

技術報告~~~~~

1 試料による正弦半波衝撃パルスを用いた 簡易衝撃強さ試験方法の提案

川口 和晃*

Proposal of Simple Shock Testing Method with Single Specimen using Half-sine Shock Pulse for Cushioning Package

Kazuaki KAWAGUCHI *

緩衝包装設計の適正化のためには、内容品の許容加速度を数値的に把握する必要がある。JIS にはその試験方法が規定されているものの、複数の試験サンプルや台形波パルスが必要な専用試験機が必要となるため、産業界に広く普及していない。そこで、JIS よりも容易な方法で、正弦半波パルスを用い 1 試料のみでも衝撃強さ試験が行える方法について検討した。

ここでは、試料数を削減するため許容速度変化試験をスキップさせるかわりに、製品の許容速度変化を、実用上有効な範囲のなかで最小値を採用することで、より厳しい条件の損傷境界曲線を見積もることができることを明らかにした。さらに、許容加速度試験の正弦半波パルスから算出される衝撃応答スペクトルと許容速度変化から、破損部位の固有振動数と限界加速度を同定することで、正弦半波パルスから損傷境界曲線を導出する方法を考案した。許容加速度の決定は、損傷境界曲線と包装落下試験の落下高さから、適切な値が得られるように設計した。さらに、最も安全な許容加速度を得るための方法として、矩形波からなる損傷境界曲線を用いた方法も含めた。

Critical acceleration of inside product should be identified numerically for optimized package. JIS has a testing method for shock strength of product as Damage Boundary Curve, DBC, that requires multi-specimen and a specialized shock machine can generate the trapezoidal pulse. However this method is not spread widely due to their complex testing method. This paper considered a simple test method with single specimen only using the half-sine shock pulse.

In this method, to reduce the number of specimen, the critical velocity change test was skipped. Instead of this test, the lowest value of critical velocity change in the practical range was applied to estimate DBC with more severe condition. Calculation method of DBC was considered using the natural frequency and the response acceleration of fragility part that calculated by the shock response spectrum with half sine pulse at the critical acceleration and critical velocity change. Suitable critical acceleration can be determined by derived DBC and the drop height of package drop test. Moreover, to lead the safest critical acceleration that can withstand toward any kinds of shock pulse, the calculation method was considered using the DBC by square shock pulse

キーワード：包装設計、衝撃強さ、衝撃試験、損傷境界曲線、正弦半波パルス

Keywords: Package Design, Product Strength, Shock Test, Damage Boundary Curve, Half-sine Pulse

* 神栄テクノロジー株式会社, SHINYEI TECHNOLOGY CO.LTD.
TEL:078-304-6795, FAX:078-304-6792, Email:k-kawaguchi@stc.shinyei.co.jp

1. 緒言

緩衝包装設計の適正化のためには、包装材料の緩衝特性とともに、内容品の衝撃強度を数値的に把握する必要がある。そこで、内容品の衝撃強度を把握するための試験方法が JISZ0119：2002「包装及び製品設計のための製品強さ試験方法」（以降、JIS）に規定されている。本試験を実施すると、内容品固有の損傷境界曲線（Damage Boundary Curve、以降、DBC）が得られ、緩衝包装設計に必要な指標である許容加速度が明確になる。この数値をもとに緩衝包装設計を行うことで、内容品の安全性を確保しながら経済合理性のある適正包装が実現できる。

しかしながら、現行の JIS は、台形波衝撃パルスが生成できる専用試験機が必要になることと、2 個以上の破損可能な試験サンプル（試料）が要求されているため、試験実施は容易でなく、産業界に広く普及しているとは言い難い。

これまで当試験においては、より簡易に行うことを目的とした方法¹⁾²⁾や高精度化のための試験方法³⁾⁴⁾が提案されている。ここでは当該試験の普及を目的とし、1 試料のみ、かつ正弦半波パルスを用いて内容品の許容加速度を推測するための、簡便な衝撃強さ試験方法について検討する。

