

段積みブロックの振動挙動シミュレーション

斎藤勝彦* 浅岡正人**

Mathematical Simulation on Slipping Motion of Stacked Blocks in Vibration

Katsuhiko SAITO* and Masato ASAOKA**

荷崩れを防止するためにパレットロードには様々なスタビライザが施されている。著者らは、パレットロードの耐振性を評価する方法を提案しているが、同条件下での多数回の繰り返し振動実験が必要である。そこで段積みブロックの荷崩れに至るまでの動的過程を数値シミュレーションにより再現し、振動実験の補完手段とすることを目的とする。シミュレーションは、多数個の任意多角形変形体の動的過程を対象とする個別要素法解析コードを用いる。シミュレーションの妥当性を検証するために、基礎的な条件での計算と実験を行い、シミュレーションがほぼ妥当な結果を示すことを確認している。さらに荷崩れ防止のためのスタビライザの効果を数値シミュレーションによって確認している。

キーワード：包装、パレット、輸送、振動、個別要素法

The pallet load takes various stabilizers on distribution. We proposed the new confirming test protocols of the load stabilizing efficiency by the indoor pallet load slipping down vibration tests. However, the many tests should be carried out repeatedly in the same vibrating condition, because the slipping motion of the pallet load is not determinative. The mathematical simulations of the stacked blocks by the distinct element method are carried out.

Some basic vibration tests using stacking blocks are carried out to confirm the mathematical model. We can confirm that results of the mathematical simulations are similar to the physical model tests. The relative displacement becomes qualitatively large as much as strong vibration. It can be also compared the stacking blocks' movement without and with a stabilizer.

Keywords : package, pallet, transport, vibration, distinct element method

1. はじめに

パレットロードは、輸送中の振動衝撃による荷崩れを防止するため、ストレッチフィル

ム、シュリンクフィルム、およびバンド掛けなど様々な対策が施される。これらパレットロードスタビライザの効果を評価する方法としては、JIS 規格（ユニットロード安定性試

*神戸大学（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）：
Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

**研究当時：神戸大学

験)¹⁾では、振動試験等の方法が記述されているものの、振動試験により得た結果をどのように評価すべきかについて、明確な指針がないのが現状であろう。そこで著者²⁾は、振動作用下で、再現性のない荷動き挙動を示すパレットロードの安定性を、ある設定された荷割れ量に至るまでの振動回数の大小で評価する方法を提案している。ここでは、パレットロードの耐振信頼度の定義と、同一信頼度における振動強度と荷割れに至るまでの振動回数の関係（金属材料疲労破壊における S-N カーブに相当）を例示している。ただし、同一条件での数十回の繰り返し実験が必要であり、実用上すべてのケースで行うには限界がある。

一方、有限要素法を代表とする各種の数値的解法は、構造解析などの分野で、実験的な検討の補助手段や代替手段として広く使用されるに至っており、包装設計の分野でも少しずつ実用化への取り組み^{3) 4)}が進んでいる。そこで本研究では、段積みブロックの荷崩れに至るまでの動的過程を数値シミュレーションにより再現し、振動実験の補完手段とすることを目的とする。

2. 個別要素法

個別要素法⁵⁾は、多数体ひとつひとつの要素の動的過程を時間発展的に再現していく陽解法であり、粒状体を対象にした場合は、サイロ内ホッパーの制御による粉体落下挙動、海上埋め立て工事における土砂海中投下時の水底拡散状態の再現などで応用されており、任意多角形を対象にした場合は、斜面や岩盤の崩壊過程や浸透流、構造物の地震による応

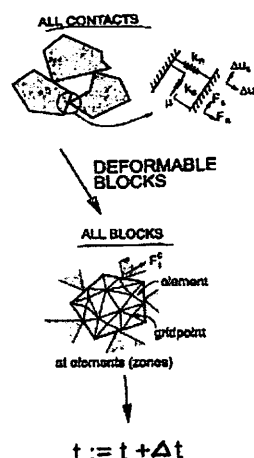


Fig. 1 Calculation cycle for the distinct element method

答問題等に実用化されている。

Fig. 1 は、今回対象とする 2 次元任意多角変形体の計算モデル⁶⁾を模式的に示したものである。まず、それぞれの多角形（個別要素）と近接要素との接触判定と接触位置を算出し、接触する場合には、接線及び法線方向のバネ反力と接線方向の摩擦力を見積もる。次に個別要素に作用する外力から、変形構造体の構成則を基に体自身の変形を計算するとともに、運動方程式から平面 2 方向と回転の 3 自由度運動を計算する。これらの結果は、次タイムステップの個別要素の初期条件となり、計算が進んでいく。

