円筒容器へのステンレス球の最密充填に対する容器高さと内径の影響

名城大学　学生員○宮地 純朗　学生員 牧 岳志
学生員 安藤 中雄　正会員 板橋 一雄

1．はじめに　筆者らは，前報[1]において，粒状体の充填密度に対する壁効果に関して，簡単な仮定の下での定式化とシミュレーションについて報告した．その結果から，一定の大きさの容器に粒子を詰めていくと，壁効果のために粒子数の増加に伴い間隙比が規則的な増減を繰り返すこと，筆者らが提案する形状係数による整理方法が有効であることを確認した．そこで，種々の大きさの円筒形ステンレス容器にステンレス球をランダムに充填する実験を行い，形状係数による整理を行ったので，ここに報告する．

2．ステンレス球による充填実験の方法　3 種類の内径 D の円筒形容器（D=3，4，5cm）と，5 種類の直径 d のステンレス球（d=3，4，5，6，8mm）を用いて，均一粒子のランダム充填の実験を行った．最初に，一層目に最も密に入る粒子数とその重量ならびに高さを測定した．一層目以降の充填については，粒子数を 1 ～ 20 個ずつ規則正しく増加させ，粒子重量と占める高さを測定し，単位体積重量・間隙比を計算した．なお，充填に当たっては，落とし蓋を載せ，ソフトハンマーで容器側壁を数十回打撃し，最も密な状態とした．また，結果の整理には，筆者らが提案する形状係数 R（＝容器表面積／容器体積）を用いている．この R は cm^{-1} の単位を持ち，容器の小ささを表す係数と考えられる．

3．均一球の充填実験の結果と考察　図-1 には，D=5cm,d=4mm の場合の結果が示してある．これは，一層目の粒子数が 126 個,粒子数を 10 個ずつ増加させ，2396 個まで詰めた場合の結果である．この図より，粒子数の増加とともに，粒子が占める高さが増すために，形状係数 R は減少していくことがわかる．また，間隙比の変化は，シミュレーション結果と同様，増減を繰り返しながらある一定値に近づく傾向を示している．この一定値は，菱面体充填の最小間隙比 e_0=0.3505 よりもかなり大きくなっており，この相違は壁効果が原因と考えられる．さらに，この間隙比の増減も，壁効果の影響の一部と考えられ，シミュレーションで定義した最密間隙比や最疎間隙比に近い状態が現れている．ただし，シミュレーション結果のようなシャープな変化は示さず，一層毎に左右対称に近い山形で変化している．こうした結果の原因は，実験における粒子配列が単純な立方体充填や菱面体充填では無く，ランダム充填であることと考えられる．

この図中には，植松ら[2]と Scott [3]の実験結果も再整理して示してある．植松らの実験では，この図の実験条件にほぼ近いものであり，直径 3.97mm の鋼球を一辺 5cm の立方体容器内に規則的に最密充填したものである．植松らの結果が図上で直線的な関係を示しているだけではなく，今回の実験結果の最密間隙比に近い関係を示していることは，興味深い．ただし，形状係数 2 以下では，0.1 程度の間隙比の相違が現れており，その原因もランダム充填と規則充填の相違ではないかと考えられる．すなわち，粒子数が多くなると，最密の規則充填が難しくなることを示している．一方，Scott の実験は，鋼球を円筒容器に詰めるものであるが，図中に示すような条件であり，今回の実験結果と条件が異なるためか，図上で左上に位置している．ただし，R の減少に伴い e の減少する傾向は明確に現れている．

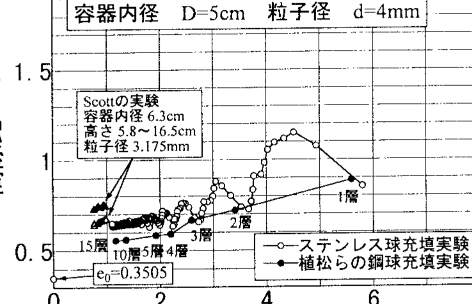

図-1　間隙比～形状係数関係
（植松ら，Scott の実験結果を併記）

図-2 には，d=4mm の球を内径の異なる 3 種類の円筒容器にそれぞれ充填した結果を重ねて示してある．なお，内径 3，4cm の容器の場合には粒子 5

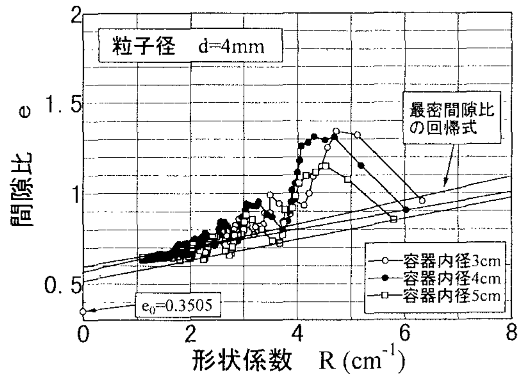

図-2　間隙比～形状係数関係
(D=3, 4, 5cm, d=4mm)