2. JIS の課題

JIS では、2 つの異なる試験（許容速度

変化試験と許容加速度試験）を行うことで、1 本の DBC を実験的に得る。これにより、内容品の許容速度変化 ΔV_c と許容加速度 A_c が明確になる。したがって、JIS では破損してもよい試料が最低でも 2 つ以上必要となるが、実際の設計現場で、複数の試料を用意できる環境は稀である。

また JIS では許容加速度試験時に用いる波形は、台形波パルスが要求されている。その背景⁵⁾は、台形波は実際に生成できる衝撃パルスの中で、矩形波に最も応答が近く、どの速度変化で許容加速度試験を行っても、ほぼ同じ許容加速度が得られることと、他の衝撃パルスと比較し、最も厳しく製品強度を評価する（許容加速度が最小となる）ためである。正弦半波パルスの場合、試験速度変化によって、得られる許容加速度が一定しないため、当該試験には適さないとされてきた。しかしながら、台形波パルスが発生可能な衝撃試験機は、それ自体が市場に普及していないため、試験実施は容易でない。

以上のように、複数の試料が必要であることと、専用の試験機が必要とされていることが、本試験方法の普及を阻害する要因と考えられる。そこで、試料数を 1 つに制限し、台形波試験機に比べて制御しやすく、比較的普及している正弦半波パルス用の衝撃試験機を利用した衝撃強さ試験方法について検討する。

3.提案法

3.1 試料数の削減と正弦半波パルスによる DBC 推定

DBC は、内容品の破損部位を 1 自由度線形バネ系と仮定し、任意の衝撃パルスが入力されたとき、破損部位に限界加速度以上の衝撃加速度が発生すると内容品が破損する考え方から、式(1)、式(2)より導出できる。

$$A_{in}(x) = \frac{a_c}{T_r(x)} \cdots (1)$$

$$\Delta V(x) = A_{in} \cdot D_e = \frac{a_c}{f_c} \cdot \frac{x}{T_r(x)} \cdots (2)$$

$$\therefore x = f_c \cdot D_e \cdots (3)$$

A_{in} 、 ΔV 、 D_e はそれぞれ、入力衝撃パルスの最大加速度、速度変化、有効作用時間、 a_c 、 f_c はそれぞれ破損部の限界加速度と固有振動数、 $T_r(x)$ は衝撃伝達率であり、衝撃パルス種類別（正弦半波：Half-sine、矩形波：Square、台形波：Trapezoidal）に Fig.1 のように表せる⁵⁾。

したがって、 a_c と f_c が同定できれば、式(1)と式(2)より、 $T_r(x)$ 毎に DBC を得ることができる (Fig.2)。

本提案法での試料の削減方法として、許容速度変化試験をスキップさせ、許容加速度試験のみを実施することとする。これは緩衝包装設計の観点からは、許容速度変化は不要な情報であることによる。

ここで、正弦半波パルスによる DBC の導出について考える。正弦半波パルスの $T_r(x)$ は Fig.1 のように既知であり、さらに A_{in} 、 D_e は許容加速度試験時に実験的に明らかになるため、 a_c と f_c の関係は式(1)、式(3)から次のように表せる。

$$a_c(x) = A_{in} \cdot T_r(x) \cdots (4)$$

$$f_c(x) = \frac{x}{D_e} \cdots (5)$$

このときの a_c と f_c の関係を、衝撃応答スペクトル (Shock Response Spectrum, SRS) と呼ぶ。すなわち、許容加速度試験において内容品が破損した 1 つ前の入力衝撃