なお、今回の段積みブロックの振動挙動に関するシミュレーションモデルは、基本ソフトウェアとして個別要素法解析コード UDEC (Itasca Consulting Group, Inc.) を用いている。

3. 数値シミュレーションの妥当性

ここでは、2 次元アルミニウムブロックが同一部材の台上に 2 列 2 段積みされている場

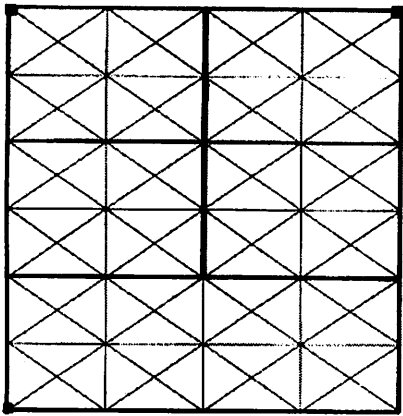


Fig. 2 Calculation mesh of the stacking blocks

Table 1 Dimensions and dynamic conditions of the stacking blocks

Block Size	6.0×8.0 cm
Base Size	6.0×16.0 cm
Density	2.7×10 ³ kg/m ³
Frictional Angle	25.1 degree
Strength of Vibration	0.6~1.0 G
Vibration Frequency	10.0 Hz
Bulk Modulus	5.51×10 ¹⁰ N/m ²
Modulus of Elasticity	2.25×10 ¹⁰ N/m ²
Spring Constant (Normal)	1.18×10 ¹⁴ Pa/m
Spring Constant (Shear)	1.18×10 ¹⁴ Pa/m

合を対象にし、計算モデルでは底面の境界条件として、水平正弦振動を与えている。また、計算の有効性を検証するために振動実験を行っている。

Fig. 2 は計算対象とするブロック [6.0×8.0cm] と変形体ブロックを多数個の三角要素に分割した計算メッシュを示している。2次元平面に固定された同一部材 [6.0×16.0cm] の台の上に2列2段に段積みした場合の計算を

行う。なお、図中の3点(1:底面左端、2:上段ブロック上左端、3:上段ブロック上右端)は、計算結果の評価に用いる代表点である。

Table 1 は、入力するブロックの諸特性である。表中の摩擦角度は上段4つのブロックをそれぞれ10回ずつの傾斜試験によって得た値の平均値、体積弾性係数、せん断弾性係数は、実験で用いるアルミニウム部材より切り出した金属材料試験片(JIS-Z2201)の引張試験より、縦および横ひずみを計測した、ばらつきのある値の平均値を示している。

これらブロックのばらつきのある諸係数は、Fig. 3 から Fig. 5 に、体積弾性係数、せん断弾性係数、および摩擦係数の発生確率分布を表しているが、これらの係数を組み合わせて計算に入力することで、実験で起こるような再現性のない荷動き挙動をシミュレーションする。なお、Fig. 3 から Fig. 5 に示す横軸の0とは、それぞれの平均値(average)を、1とは、平均値から標準偏差(stdev)の分だけ増減する値のことであり、それぞれの平均値と標準偏差は図中に示している。また、台底面の境界条件として周波数10Hzの水平振動を与えることによって、段積みブロックの振動挙動を再現していく。

Fig. 6 は実験の概観であり、計算条件と同様に、振動試験装置テーブル上にアルミニウム製ブロックを段積みし、計算条件の振動(周波数10Hzの水平規則波、加速度振幅0.6G~1.0G)を加える。本論でのシミュレーション計算は2次元モデルであるため、実験でも運動をアクリル製のガイドにより2次元運動に拘束している。また、数値計算によるブロック挙動の評価点と同位置のブロック挙