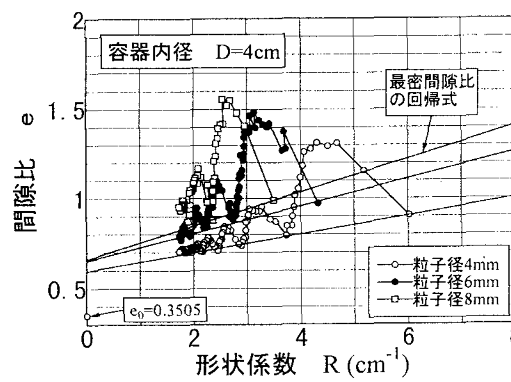

図-3　間隙比～形状係数関係
(D=4cm, d=4, 6, 8mm)

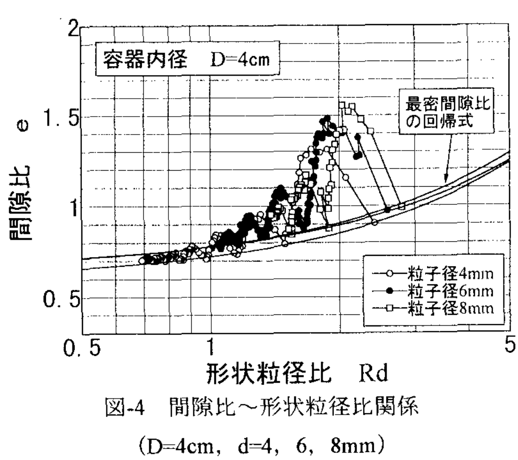

図-4　間隙比～形状粒径比関係
(D=4cm, d=4, 6, 8mm)

個ずつ，内径 5cm の場合には 10 個ずつ増加させた充填を行っている．この図より，どの容器を用いた場合でも，図-1 と同様の傾向を示し，容器内径が増すとともに，実験データは図上で右上から左下にプロットされ，間隙比の振幅幅も小さくなっている．また，図中には最密間隙比のみを用いたそれぞれの直線回帰式も描いてあるが，容器径の大きなものが下側に位置する傾向が認められる．図-3 には，D=4cm の容器に 3 種類の異なる直径の球をそれぞれ充填した結果を重ねて示してある．なお，d=4mm では 5 個ずつ，d=6,8mm では 1 個ずつ増加させた充填を行っている．この図より，粒子径が増すとともに，実験データは図上で右下から左上にプロットされ，間隙比の振幅幅も幾分大きくなっている．さらに，最密間隙比の直線回帰式は，粒径の大きな場合が上側に位置する傾向を示している．

図-2, 3 に示したこれらの事実は，粒子の大きさに対して容器が大きくなるほど，あるいは，容器の大きさに対して粒子が小さくなるほど，間隙比に対する壁効果の影響が少なくなることを表しているものと考えられる．すなわち，間隙比に対する壁効果は，詰める粒子の大きさと容器の大きさの相対的な比率によって表現できるものと考えられる．そこで，粒子の大きさも考慮に入れるため，形状係数 R(cm^{-1}) に粒子径 d(cm) をかけた無次元の係数を，新たに形状粒径比 Rd として定義した．

図-4 は，図-3 の試験結果を形状粒径比によって再整理したものである．図-3 と比較すると，粒子径の異なる試験結果であるにもかかわらず，間隙比の増減，ならびに最密間隙比の直線回帰式もほぼ同様の位置を示し，形状粒径比の意味合いが感じられる．

まとめ　①均一球の充填実験の結果，シミュレーションで見られたような間隙比の増減が認められた．　②容器の大きさに対して粒子が大きなものほど，壁効果が大きく影響してくることが分かった．　③新たに提案した形状粒径比 Rd は，大きさの異なる粒子，容器の実験結果の整理に有効であることが確認できた．

参考文献　1) 牧岳志・大脇忠雄・宮地純朗・板橋一雄:均一球の充填に対する壁効果の影響に関するシミュレーション,平成 9 年度土木学会中部支部研究発表会(投稿中),1998　2) 植松時雄・土屋健治・岡村進:粒体の充填および摩擦,日本機会学会誌 17 巻 56 号,pp.72-77,1951　3) Scott,G.D.:Packing of spheres,Nature, Vol.188,pp.908-909,1961