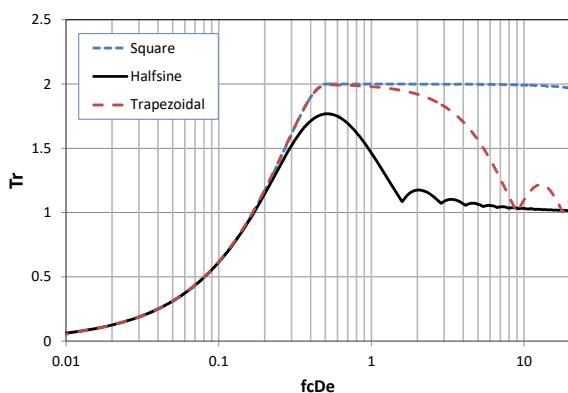


Fig. 1 Shock transmissibility by each shock pulse

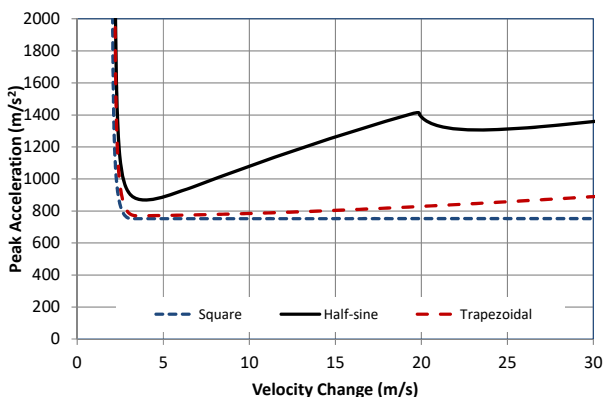


Fig.2 Example of Damage boundary curve derived by each shock pulse

パルス（限界点）から算出される SRS のなかに、破損部位の a_c と f_c の組み合わせが存在する。ここでは、この SRS を用いて、 a_c と f_c の関係を同定する。なお、SRS は実測衝撃パルスから解析的に算出することもでき、そのような機能を有する解析ソフトウェアがある場合は、その SRS を用いることもできる。

次に、本提案で取り扱う ΔV_c の範囲を 2m/s から 8m/s に限定する。これは、標準的な衝撃試験機における衝撃パルスの制御範囲であることと、一般的な供試品の ΔV_c のほとんどが、この範囲に収まることを前提としている。

a_c と f_c の同定に先立ち、これらパラメータが DBC に与える影響を確認する。まず、許容加速度試験しか実施しない場合、内容品の限界点は 1 点しか決まらないため、DBC は定まらない。換言すると、この時点では、限界点を通過するあらゆる DBC が考えられる。例として、正弦半波

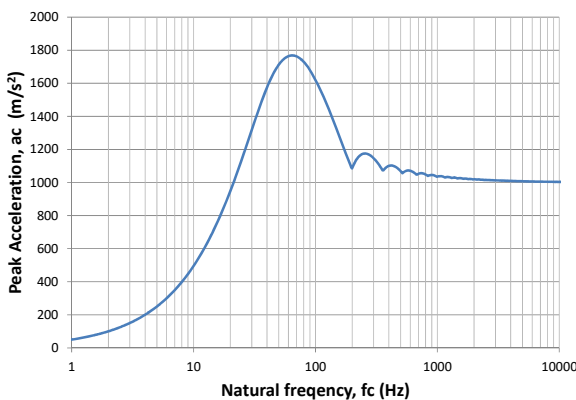


Fig.3 Shock response spectrum by half-sine at 1000m/s² with 8m/s velocity change

パルス（最大加速度 1000m/s²、速度変化 8m/s）の SRS を Fig.3 に、その SRS から読み取れる (f_c, a_c) のうち (20,722)、(50,1711)、(80,1733)、(100,1622)、(120,1504)のときの DBC を Fig.4 に示す。これより、入力衝撃パルスの速度変化 (ΔV_{test} 、ここでは 8m/s) より大きい範囲では、 f_c が大きくなるほど DBC は大きくなる。一方、 ΔV_{test} より小さい範囲（8m/s 未満）では、 f_c が高くなるほど、 ΔV_c は小さくなり、DBC はそれ以下の f_c からなる DBC よりも下回る。すなわち、正弦半波 DBC において、 ΔV_{test} 以下の範囲では、 ΔV_c が小さいほど、内容品の許容加速度は安全側に見積もられる。なお、この傾向は本提案の速度変化範囲（2m/s から 8m/s）すべてで同様の傾向があることを確認している。

