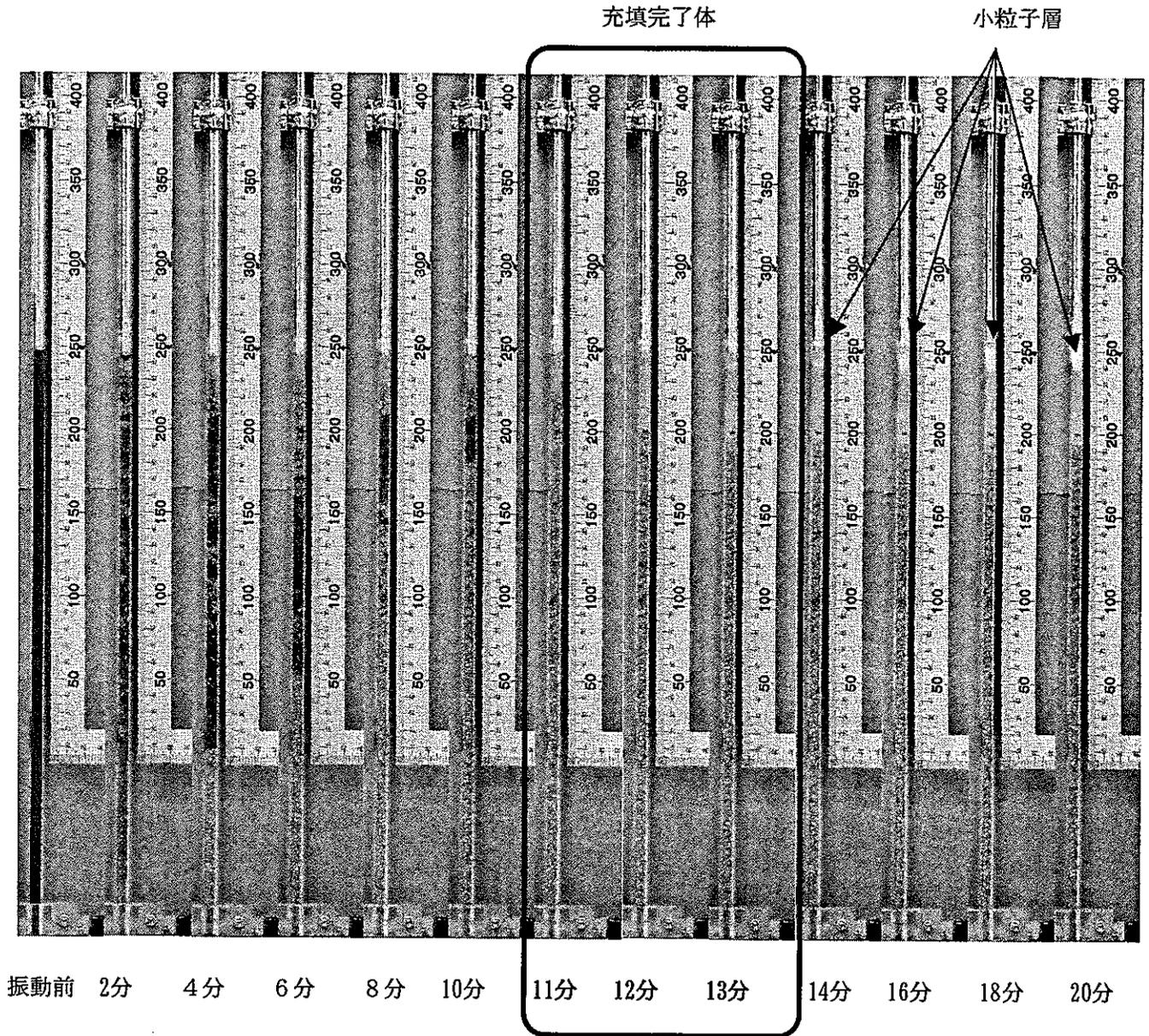
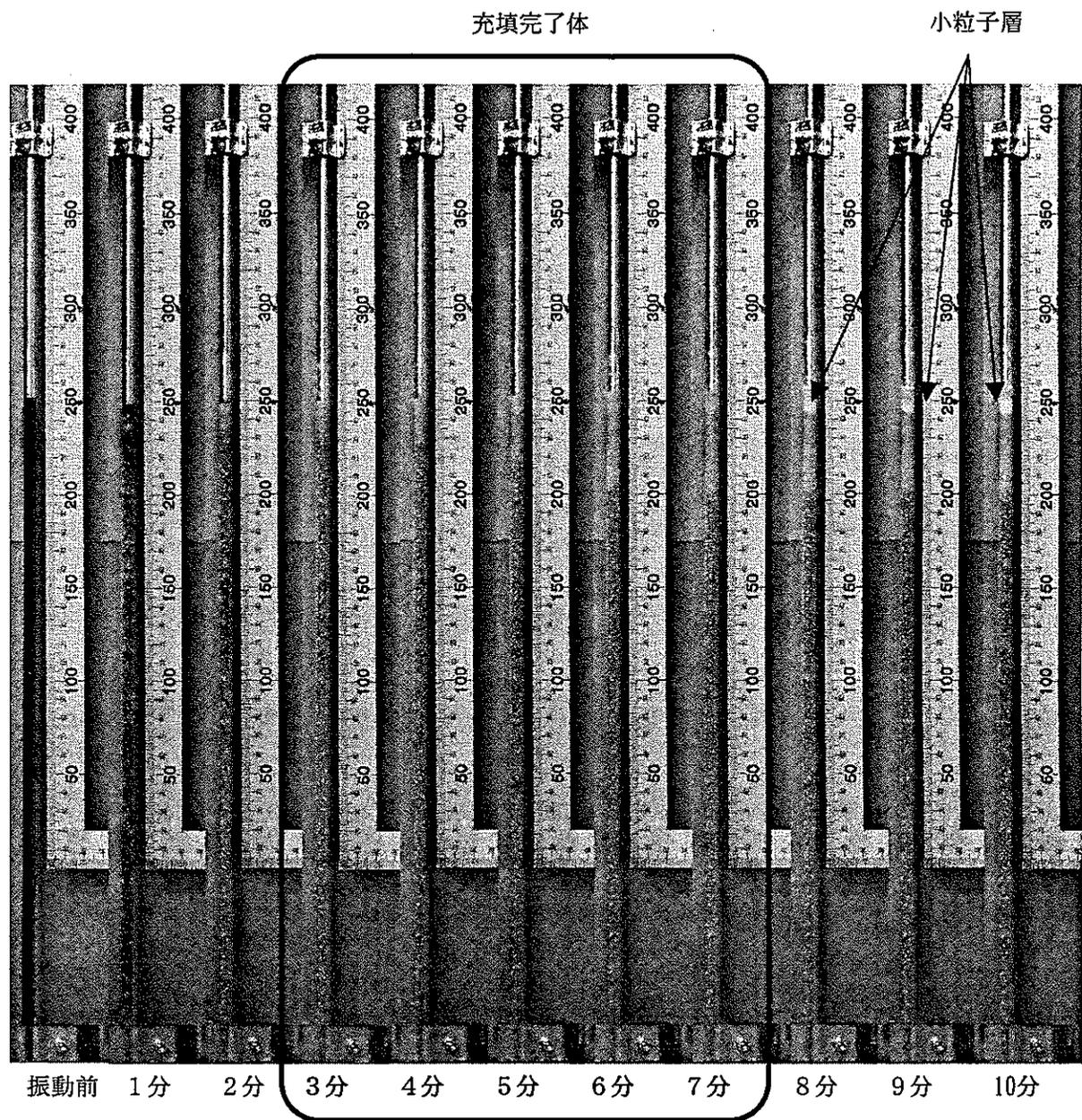


図5. 4-3 (2) 振動時間と充填率の関係 (粒径比 : 8. 4)



注) 定規の読み値は+100mmである。

図5. 4-4 (1) 粒子充填挙動 一粒径比7. 0-



注) 定規の読み値は+100mmである。

図5. 4-4 (2) 粒子充填挙動 一粒径比8. 4一

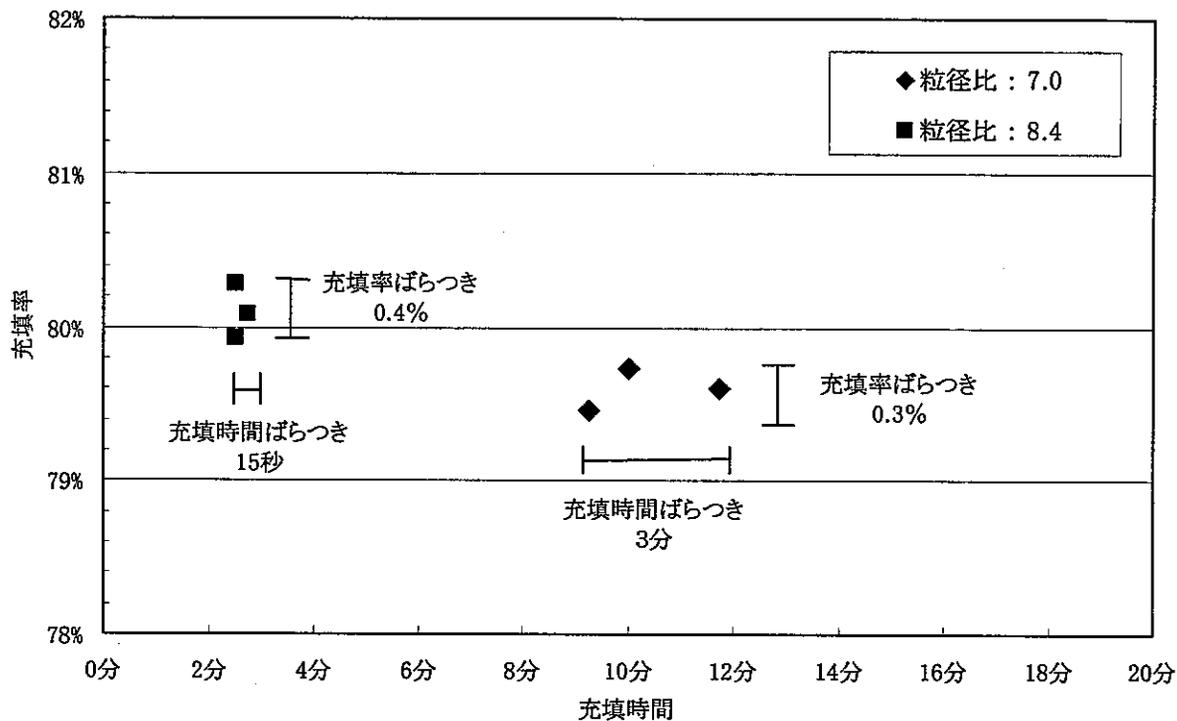


図5. 4-5 充填率、充填時間のばらつき

## 6. 塊状粒子を用いた充填試験

塊状粒子についてはロシアの原子炉科学研究所（RIAR）で乾式再処理を行った燃料を振動充填燃料として使用しているのが知られている。ここでは塊状粒子についての充填挙動を把握するため、ガラス片を用いた充填試験を行う。

### 6.1 粒径分布に関わる試験

#### 6.1.1 試験条件

RIAR の報告[2]によると、粗粒 630～800  $\mu\text{m}$ 、中間粒 250～400  $\mu\text{m}$ 、細粒～100  $\mu\text{m}$  の3成分で充填を行う際、各成分の体積比は2:3:5の比率とした場合に最も高い充填率となり80%以上の充填率が得られる。これは球形粒子の際に大きい粒子の隙間に小さい粒子が充填されるという逐次充填の理論から導かれる比率とは異なる比率となっている。

そこでRIARより報告されている体積比率及び逐次充填の理論による体積比率の両方の条件で充填試験を行う。なおふるいのサイズがRIARが用いたもののサイズのものが入手できなかったため、最も近いサイズのものを用いて分級を行った。充填方法は混合法で行った。振動条件は表6.1-1に示すとおりである。

#### 6.1.2 試験結果

充填率の時間変化を図6.1-1に示す。両試験とも30秒以内に充填率の増加が止まっている。この結果よりRIARが報告している体積比率の方が逐次充填理論による体積比率より充填率が高いという結果が得られた。