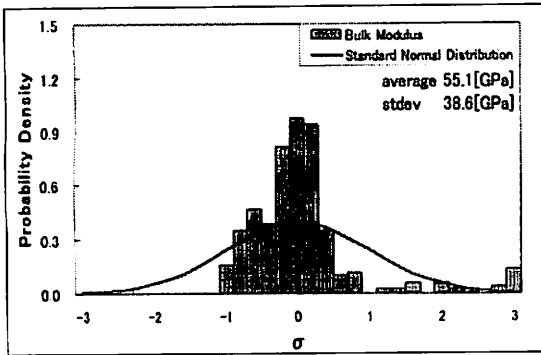


Fig. 3 Probability density of the bulk modulus

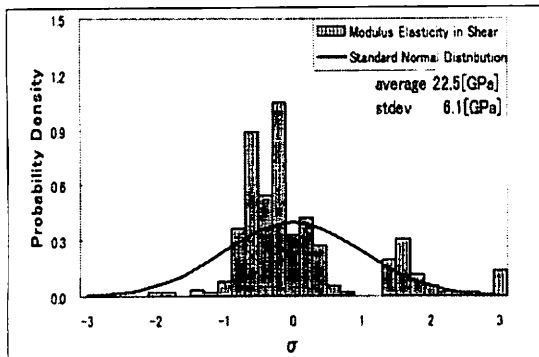


Fig. 4 Probability density of modulus elasticity in shear

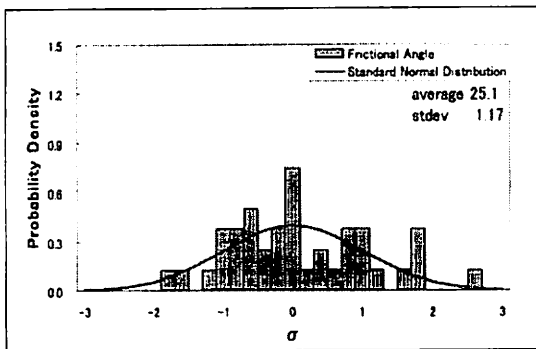


Fig. 5 Probability density of frictional angle

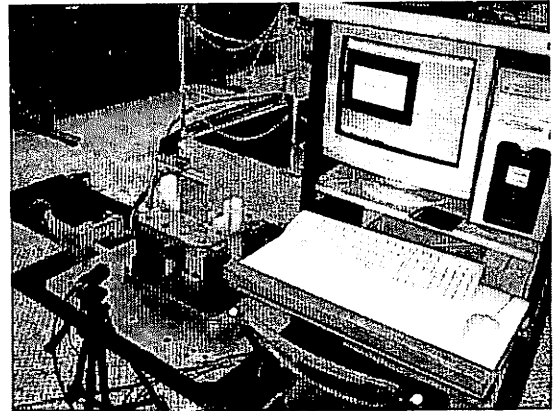


Fig. 6 Physical model

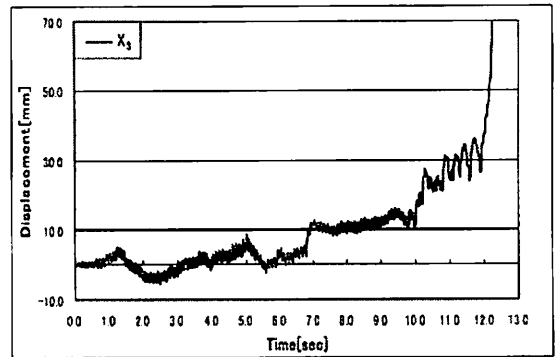


Fig. 7 The movement of the estimation points

対象物の運動を解析することができる。

一例として、周波数 10Hz、振動強度 1.0G の振動を加えた場合の荷崩れに至るまでの時系列と荷崩れを起こした時のブロックの状況と代表点の軌跡を、それぞれ Fig. 7、Fig. 8 に示す。Fig. 9 は、実験による振動強度 0.8G の正弦振動が加わってから3.82秒後のブロックの荷割れ状況、Fig. 10 はブロックの摩擦角(摩擦角の正接が摩擦係数)を 23.5° に設定し、振動強度 0.8G の正弦振動を与えてから3.82秒後のブロックの荷割れ状況と計算メッシュ接点における速度ベクトルを示したものである。これら2つの図より、わずかであるが4つのブロックがお互いに離れていることが分

動を、変位計測システム (Dynas2DG) によって計測する。変位計測システムでは、一定の時間間隔で連続的に取り込まれた画像から、追跡したいターゲット (計測ポイント) を指定し、そのターゲットの自動追跡を行い、