これを踏まえ、許容速度変化試験をスキップさせたとしても、 ΔV_c の下限値である 2m/s を考慮しておけば、安全側（最も

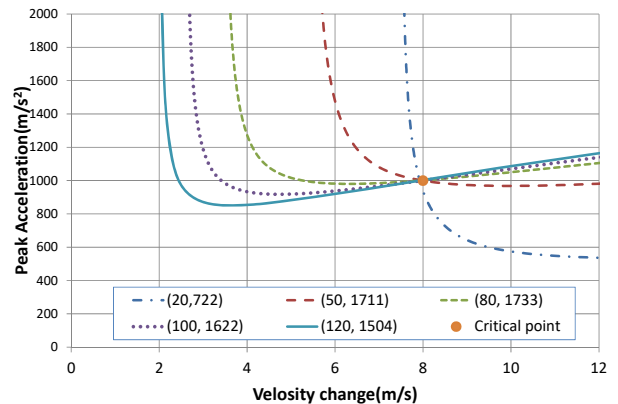


Fig.4 Damage boundary curve of each condition

厳しい条件)での許容加速度を見積ることができる。なお、 ΔV_c の下限値に対する知見があり、別の値が予想される場合は、その数値を用いてもよい。

ΔV_c が既知となれば、 a_c と f_c は式(6)の関係⁶⁾にあることから、許容加速度試験において限界点の衝撃パルスから得られるSRSを用いて、式(6)の条件に当てはまる a_c と f_c の組み合わせが探索できる。

$$\frac{a_c}{f_c} = 2\pi\Delta V_c \cdots (6)$$

Fig.5 は Fig.3 から得られる f_c と a_c/f_c の関係である。式(6)の右辺の値を Fig.5 に当てはめて f_c を特定したのち、式(6)に f_c を代入すれば a_c が既知となる。このようにして得られた f_c と a_c を式(1)、式(2)に代入することでDBCは特定できる。

ただし本提案を行う場合、許容加速度試験における ΔV_{test} は式(7)に設定する。

$$\Delta V_{test} = (1 + e)\sqrt{2gh} \cdots (7)$$

g は重力加速度、 h は包装貨物落下試験の試験高さ、 e は包装設計時の緩衝材料の

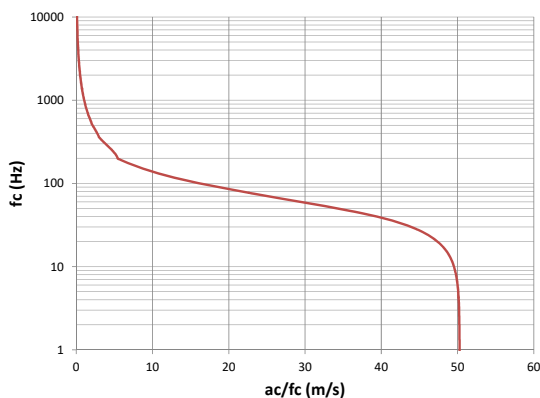


Fig.5 Relationship between ac/f_c and f_c

反発係数である。 e が不明な場合は、1を採用する。

これは、小さすぎる速度変化による許容加速度試験では、内容品が破損しない場合があることに加え、本提案で算出された許容加速度を大きく見積もることを回避するためである。Fig.4 から、包装貨物落下試験で内容品に生じる速度変化 ΔV_{ff} が ΔV_{test} を超える場合や、内容品の f_c が相対的に低い(ΔV_c が大きい)ときは、本提案で見積もった許容加速度が最小値とならない範囲(Fig.4 では 8m/s 以上)がある。この条件に当てはまる場合、見積もられた許容加速度以下になるように緩衝包装设计を施したとしても、実際の許容加速度がそれよりも小さいことで、包装貨物落下試験において内容品が破損してしまう場合も考えられる。したがって、本提案では式(7)となる条件での許容加速度試験が必要となる。