これより塊状粒子の充填においては、逐次充填理論による粗粒の体積が多いという比率よりも、細粒の体積が多いという体積比率の方が高い充填比率を与えることがわかる。

### 6.2 動的ファクターに関わる試験

#### 6.2.1 試験条件

塊状粒子の充填挙動に及ぼす動的ファクターの影響試験として、周波数を変えた場合の影響評価を行った。

#### 6.2.2 試験結果

充填率の時間変化を図6.2-1に示す。充填時間、充填率ともに大きな違いはないが、振動数が高いほどやや充填率が高い結果となっている。最大充填率は約0.72であった。

### 6.3 充填挙動に及ぼす周波数掃引の影響試験

### 6.3.1 試験条件

RIAR における振動充填において、周波数掃引を行うことで充填率を向上させていることが知られている。そこで RIAR での条件を模して、300Hz から 3000Hz までの周波数掃引を行う充填試験を行った。周波数掃引速度は 1.7, 2.5, 5 回/分の 3 種類とした。

### 6.3.2 試験結果

図 6.3-1 に充填率の時間変化を示す。なお比較のため周波数掃引を行っていない場合の結果も示す。1.7, 2.5 回/分では周波数掃引を行わない場合より若干充填率が高くなっている。5 回/分の場合では著しく充填率が高くなり 80%を越えている。

このような周波数掃引を行うと粒子の破碎が起こり、破碎して細くなった粒子が粗粒の間に入り込んでいる可能性がある。そこで試験前後の粒径分布を図 6.3-2 に示す。各試験とも 710~850  $\mu\text{m}$  の粗粒が減少し、もともと存在していない 425~710  $\mu\text{m}$  の粒子が生成している。また 250~425  $\mu\text{m}$  の中間粒が減少し細粒が増加している。

しかしながら最も充填率が高かった 5 回/分の掃引が他のケースに比べて試験前後の分布の違いは小さい。これより充填率の向上に対する破碎の影響は小さく、むしろ振動条件が影響を及ぼしているものと推定される。

表 6.1-1 塊状物質の充填試験パラメータ

		粒径 ( $\mu\text{m}$ )			粒子体積分布			振動条件	
		粗粒	中間粒	細粒	粗粒	中間粒	細粒	振動数 (Hz)	加速度 (G)
粒径分布に関わる試験		710~ 850	250~ 425	~106	0.621	0.077	0.070	300	30
		710~ 850	250~ 425	~106	2	3	5	300	30
動的ファクターに関わる試験		710~ 850	250~ 425	~106	2	3	5	200	30
		710~ 850	250~ 425	~106				500	30
周波数掃引試験	5回/ 分	710~ 850	250~ 425	~106	2	3	5	300~ 3000	30
	2.5回/ 分	710~ 850	250~ 425	~106					
	1.7回/ 分	710~ 850	250~ 425	~106					