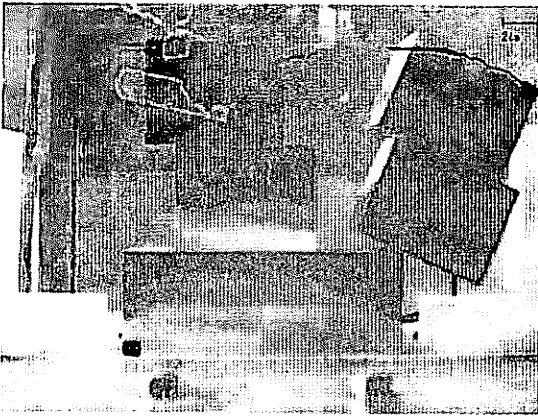


Fig. 8 The movement of the scene

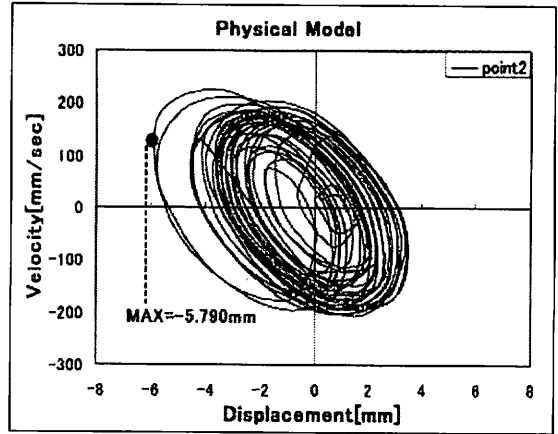


Fig. 11a Relative displacement and velocity

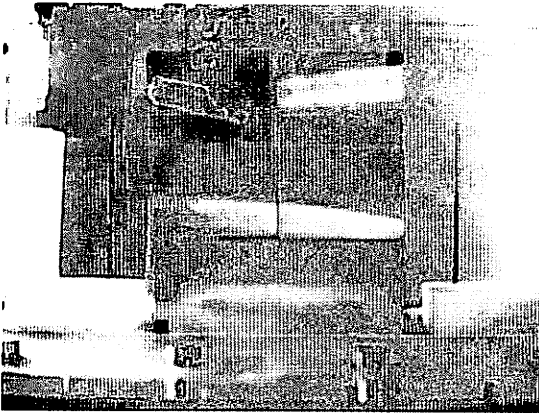


Fig. 9 One scene of the stacking blocks under vibration (physical model)

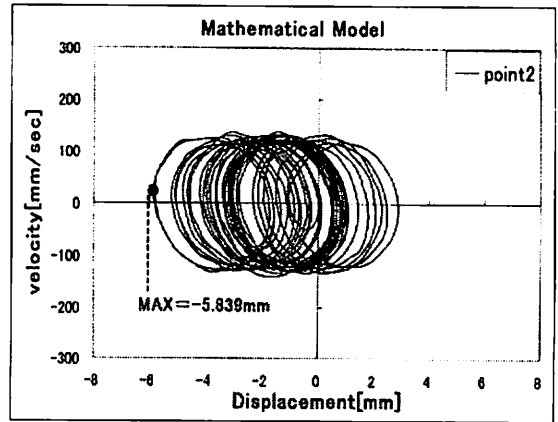


Fig. 11b Relative displacement and velocity

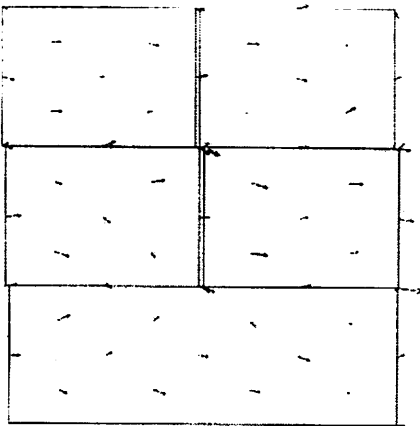


Fig. 10 One scene of the stacking blocks under vibration (mathematical model)

かる。また節点における速度ベクトルから、ブロックが複雑に変形しつつ、互いに衝突を繰り返しながら荷割れしていることが分かる。

Fig. 11 は、計算と実験によるブロック上段左端の台底面境界に対する相対変位の時系列を位相面図（横軸：変位、縦軸：変位速度）によって表した例である。これより、実験において正弦振動を加えているにもかかわらず、段積みされたブロックの挙動は正弦的ではなく複雑な挙動を示し、そのような特徴は計算によっても定性的に再現されていることが分かる。