3.2 許容加速度の設定

正弦半波パルスから導出されたDBCから、許容加速度を決定する方法について述べる。

内容品は緩衝包装设计されたのち、包装貨物落下試験において、緩衝性能評価が行われる。この落下試験で内容品に生じる速度変化 ΔV_{ff} は式(7)と同値となる。すなわち、導出されたDBCにおいて、式(7)の速度変化にあたる加速度を許容加速度とすればよい。ただし、緩衝材の反

発係数 e が不明である場合は、式(8)の範囲において、DBC の最小加速度を許容加速度に設定する。

$$\sqrt{2gh} \leq \Delta V_{ff} \leq 2\sqrt{2gh} \dots (8)$$

3.3 様々な衝撃パルスへの対応

これまでは入力衝撃パルスが正弦半波であることを前提としてきたが、包装貨物落下試験で内容品に生じる衝撃パルスが正弦半波以外となることが予想される場合、これまでの許容加速度を用いた緩衝包装設計は危険である。この場合は矩形波パルスによる DBC を用いて、式(8)の範囲の最小値をとればよい。 a_c と f_c の同定は、正弦半波パルスによる許容加速度試験で得られる値とし、矩形波からなる $T_r(x)$ を用いることで、矩形波 DBC を求めることができる。冒頭にあるように矩形波 DBC は、すべての衝撃パルスの中で最も厳しい条件となることから、様々な衝撃パルスにも耐えられるように、最も安全に緩衝包装設計を行う必要がある場合はこちらを用いる。

ただし本案は許容速度変化試験を実施せず、安全側に許容加速度を予測する考え方であるため、得られる許容加速度は過小評価（本来よりも小さく見積もられる）となる傾向にあることに留意する必要がある。正確な許容加速度が必要になる場合は、JIS や他の提案法³⁾⁴⁾を実施すべきである。

3.4 実施手順

本提案を実施する場合、以下の手順で試験、解析を行う。

1. 供試品を衝撃試験機に固定し、式(7)となる速度変化の正弦半波パルスを用いて、最大加速度を徐々に増加させる許容加速度試験を、供試品に破損が生じるまで行う。その他の試験方法は JISZ0119 に準じる。
2. 供試品に破損が生じた 1 つ手前の衝撃パルスの A_{in} 、 D_e を式(4)、式(5)に代入し、SRS を算出する。このとき、SRS は実測衝撃パルスから得られる解析値を用いても良い。
3. 実用範囲のなかで、最小と考えられる ΔV_c を任意に設定する。特に指定が無い場合、2m/s を採用し、式(6)の値となる a_c と f_c の組み合わせを、2. の SRS から求められる a_c/f_c と f_c の関係から探索する。
4. 3. で得た a_c と f_c および正弦半波による $T_r(x)$ を式(1)、式(2)に代入し DBC を導出する。包装系に生じる衝撃パルスが正弦半波以外となることが予想される場合、矩形波 $T_r(x)$ を用いる。
5. 得られた DBC において式(7)となるときの加速度を、許容加速度とする。緩衝材の反発係数が不明である場合は、式(8)の範囲において最小値となる加速度を許容加速度とする。

3.5 計算例

ここでは、数値シミュレーションとして、本提案の手順とその計算例を以下に示す。なお、実際に採用する数値は、試験時の実測データを用いるべきであるが、ここでは机上計算のため便宜上、理想パルスから算出される計算結果に基づく。