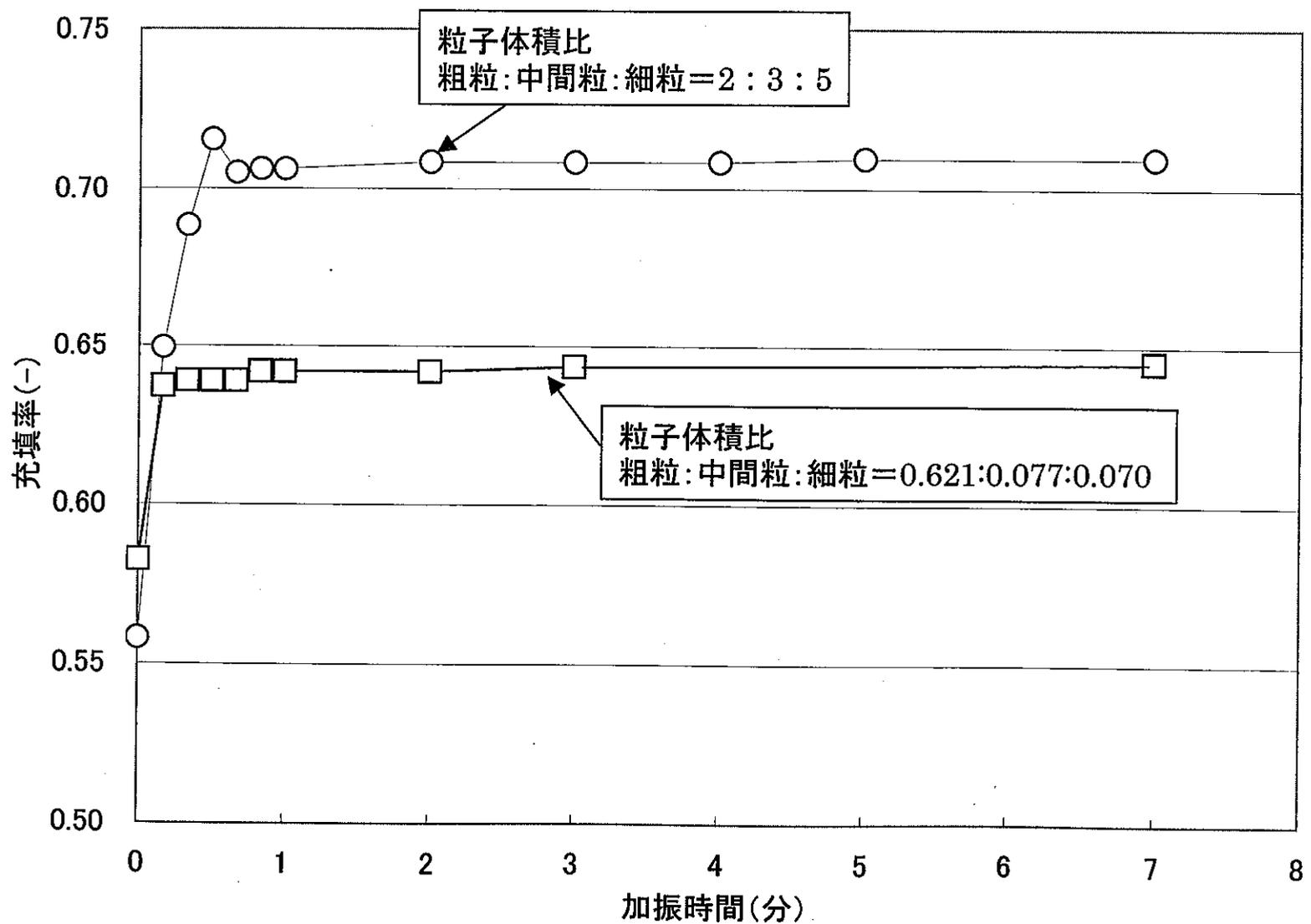


図6. 1-1 3成分塊状粒子の充填挙動

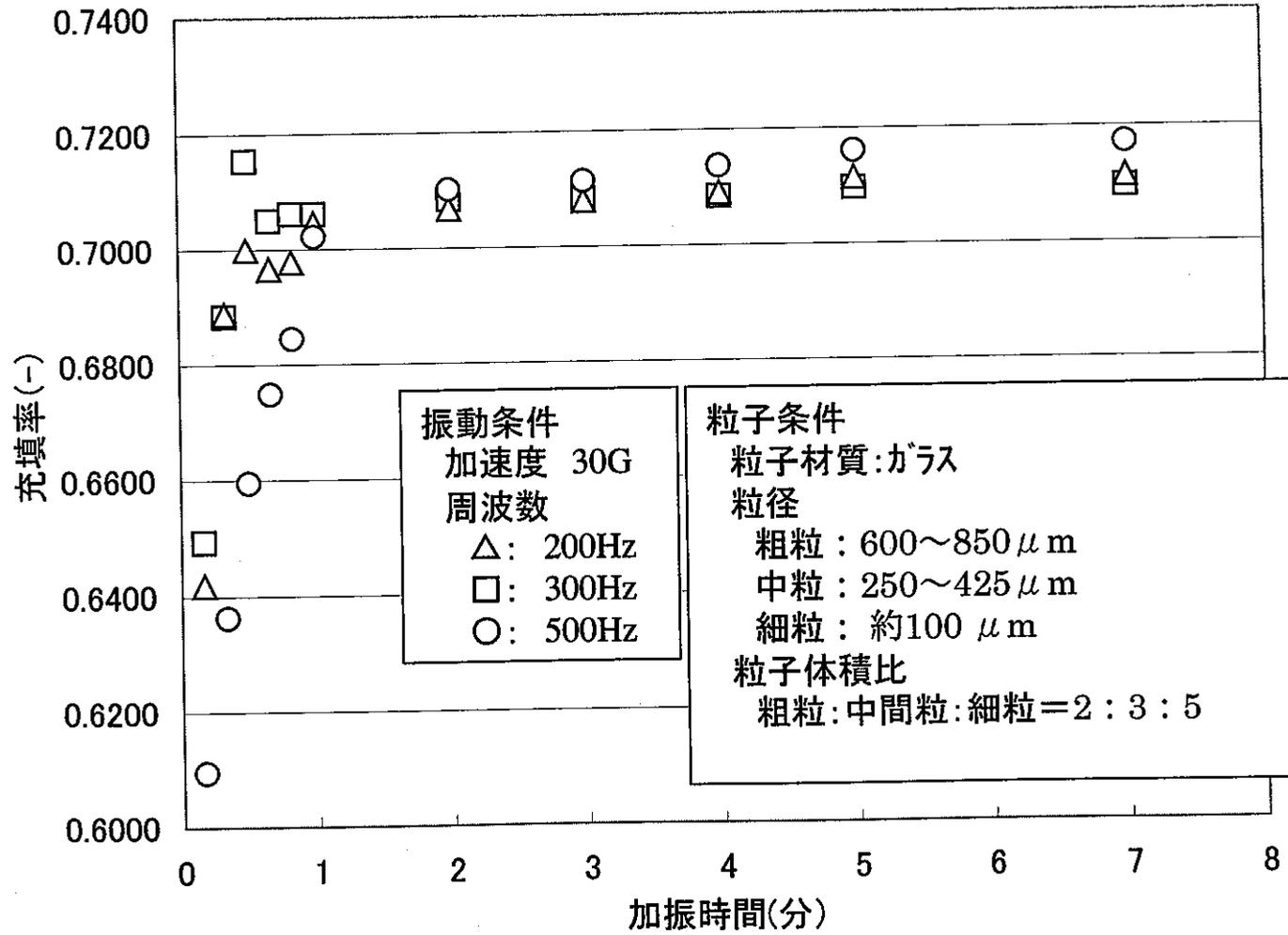


図6.2-1 塊状粒子の充填挙動に及ぼす振動数の影響

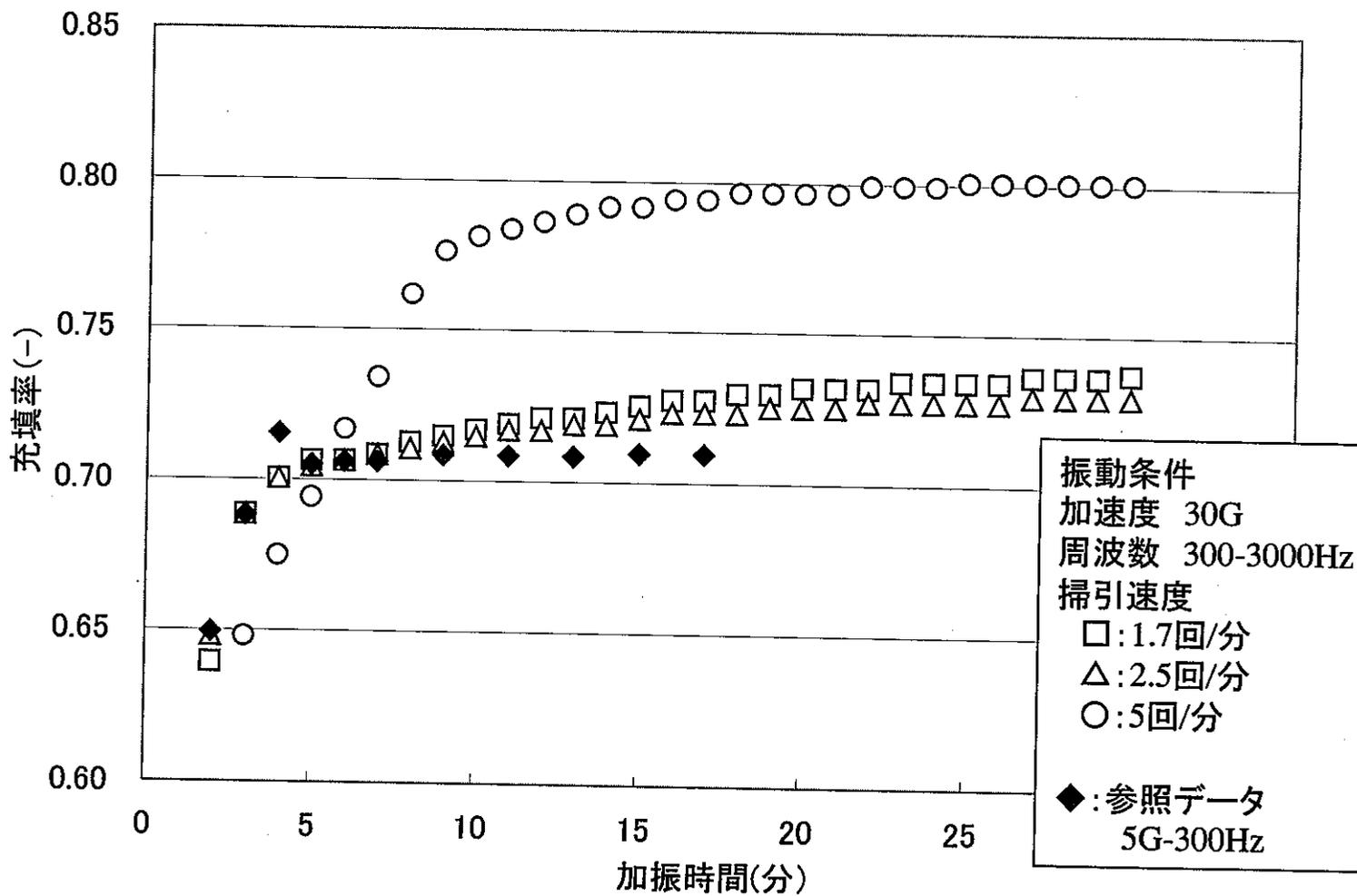


図6. 3-1 塊状粒子の充填挙動に及ぼす周波数掃引の影響

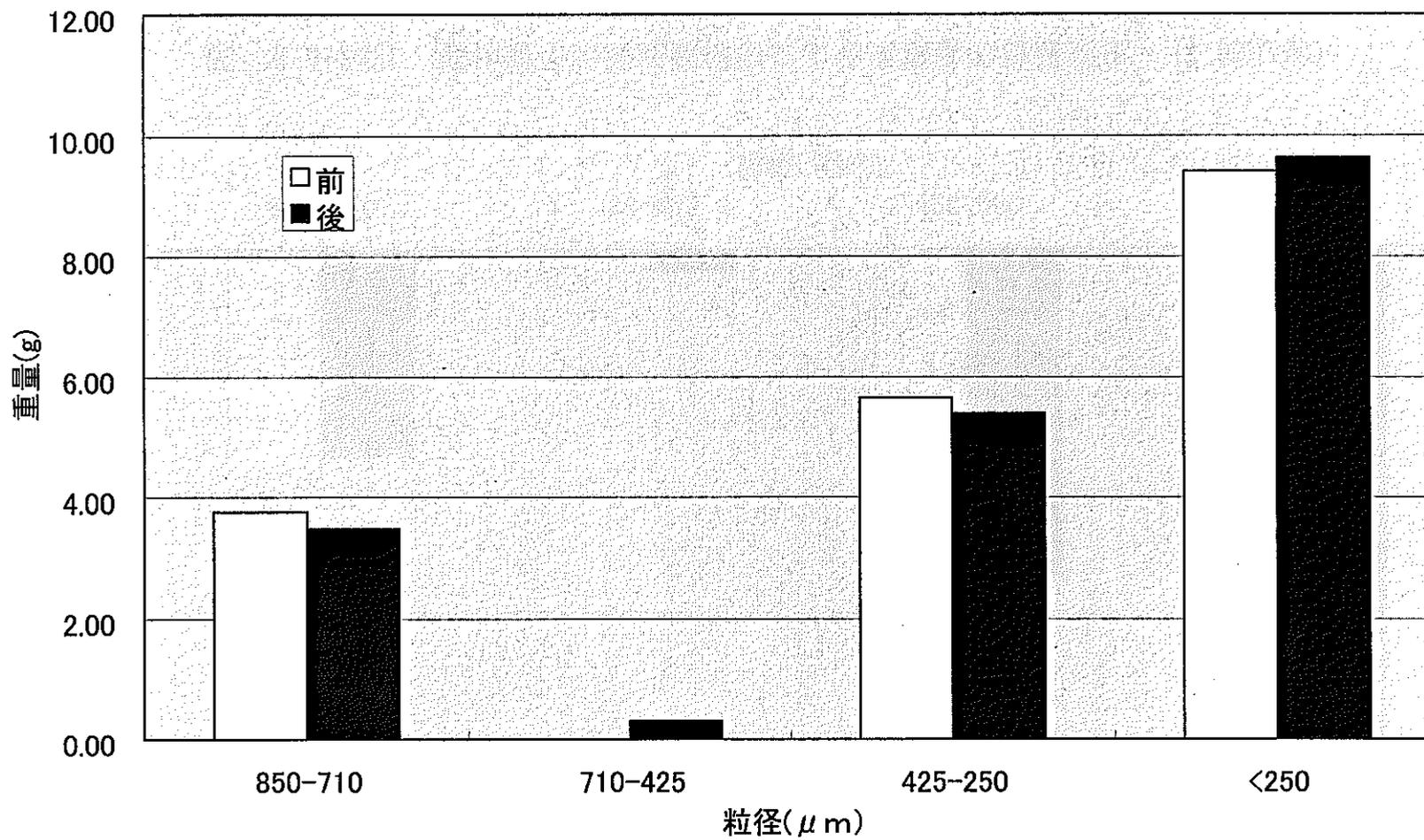


図 6.3-2 (1) 塊状粒子の周波数掃引による充填後の粒径変化 (1.7回/分)

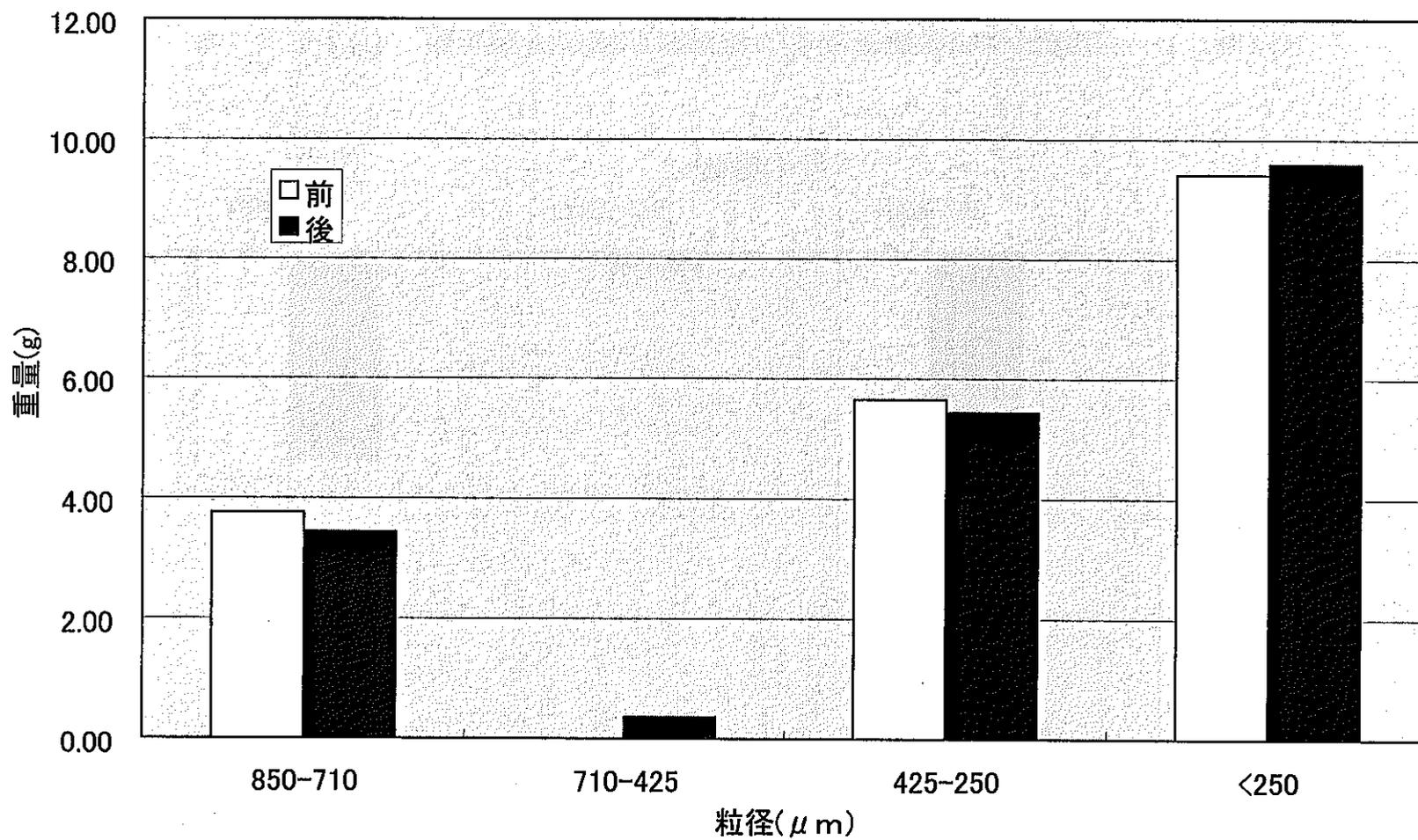


図 6.3-2 (2) 塊状粒子の周波数掃引による充填後の粒径変化 (2.5回/分)

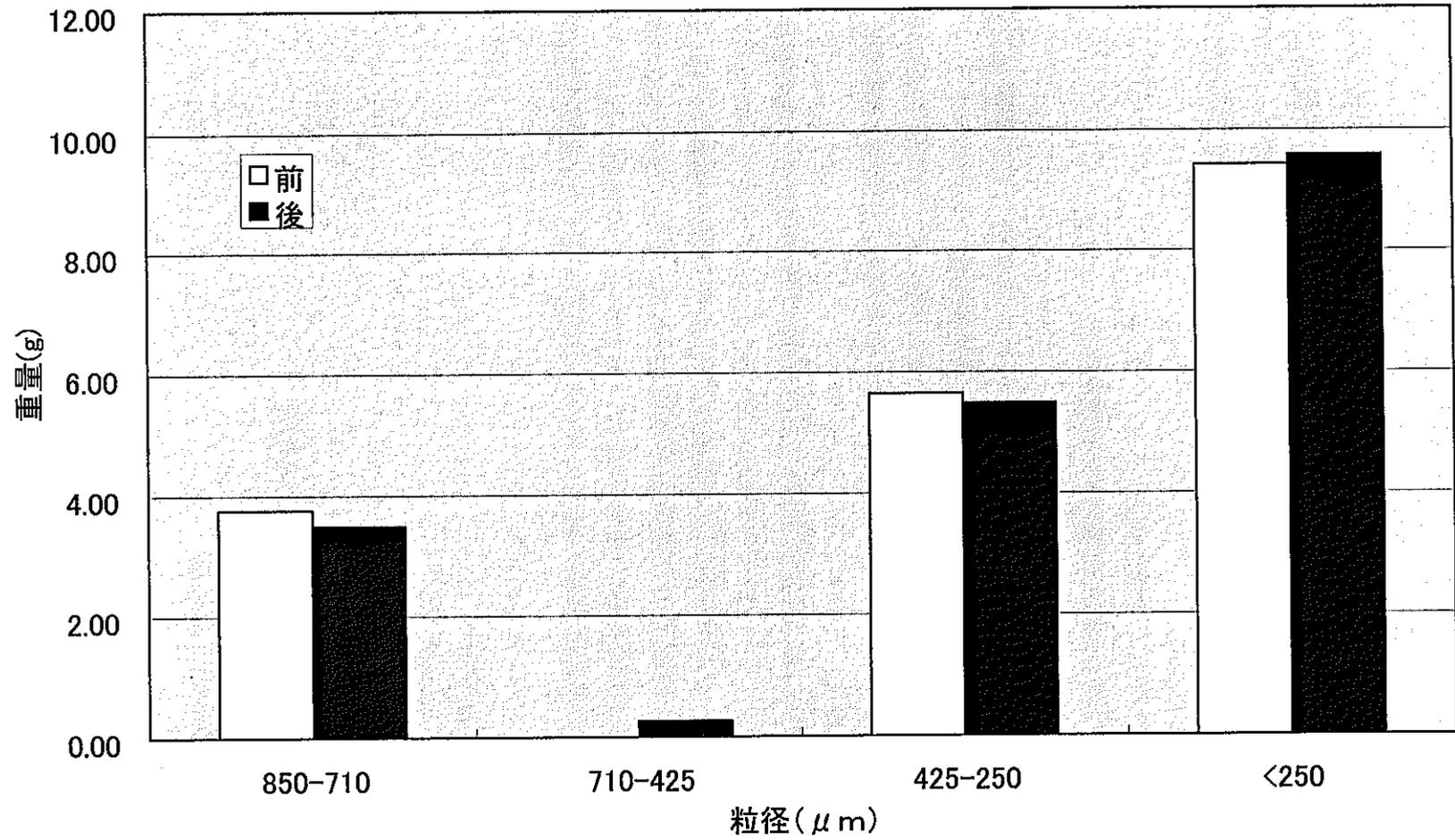


図 6.3-2 (3) 塊状粒子の周波数掃引による充填後の粒径変化 (5回/分)