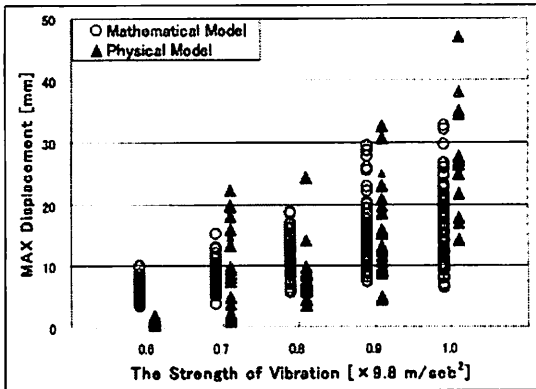


Fig.12 Maximum overhang displacement

Table 2 Dimensions and dynamic conditions of corrugated box

Block Size	0.21×0.31m
Base Size	0.1×0.93m
Density	3.57×10 ³ kg/m ³
Frictional Angle	17 degree
Strength of Vibration (horizontal)	0.3~0.7 G
Strength of Vibration (vertical)	0.3~0.7 G
Vibration Frequency	10.0 Hz
Bulk Modulus	8.24×10 ⁴ N/m ²
Modulus of Elasticity (Shear)	1.23×10 ⁸ N/m ²
Spring Constant (Normal)	1.94×10 ⁸ Pa/m
Spring Constant (Shear)	1.94×10 ⁸ Pa/m

Fig. 12 は、段積みブロックの台底面境界に対する相対変位が振動3.82秒間で最大となる時、上段左右ブロックの最大相対変位のうち大きい方の値（オーバーハング量）と振動強度との関係を、実験と計算で比較したもの

である。ただしそれぞれの振動強度での計算は、事前実験より得た (Fig. 3 ~ Fig. 5 参照) ブロックの摩擦係数、体積弾性係数、せん断弾性係数の平均値およびそれにそれぞれの標準偏差値の1倍、2倍を加減した組み合わせで行っている。また、実験は同条件での振動試験を繰り返した結果である。これより、振動が強くなるほどオーバーハング量が大きくなる（荷崩れしやすい）定性的傾向は計算でよく再現されている。また、実験で見られるような段積みブロックの振動挙動のばらつき具合も、計算によりある程度表現できている。

ここで計算結果の誤差の要因としては、実験における2次元拘束ガイドの摩擦の影響、計算メッシュ節点の不足、振動テーブル上の振動外力が厳密な正弦波としては再現できない、ブロック同士の接触反力で減衰の効果を計算で反映されていないなど、様々な要因が考えられる。また、計算モデルも今後3次元へ拡張すべきであり、これらについては、今後の検討課題としたい。

4. 荷崩れ防止効果の確認

Fig. 13 に示すような、3列4段にブロック積みした段ボール箱を想定 (Table 2) した計算により、水平バンド (バンドA: 最上段のみを固縛: Fig. 14、バンドB: 上2段を固縛: Fig. 15) の荷崩れ防止効果を確認する。ここに、摩擦角は多数回の傾斜試験により得た平均値 (5) を、体積弾性係数、せん断弾性係数およびバネ定数は、想定する段ボール箱の静圧縮試験より、ひずみ-応力特性を求め、ポワソン比をゼロとすることで得た値である。