## 7. 振動充填体の密度分布測定と評価

### 7.1 試験条件

振動充填中における充填の進行状況を調べるため、充填過程における試料に対して X 線 CT 撮影を行った。試験用いた試料は  $800\mu\text{m}$  及び  $100\mu\text{m}$  のイットリア安定化ジルコニアの球を振動数 80Hz、加速度 6.4G で充填したものであり、これらをそれぞれ以下の状態で測定を行った。

- (1) 充填率 75% に達した時点で充填を停止
- (2) 充填率 81% に達した時点 (最大充填時) で充填を停止
- (3) 最大充填状態に到達後、30 分加振

なお、これらの試料はすべて個別に用意したものであり、一旦停止し CT 撮影後にさらに充填を行ったものではない。それぞれの試料の充填挙動を図 7.1-1 に示す

充填を行った後の試料は X 線 CT 装置により CT 像を撮影した。各断面における平均密度と、密度の標準偏差は CT 像の各画素の持つ密度情報より得られる密度ヒストグラム (図 7.1-2) より求めた。

密度ヒストグラムの横軸は密度 (非校正值) であり、縦軸は各密度をもつ点の存在数である。密度が高い部分にピークができており、これが、イットリア安定化ジルコニアに対するピークである。ピークより密度の低い領域はアクリルや空気の領域である。この高い密度ピークの重心を各断面の充填物の平均密度とした。また、このピークがブロードであるほど、断面における密度の粗密の度合いが大きい。この粗密の度合いは、密度ヒストグラムにおける高密度領域の密度分布の標準偏差で示した。標準偏差は下式で求めた。

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_i (D_i - D_0)^2}{n} \right]^{0.5}$$

$D_i$ : 高密度領域の測定点、 $i$  における密度

$D_0$ : 平均密度

$n$ : 高密度領域の測定点の数

### 7.2 試験結果

各試料の軸方向の密度変化として、各断面の各断面における平均密度と、密度の標準偏差を表 7.2-1 に示す。ここでは、試料「(2) 充填率 81% に達した時点 (最大充填時) で充填を停止」の各断面の密度から求めた充填率の平均値が、実測された充填率と一致するように密度を校正した。標準偏差は平均充填率で除した値をパーセント

表示した。また、その結果を図 7.2-1 に示す。

充填が 75%の状態(充填途中)で停止した場合は、200mm 以上の位置で充填率が低くなっている。最大充填状態ではどの位置でも 80.7%から 81.5%の間に均一に分布している。最大充填状態後も振動を続け偏析が発生した状態とすると、360mm の位置は偏析のため充填率が低下するが、少し下の 280mm と 320mm の位置ではむしろ充填率が高くなっている。

充填率 75%、81%及び最大充填後 30 分加振後の試験ピンの断面写真(CT 像)を図 7.2-2 に示す。充填率 75%の試験ピン(図 7.2-2(1))については、軸方向位置 200mm 以下では粗粒と細粒が密に充填されており粗粒と細粒の存在が不鮮明になっているが 240mm の位置から上部へ行くに従って粗粒の形状が確認できるようになる。これは、前出の図 7.2-1 の充填率変化からも明らかのように充填率が上部へ行くに従って小さくなっているためであり、粗粒の粒子間の空隙が大きい(細粒の充填率が小さい)ためと考えられる。充填率 81%の試験ピン(図 7.2-2(2))では粗粒と細粒が密に充填されているため粗粒の存在が不鮮明になっていると考えられるが、軸方向でほぼ同一の画像を示しており、図 7.2-1 に示すように充填率が軸方向でほぼ均一であることと一致する。最大充填後 30 分加振後の試験ピン(図 7.2-2(3))では、下部から軸方向 320mm までは充填率 81%の試験ピン(高充填率)と同様の画像であるが、最上部付近(360mm 位置)では、偏析が原因と考えられる粗粒の粒子間の空隙が大きい(充填率が小さい)画像となっており、前記の図 7.2-1 の最上部における偏析の発生を裏付けている。

以上の結果、最大充填状態では各断面での充填率はほぼ一致し、上から下まで均一な充填状態が実現されていた。これは、全体の充填率が高い場合には充填は均一に行われており、逆に低い充填率の場合は偏析が発生していることを示している。これは全体の充填率から偏析の有無が確認できることを示唆している。

表 7.2-1 各試料の充填率と標準偏差

測定高さ(mm)	充填中 (75%で停止)		最大充填状態 (81%で停止)		最大充填後 30 分加振 を継続(偏析発生)	
	充填率	標準偏差	充填率	標準偏差	充填率	標準偏差
40	0.805	7.8%	0.808	8.1%	0.816	7.6%
80	0.808	7.8%	0.807	8.0%	0.812	7.7%
120	0.808	7.8%	0.809	7.6%	0.813	7.7%
160	0.811	8.0%	0.815	7.9%	0.818	7.9%
200	0.818	7.6%	0.811	7.8%	0.808	7.7%
240	0.787	8.9%	0.811	7.9%	0.812	8.0%
280	0.756	11.2%	0.812	8.3%	0.826	8.2%
320	0.753	11.5%	0.810	8.1%	0.825	7.8%
360	0.719	13.3%	0.811	7.9%	0.657	14.7%

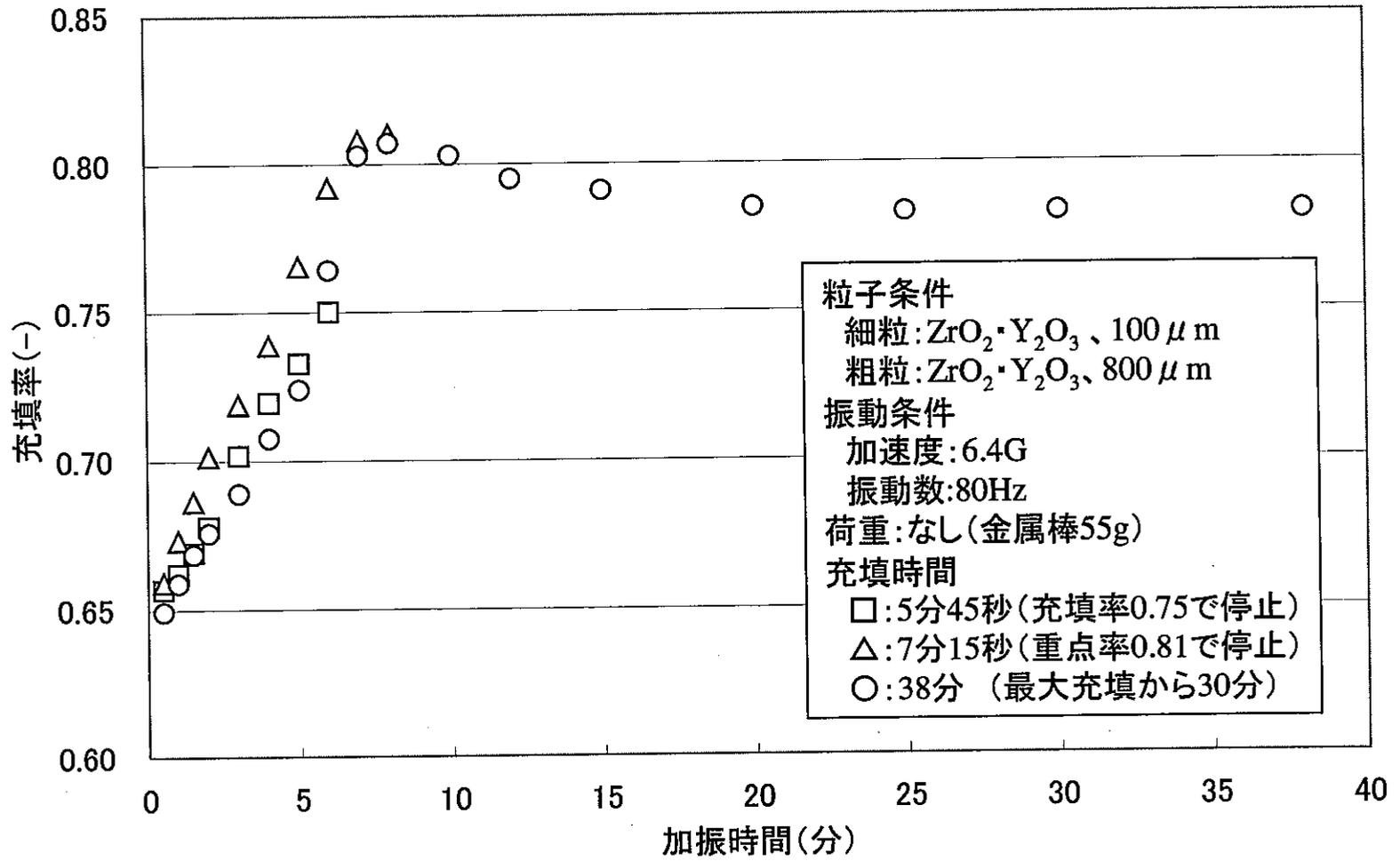
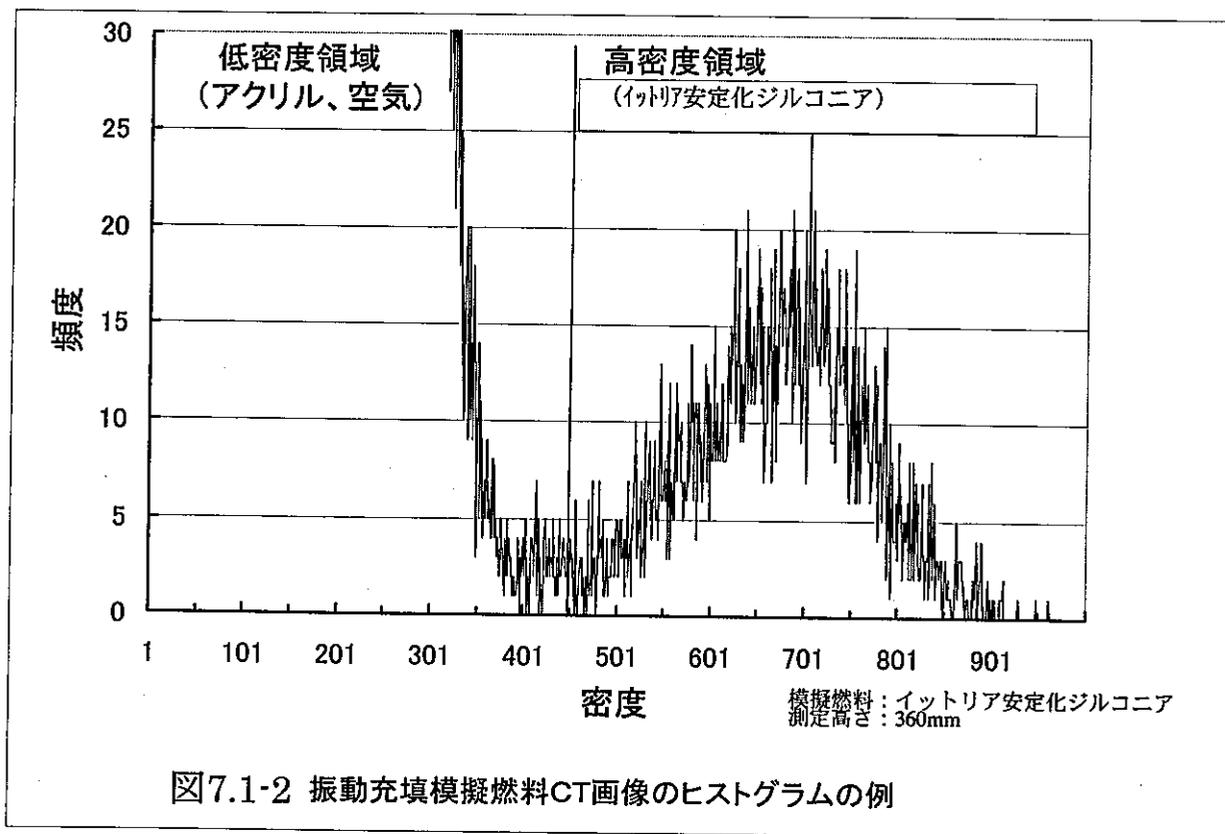


図7.1-1 充填進行モニターに用いた試料の充填挙動



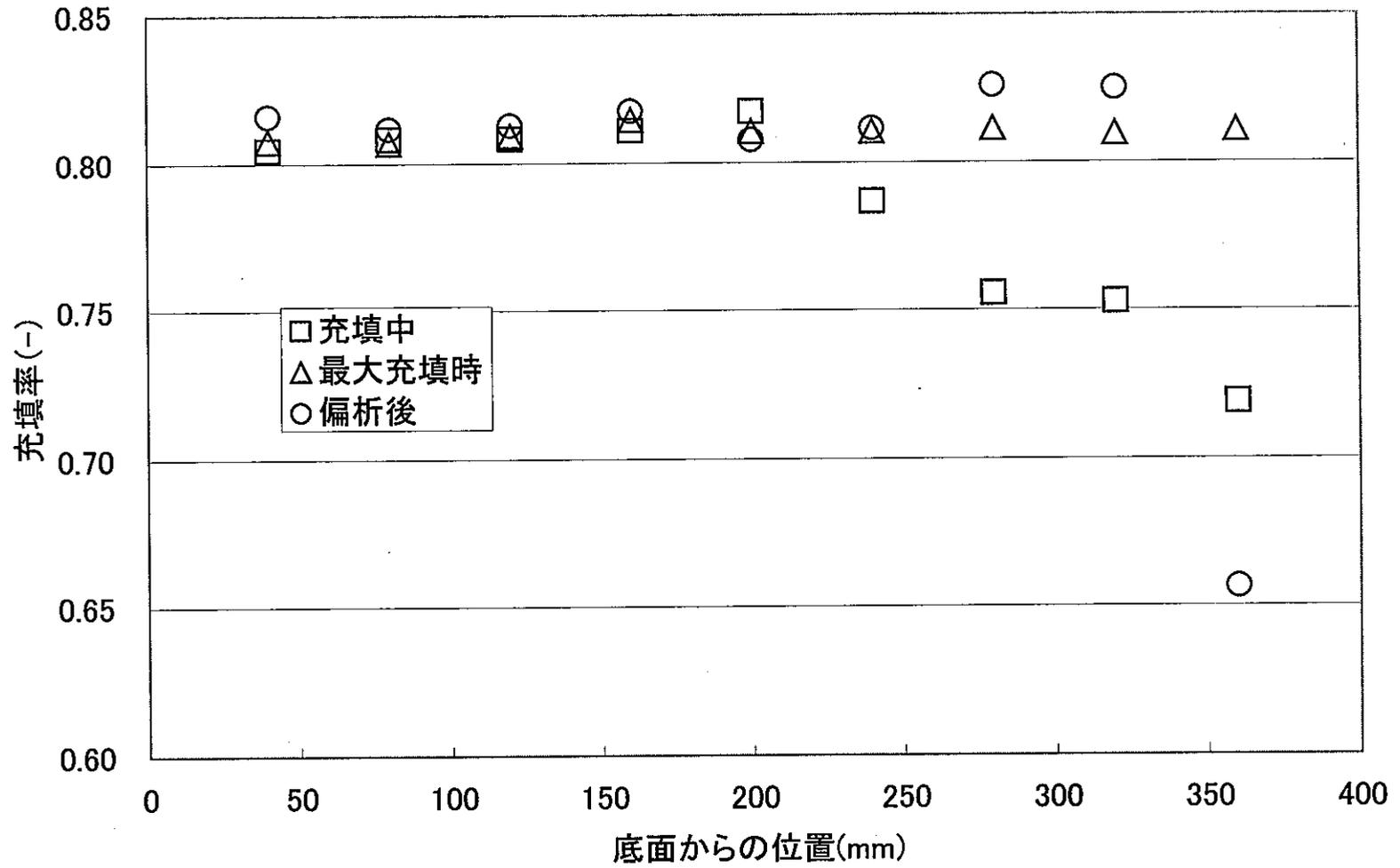


図 7.2-1 充填時間による局所充填率の変化

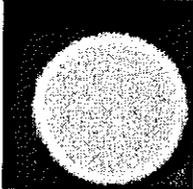
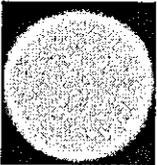
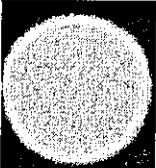
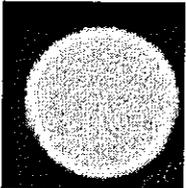
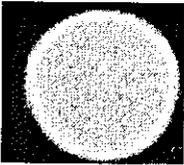
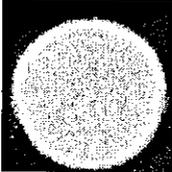
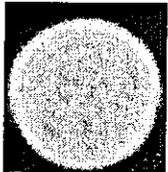
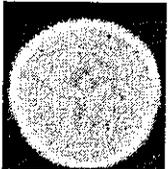
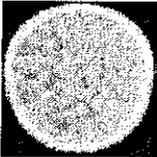
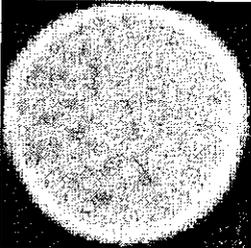
				
40mm	80mm	120mm	160mm	200mm
				
240mm	280mm	320mm	360mm	(拡大図)

図7.2-2(1) 充填率75%での断面図

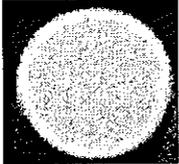
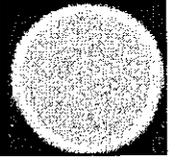
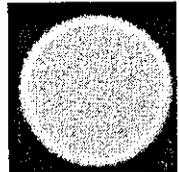
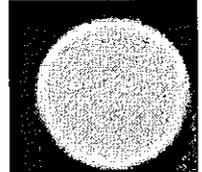
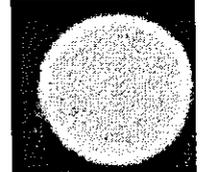
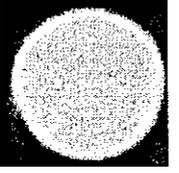
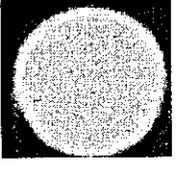
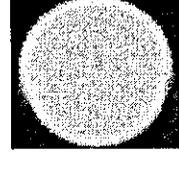
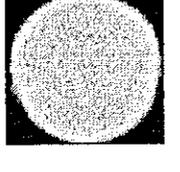
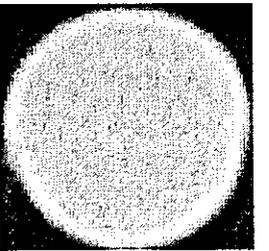
				
40mm	80mm	120mm	160mm	200mm
				
240mm	280mm	320mm	360mm	(拡大図)

図7.2-2(2) 充填率81%での断面図

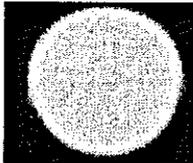
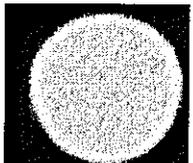
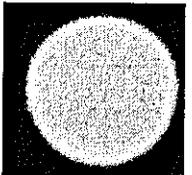
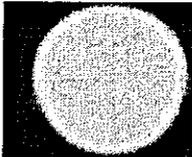
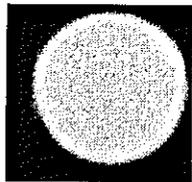
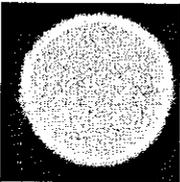
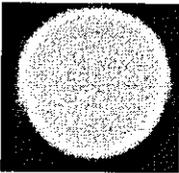
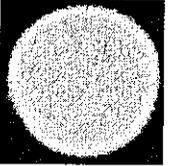
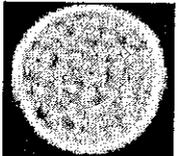
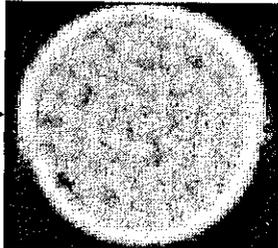
				
40mm	80mm	120mm	160mm	200mm
				
240mm	280mm	320mm	360mm	(拡大図)

図7.2-2(3) 最大充填後30分加振後の断面図

## 8. 3次元解析コードによる充填中の粒子挙動評価

3次元解析コードにより振動充填中のミクロな粒子挙動をシミュレートし、充填挙動の評価を行った。本研究では3次元個別要素法コードとしてITASCA社のPFC3Dを用いた。本コードは球状粒子の挙動をシミュレートするものである。また複数の球を連結することで球状以外の形状を扱うこともできる。

本研究では球状粒子のシミュレーションを中心に行い、また塊状粒子についても8個の球を連結した模擬粒子によりシミュレーションを行った。

### 8.1 解析手法

本研究で採用した個別要素法は1970年代に岩盤力学の研究を行っていたCundall[3]により開発されたものであり、粉体を構成する一つ一つの粒子の運動を運動方程式に基づいて追跡することにより粉体層の挙動をシミュレートする方法である。本手法では以下のように粒子挙動をモデル化する。

いま、図8.1-1(a)に示す粒子群が矢印の方向に流動しているものとする。図8.1-1(b)に示すようにこの流動粒子群の1個の粒子に着目すると、その着目粒子の運動は周りの接触粒子から受ける力によるものである。そこで周りの粒子から受ける接触力 $F$ を刻々知ることが出来るなら質量 $m$ を持つ着目粒子の運動は運動方程式で表される。この時 $F$ と $m$ がわかっているから運動方程式を解くことができ、粒子の加速度 $a$ が得られる。これにより流動する粒子の軌跡を計算することができる。この方法で流動するすべての粒子の運動軌跡を得るなら、それが粒子群の流動挙動を表すことになる。

個別要素法では粒子間の接触力を次のようにモデル化している。通常の流動粒子群は近接粒子と衝突や摩擦を繰り返しながら流動している。そのときの粒子は接触により変形し、変形量に応じた反発力が生じる。変形を考慮すると計算量が膨大になるため、粒子をオーバーラップさせ、オーバーラップの距離に応じて反発力を与える。この時の反発は弾性的であったり非弾性的であったりする。そこでオーバーラップを完全弾性変形に対応させ、その他にエネルギーの減衰を別の要素で考慮させるため図8.1-2に示すような、スプリング、ダッシュポット、スライダのような機械要素の概念を用いたモデル化(フォークトモデル)をする。この接触力はいろいろな方向に作用するので、接触粒子の中心方向(法線方向)とせん断方向成分に分けて考える。このとき摩擦相互作用が考慮できるように、せん断方向成分には摩擦スライダが挿入されている。