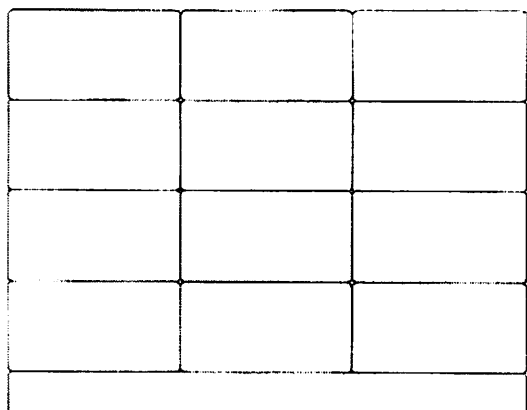


Fig. 13 Without band model

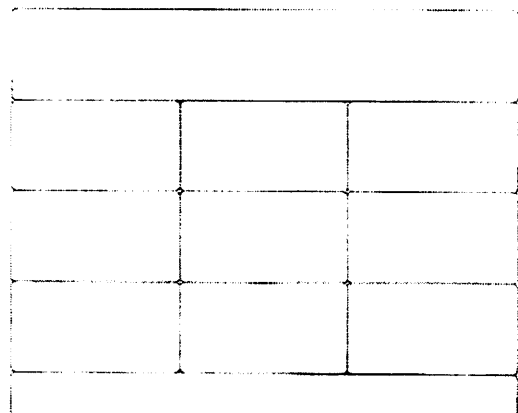


Fig. 14 With band A model

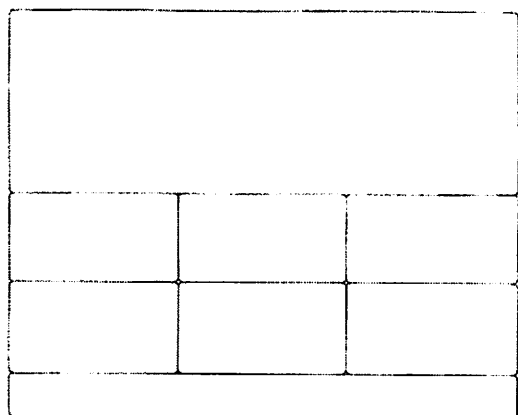


Fig. 15 With band B model

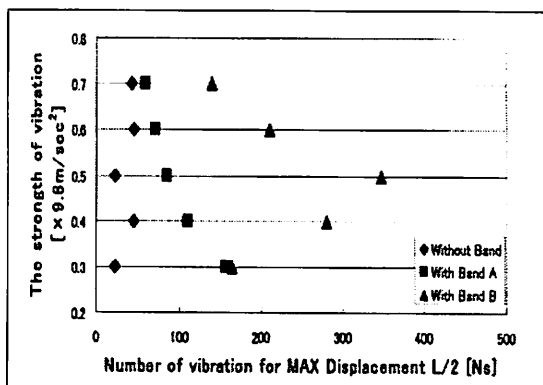


Fig. 16 Confirmation of stabilizing effect (horizontal vibration)

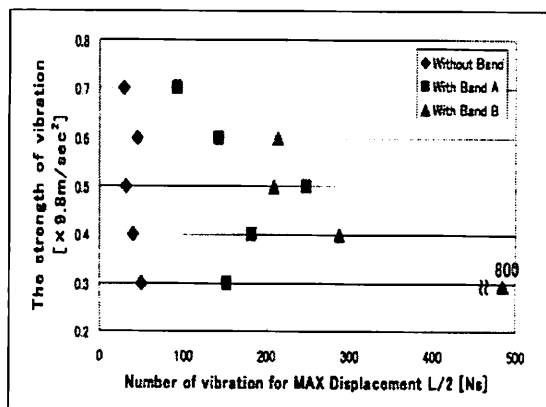


Fig. 17 Confirmation of stabilizing effect (vertical vibration)

Fig. 16、Fig. 17はそれぞれ、水平、鉛直振動条件で、パレットロードのオーバーハンク量が箱1個の長さLの半分に達するのに要した振動回数を、水平バンドの有無で比較したものである。これらの図より、振動強度が大きくなるにつれて荷崩れしやすく、水平バンドの荷崩れ防止効果も確認できる。

5. おわりに

本研究では、個別要素法による数値シミュレーションが、振動実験を補完できる手段で

あることを確認した。さらに、荷崩れ防止策としてのバンドがけの効果を数値シミュレーションによって検証した。ただし、本研究で用いた数値モデルは2次元であり、モデルを3次元に拡張していくとともに、実物のパレットロードを想定したシミュレーションと実輸送テストを行うことにより、室内振動実験と数値計算を効率的に組み合わせた、実用的な荷崩れ防止策評価のためのハイブリッド手法の確立を目指したい。

<参考文献>

- 1) JIS-Z0170-1998
- 2) 斎藤勝彦、久保雅義、切通祐介、平野誠、日本包装学会誌、11 (5)、275-282 (2002)
- 3) 三上英一、茨木孝昌、小林孝男、小高功、日本包装学会誌、13 (4)、243-252 (2004)
- 4) 中川幸臣、丹羽一邦、日本包装学会誌、14 (5)、317-327 (2005)
- 5) Cundall,P.A., Proc. of the Symp. of the Int. Soc. of Rock Mech., 1, 2-8 (1971)
- 6) Cundall,P.A. U.S.Army. Contract DAJA37, 79 (C). 0548 (1980)
- 7) 斎藤勝彦、久保雅義、友原直人、切通祐介、日本包装学会誌、9 (6)、369-375 (2000)

(原稿受付 2006 年 3 月 8 日)

(審査受理 2006 年 6 月 5 日)