この時質量 $m$ を持つ粒子の運動方程式は中心方向とせん断方向に対してそれぞれ次のように表現される。

$$ma = F_G + F_C \cdots (8.1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = T_C \cdots (8.2)$$

ここで  $F_G$  は重力、 $F_C$  は接触力、 $I$  は慣性モーメント、 $\omega$  は角運動量、 $T_C$  は接触力によるトルクの総和である。

一般の粉体では 1 個の粒子の周りに多数の粒子が接触しているので、それらの個々の接触点に対して式(8.1), (8.2)が成立し、着目粒子の運動を知るのに同じ数の運動方程式を連立して解かねばならない。そこで実際の計算では時間増分  $dt$  で差分近似して計算する。

この  $dt$  は接触点でのオーバーラップが要素の大きさに比べて十分小さくなるように調整する必要がある。そのため計算速度は球の大きさに依存し、球が小さくなるほど  $dt$  が小さくなり実行速度が遅くなる。

本シミュレーションでは 100mm の球における  $dt$  は  $10^{-6}$  秒である。なお 5000 個の球状粒子についての 0.01 秒間の 3 次元シミュレーションには約 1 時間を要した。

また粒子数が増加すると指数関数的に計算時間を要することになり、現在のパーソナルコンピュータの性能では 5000~10000 個程度の粒子数が限界であると考えられる。したがって実試料並の体系の計算は不可能である。本研究では少ない粒子数でミクロな挙動を評価することに主眼をおいてシミュレーションを行った。

## 8.2 解析結果

### 8.2.1 球状粒子の充填シミュレーション

#### (1) 細粒の浸透経路の解析

5 章の球状粒子の充填試験の結果、同じ周波数で加速度を 20G と 5G とした場合で 20G の方が充填に時間を要している。振動変位が細粒の径より大きい場合と小さい場合では、大きい場合の方が隙間が大きくなり細粒が落下しやすいと考えられるが、この試験結果は逆である。

そこでシミュレーションにより、振動時の変位を変えた場合に浸透経路が変化するか否かを調べた。

#### ① シミュレーション体系

粒子は以下の  $800\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  の 2 種類の大きさを用意した。被覆管は 4mm の円柱に外接する 16 角柱によりモデル化した。球の数は計算時間の関係より充填高さで約 3mm 程度とした。

#### ② 手順

- (a) 粗粒 32 個を自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させた。
- (b) 粗粒が充填した状態で 200Hz, 30G で振動させ、粗粒を密に充填する。

- (c) 細粒の体積が粗粒の体積の約 1/16 (1024 個) を自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させた。
- (d) 対象とする振動条件 (①200Hz, 48G (変位 300 $\mu\text{m}$  に相当)、②200Hz, 5G (変位 30 $\mu\text{m}$  に相当)) を与える。

### ③ 解析結果

図 8.2-1 に 200Hz, 48G での解析結果を示す。振動開始前から開始後 0.03 秒 (6 周期) の結果を示している。加速度が大きいため粒子全体が打ち上げられ、底面から離れている。時間とともに細粒が下の方に浸透しているが、一部の細粒は打ち上げられ、0.03 秒後では空中を舞っている粒子がいくつかある。

図 8.2-2 に 200Hz, 5G での解析結果を示す。同じく振動開始前から開始後 0.03 秒 (6 周期) の結果を示している。時間とともに細粒が下の方に浸透している。

図 8.2-3 に本体系を底面からみた状態を示す。底面に移動してきている細粒の数は変位の影響は受けていないようである。

200Hz, 48G の場合は管の変位が 300 $\mu\text{m}$  であるが粗粒全体は固まって移動しており、粗粒同士の間隔が広がっている様子はない。従って細粒が浸透していく経路は広がっておらず、浸透速度は変わらないことが示唆される。逆に細粒が打ち上げられることによる落下時間の分だけ、細粒の浸透が遅いと予想される。

これは球状粒子の充填試験で、周波数が同じで、加速度が 5G の場合より 20G とした場合の方が充填に時間がかかっている結果と一致する。

## (2) 振動条件による充填状態の違い

5.2.2 項の変位依存試験の結果、充填終了後も振動を与え続けた場合、変位 31 $\mu\text{m}$  の場合は最適充填状態を保つが、変位 248 $\mu\text{m}$  では偏析が進行し充填率が低下する。そこで変位を変えた場合の比較を行い、偏析の発生状態を検討した。

### ① シミュレーション体系

粒子は以下の 800 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$  の 2 種類の大きさを用意した。粗粒が浮き上がる状態を模擬するような充填高さとするため、さらに被覆管はさらに細く、3mm の円柱に外接する 16 角柱によりモデル化した。

### ② 手順

- (a) 粗粒 32 個を自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させた。
- (b) 粗粒が充填した状態で 200Hz, 30G で振動させ、粗粒を密に充填する。
- (c) 細粒 4800 個を自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させた。
- (d) 対象とする振動条件 (①200Hz, 30G (変位 200 $\mu\text{m}$  に相当)、②200Hz, 5G (変

位  $30\mu\text{m}$  に相当)) を与える。

なお、(a)~(c)までの計算に 4 日間要し、その後のシミュレーションにはそれぞれ 5 日間を要した。

### ③ 解析結果

シミュレーションの結果を図 8.2-4, 5 に示す。

200Hz, 5G の条件では 1.00 秒後と 1.31 秒後の状態はほとんど変わっておらず、1.00 秒程度で充填が完了したものと考えられる。この振動条件では粗粒が管壁に接している部分の周りには細粒が入り込んでいかない。また粗粒同士の位置関係はほとんど変化していない。つまり細粒は粗粒-粗粒の間隙及び粗粒-管壁の空隙に充填されていったと考えられる。粗粒同士の位置関係と粗粒と管壁の位置関係が変化していないことは、粗粒は初期と同様に密に充填された状態で、偏析は生じていないことになる。

200Hz, 30G の条件では 0.30 秒後の状態で管壁と粗粒の間に細粒が挟み込まれはじめている。0.60 秒後の状態では粗粒は管壁に接触しなくなっている。1.0 秒後では細粒はほぼ浸透し終わっている。0.60 秒後と 1.0 秒後では明らかに粗粒の配置が異なっている。

粗粒が管壁に接触しなくなるということは、細粒がその間に充填されていることであり、その分粗粒は内部に押し込まれている。内部に押し込まれた分、粗粒の充填高さは初期より高くなり、上部に押し上げられる。これは偏析と同じ結果を与える。粗粒同士の間隔は管の変位に対して広がっていない。

以上より、本解析条件に関しては粗粒が内側に押し込まれることが偏析の原因となっていると考えられる。これは強い変位により粗粒間隔が広がり、その間に細粒が挟まることより偏析が発生するという従来の予想とは異なる結果である。

## 8.2.2 塊状粒子の充填シミュレーション

### (1) シミュレーション体系

塊状粒子を模擬するため、8 個の球を立方体系に連結して模擬粒子を形成した (図 8.2-5)。粒子は以下の 3 種類の要素を用意した。

- ① 粗粒 : 立方体の一辺の長さとして  $630\sim 800\mu\text{m}$  の範囲でランダムに
- ② 中間粒 : 立方体の一辺の長さとして  $250\sim 400\mu\text{m}$  の範囲でランダムに
- ③ 細粒 : 立方体の一辺の長さとして  $100\mu\text{m}$

被覆管は  $6.8\text{mm}$  の円柱に外接する 16 角柱によりモデル化した。球の数は計算時間の関係より充填高さで約  $3\text{mm}$  程度とした。

## (2) 手順

- ① 粗粒 60 個 ( $1.8 \times 10^8 \text{cm}^3$ ) を自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させる。
- ② 中間粒を粗粒の体積の  $1/7$  (約 100 個) だけ自由落下させ、安定になるまで運動させる。
- ③ 細粒を粗粒の体積の約  $1/14$  (1600 個) だけ自由落下させ、安定になるまで粒子を運動させる。図 8.2-7 に安定後の粒子の状態を示す。細粒・中間粒は底部に達しているものも一部あるが、ほとんどは粗粒・中間粒・細粒の順に堆積している。
- ④ 管に 100Hz, 25G の振動を 5 周期与える。その後振動を止め、粒子が動かなくなるまで計算を続ける。

## (3) 解析結果

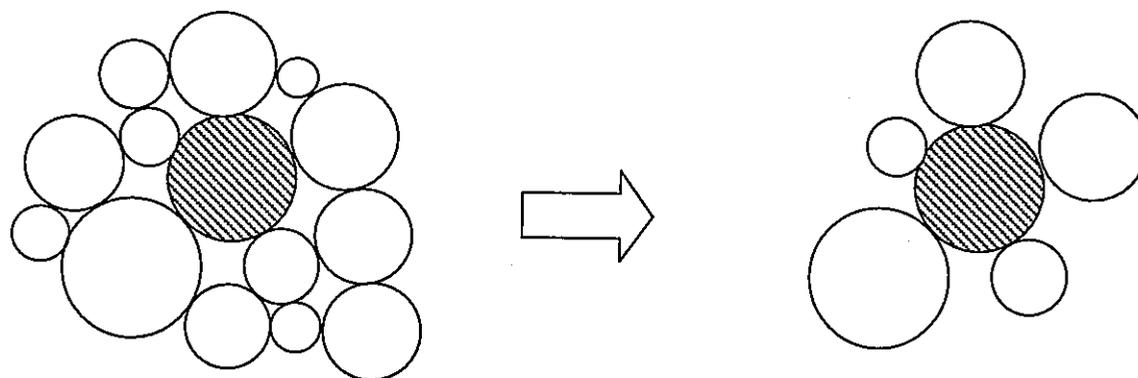
図 8.2-8 に最終状態を示す。充填高さが 3mm 程度であるが、層状になっていた粒子が 5 回の振動で混合されている状態がシミュレートできた。なお、本計算には約 1 ヶ月を要した。

## 8.3 解析コードによる評価のまとめ

3次元個別要素法により充填挙動の解析を行った。

球状粒子では変位を変えてシミュレーションを行い、その結果変位が大きくても粗粒同士の位置関係は変化していない様子が分かった。これより、変位が大きい方が充填に要する時間が長いのは、細粒が打ち上げられ落下に時間を要するためと推測される。また粗粒が上昇し偏析するのは、細粒が粗粒と管壁の間に浸透し、粗粒が内部に押し込まれるという機構で発生するものであることがわかった。

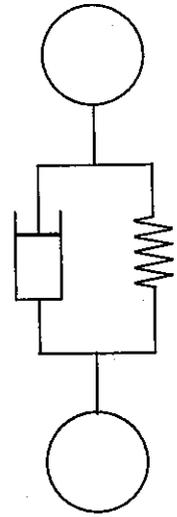
また塊状粒子を 8 個連結して塊状粒子を模擬し、粗粒・中間粒・細粒と層状になっていた粒子が 5 回の振動で混合される状況がシミュレートされた。



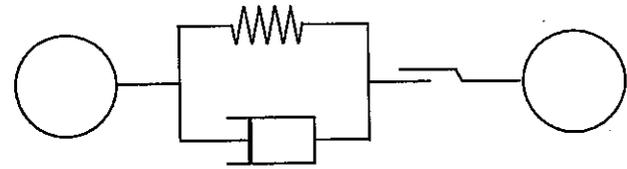
(a) 流動粒子群

(b) 着目する粒子に接触する隣接粒子

図8. 1-1 個別要素法の概念



(a) 法線方向



(b) せん断方向

図8. 1-2 粒子間相互作用を表すフォークトモデル

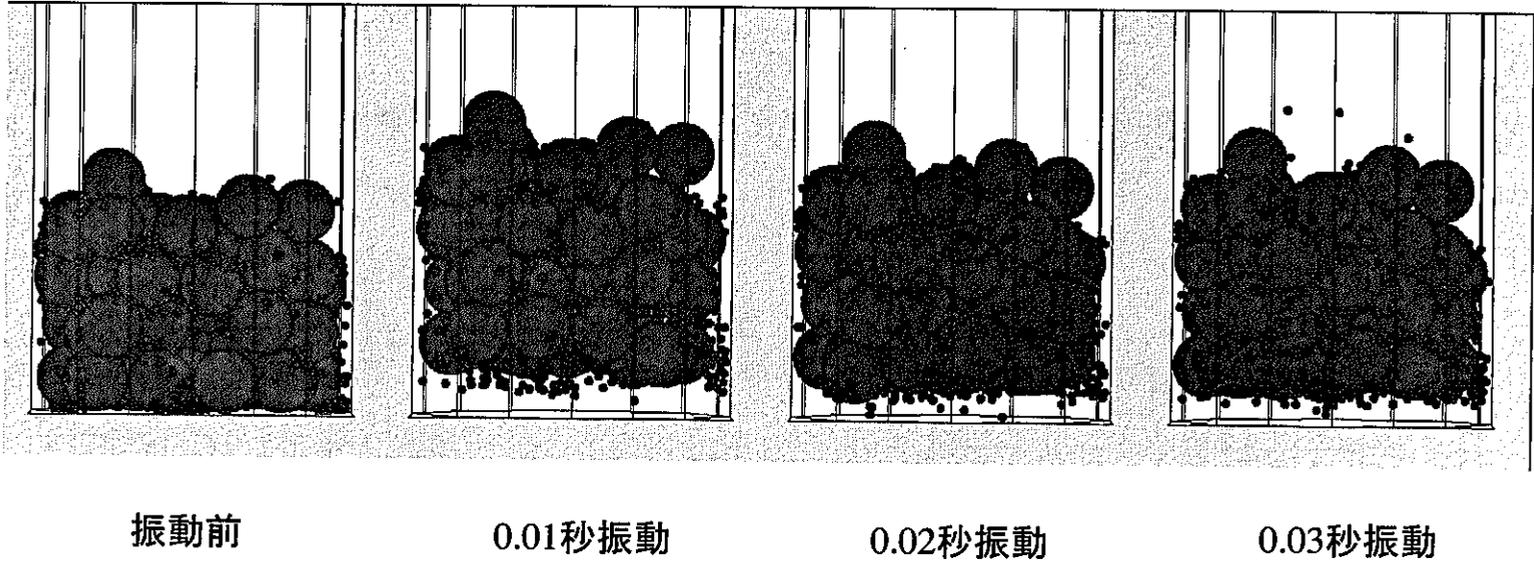


図 8.2-1 細粒の浸透経路の解析 (200Hz、48G)

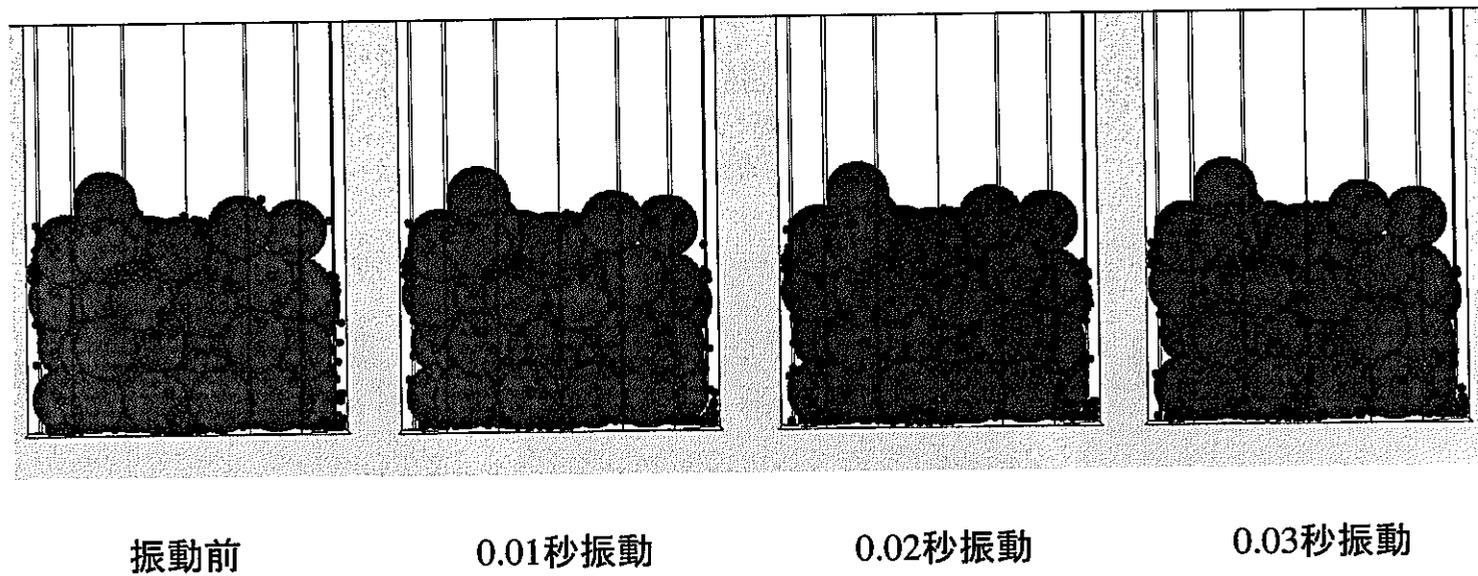
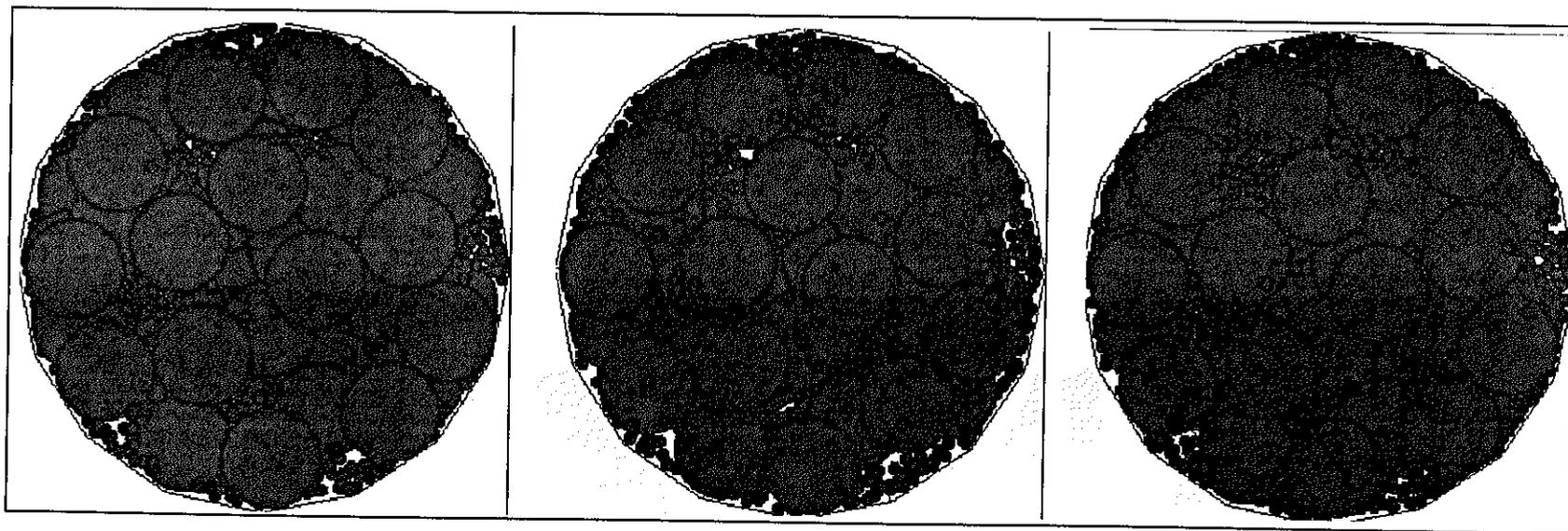


図 8.2-2 細粒の浸透経路の解析 (200Hz、5G)



振動前

約0.03秒振動後  
200Hz、48G、  
変位300 $\mu$ m

約0.03秒振動後  
200Hz、5G、  
変位30 $\mu$ m

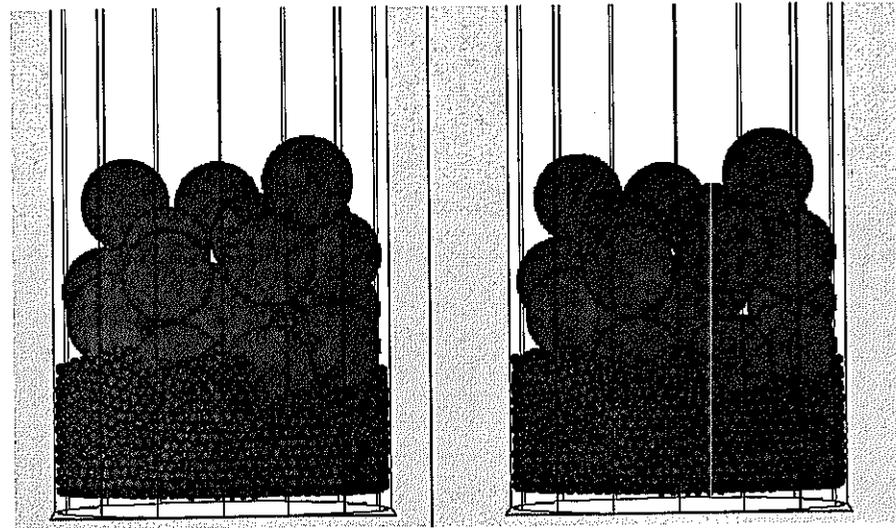
図 8.2-3 細粒の浸透経路の解析 (底面から見た図)



0.10秒振動

0.30秒振動

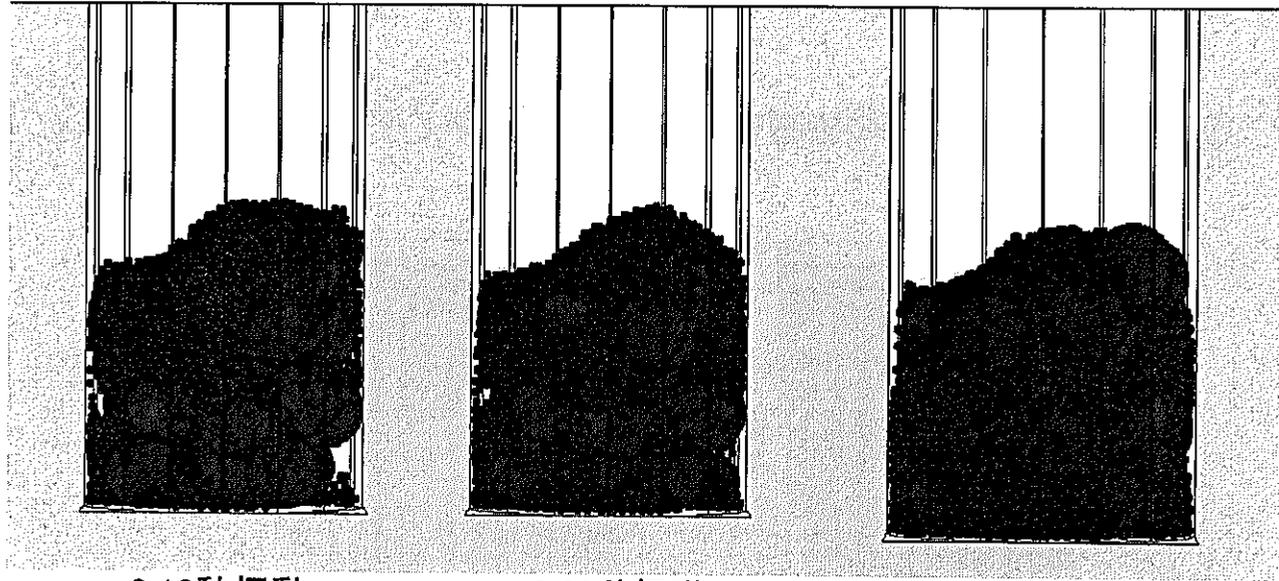
0.60秒振動



0.80秒振動

1.00秒振動

図 8.2-4 振動条件による浸透の違い (200Hz、30G)



0.10秒振動

0.20秒振動

0.40秒振動



0.80秒振動

1.00秒振動

1.31秒振動

図 8.2-5 振動条件による浸透の違い (200Hz、5G)

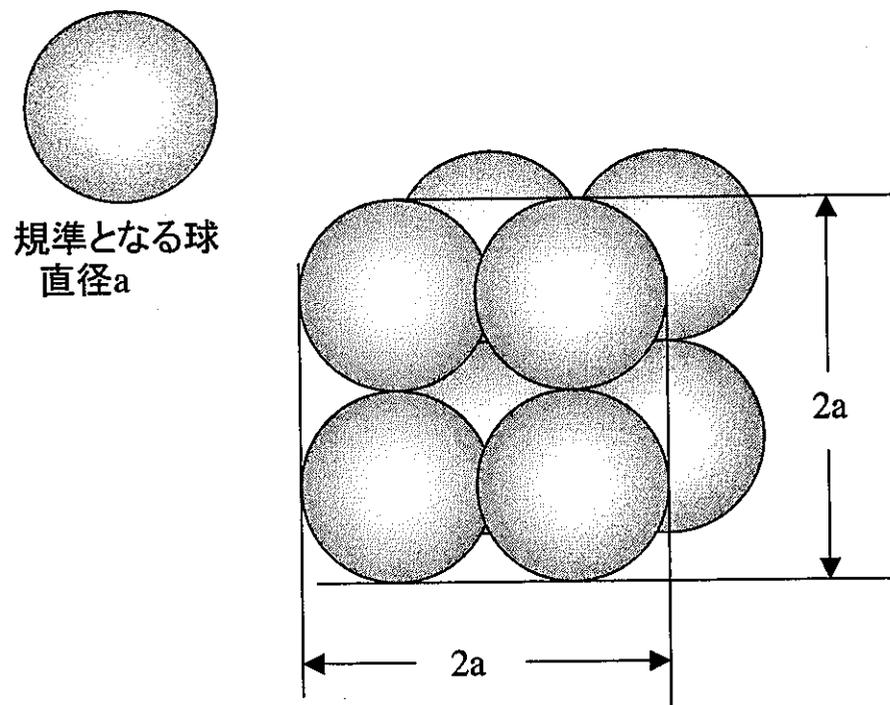


図8. 2-6 8個の球による塊状粒子の模擬

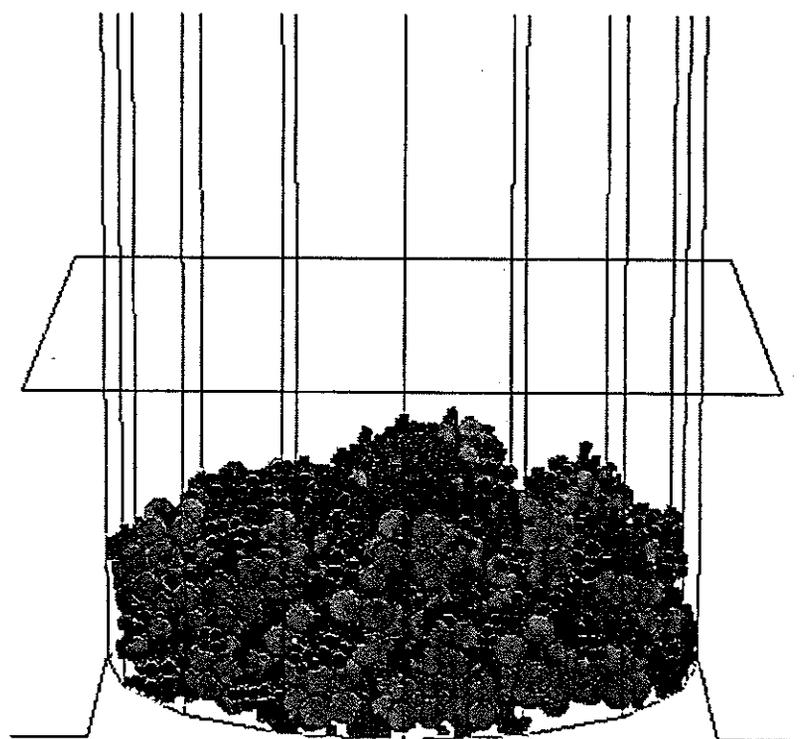


図8. 2-7 塊状粒子装荷後安定した状態

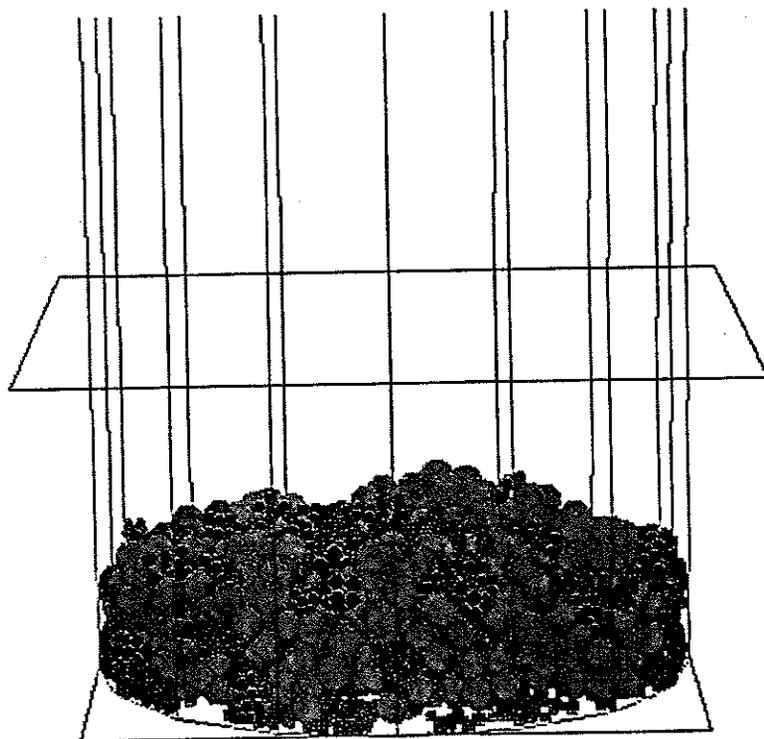


図8. 2-8 塊状粒子の振動後の充填状態

## 9. まとめ

### 9.1 試験結果のまとめ

充填挙動に影響するファクターを明確にするため、種々の充填条件による影響評価を行った。また充填時のミクロな粒子挙動の解明を試みるため個別要素法によるシミュレーションも実施した。

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

#### (1) 球状粒子の充填挙動について

幾何学的ファクターと動的ファクターに分けて影響評価を行った。また、その他の因子として充填方法、充填量、荷重の影響を評価した。

#### ①幾何学的ファクターについて

(a)充填密度が被覆管及び粒子の径の関数で表される Ayer の密度式についての検討を行った。その結果、1, 2 成分系では粒子径、被覆管及び粒子材料、粒度分布によらず予測値と測定値は一致する結果となった。

(b)3 成分系の充填については予測値と異なる結果となったが、これは均一に充填が行うことができなかったことが原因であり、均一に充填が行われれば Ayer の密度式による予測値と等しくなると予想される。

#### ②動的ファクターについて

(a)充填が速やかに進行し、また充填後に偏析が発生しづらい条件は、1G より大きな加速度でさらに変位をできるだけ小さくした場合であることがわかった。

(b)周波数をランダムにした充填の場合、特異な挙動を示すものではなかった。

#### ③その他の影響について

(a)充填量の影響評価の結果、充填量が少ないほど充填は速く進行した。一方、充填後の充填率については、充填量が多いほど安定で偏析が発生しにくかった。

(b)充填方法を変えた充填試験を行ったところ、混合法と多層法では偏析が発生しやすく、高密度の充填を行うのは困難であった。これより浸透法が最も適しているとの結果が得られた。

(c)荷重の影響については、荷重をかけた方が充填率は高くなり、充填後も安定して高い充填率を維持することがわかった。

これらの試験結果より、実際に燃料顆粒を製造する場合、粒子成分は 2 成分とし、浸透法で充填を行うのが望ましいと考えられる。粒子径については燃料設計上求められる密度と製造可能な粒子径の範囲より Ayer の密度式を用いて選

定すればよい。なお各成分の粒度分布については多少広がりがあっても問題はないと予想される。

動的ファクターについては、変位が小さい方が充填時間が短くかつ充填後の偏析の進行が抑制される傾向を示すことがわかった。今後はより定量的な評価を行い、最適な振動条件（加速度、変位、周波数）の評価を行う必要がある。

充填時における上部の荷重については、充填率及び充填後の偏析防止の上で有効との結果が得られており、今後さらに検討を行う必要がある。

## (2) 塊状粒子の充填挙動について

塊状粒子についても同様に幾何学的ファクターと動的ファクターについて検討を行った。

- ①塊状粒子の場合、各成分の充填比率は逐次充填理論による比率とは異なり、細粒の比率を高めた場合の方が充填率は高くなった。
- ②動的ファクターについては周波数掃引を行うことにより充填効率を高めることができ、80%の充填率を達成することができた。

## (3) 振動充填体の密度分布測定について

X線 CT を用いて充填中における密度分布の測定を行った。その結果

- ①最大充填率となる前の充填体（75%の充填率）では上部に細粒が充填されておらず、充填率が低下している。
- ②最大充填状態の充填体ではどの位置でも 80.7%から 81.5%の間に均一に分布している。
- ③最大充填状態後も振動を続け偏析が発生した状態では、上部では偏析のため充填率が低下している。

以上より、全体の充填率が高い場合は均一に充填が行われており、逆に低い充填率の場合は偏析が発生していることを示している。これは全体の充填率から偏析の有無が確認できる可能性を示唆している。

## (4) 解析コードによる粒子挙動評価について

球状粒子では変位を変えてシミュレーションを行い、以下の結果が得られた。

- ①変位を大きくしても隣接する粗粒同士は離れることなく、位置関係は変化していない様子がわかった。
- ②粗粒が上昇して偏析するのは、細粒が粗粒と管壁の間に浸透し、粗粒が内部に押し込まれるという機構により発生するものであることがわかった。

また塊状粒子についても 8 個連結して塊状粒子を模擬し、粗粒・中間粒・細粒と層状になっていた粒子が 5 回の振動で混合される状況がシミュレートできた。

## 9.2 今後の課題

本研究を通して振動充填技術開発における課題が明らかになった。以下に今後解決すべき課題を列挙する。

### ①スフェアパックの充填挙動について

(a) 実燃料または同様の製法により製造した比重の重い模擬粒子を用いた試験動的ファクターについては、影響因子の傾向はつかめたものの、粒子材質により異なる挙動を示している。しかしながらサンプルにより比重、表面性状、各成分内での粒度分布等が異なっているためその原因の特定は困難である。またこの原因を特定するためこれらの要因を調整したサンプルを調製することは現実的ではない。

そのためより実際に近い粒子を用い、実際に起こりうる動的挙動を評価する必要がある。

### (b) 荷重の影響評価について

充填時に荷重をかけた場合、充填率の向上と偏析の抑制効果が得られた。そこで荷重の最適化を図るとともに、荷重が及ぼす被覆管等への影響を評価する必要がある。

### ②塊状粒子の充填挙動について

塊状粒子については経験的に逐次充填理論が当てはまらないため、より高密度に充填される条件を幾何学的ファクター、動的ファクターの両面で検討する必要がある。

また今回は対象外であったが、粒子の粉碎方法や混合・装荷方法も偏析を防ぎ高密度とするために検討を行う必要がある。

### ③その他

スフェア・塊状共通の問題として長尺燃料とした場合の影響、実際の部材を装着した上での充填、軸方向ブランケットを想定した試験が必要となるであろう。また充填時の被覆管への影響評価について今後検討を行う必要がある。

参考文献

- [1] J. E. Ayer, F. E. Soppet, : Vibratory Compaction: I, Compaction of Spherical Shapes, J. American Ceramic Society, Vol.48, No.4, 180(1965).
- [2] Stenkopff H, et. Al., : Automatic refabrication and quality control of fuel elements for the BOR-J reactor in the USSR, Vol.178, 163(1991).
- [3] Cundall P. A. and O. D. L. Strark, : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique., Vol.29, 47(1979).