ある製品の包装落下試験の試験高さ h が 60cm のとき、正弦半波パルスを用いた衝撃強さ試験方法と許容加速度導出手順について考える。ただし、緩衝材の反発係数 e は不明とする。

まず、許容加速度試験における正弦半波衝撃パルスの速度変化は、式(7)より 6.8m/s となる ($e=1$ を代入)。この条件下で、正弦半波パルスが発生できる衝撃試験機により、 A_{in} を 300m/s^2 から 200m/s^2 刻みに増加させる許容加速度試験を行ったところ、 1100m/s^2 のときに製品が破損したとする。このとき、DBC 算出に必要なパラメータは、 A_{in} が 900m/s^2 (破損の 1 つ前)、 D_e は 7.6ms となる。

次に、 A_{in} が 900m/s^2 、 D_e が 7.6ms のときの正弦半波 SRS を式(4)、式(5)より算出すると Fig.6 となる。これより、 a_c/f_c と f_c の関係は Fig.7 のようになる。ここで、 ΔV_e を 2m/s とし、式(6)に代入すると a_c/f_c は 12.6 となる。これを Fig.7 に当てはめると f_c は 114Hz となり、式(6)に代入すると a_c は 1427.0m/s^2 が得られる。

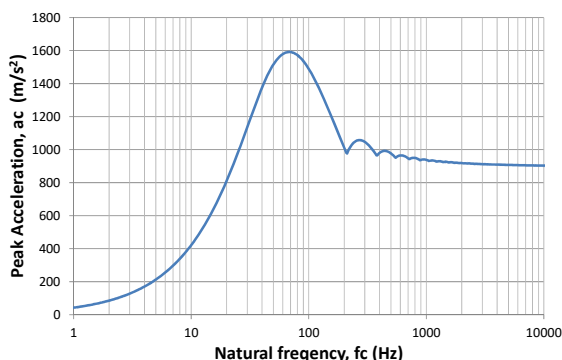


Fig.6 SRS calculated by half sine pulse with 900m/s^2 acceleration and 7.6ms duration

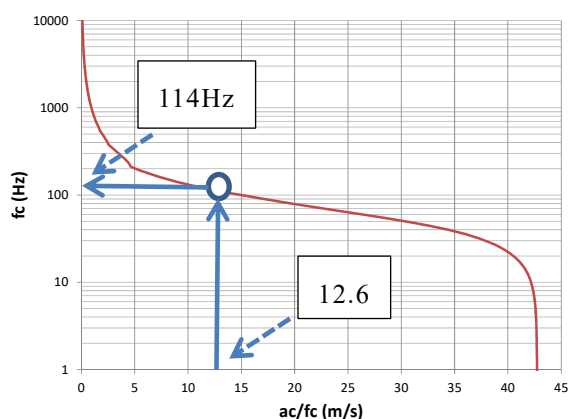


Fig.7 Determination of natural frequency

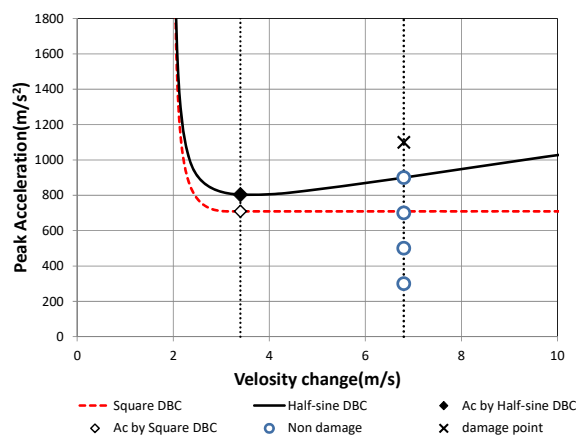


Fig.8 Critical acceleration with DBC derived by half sine and square pulse

その後、式(1)、式(2)に、正弦半波 $T_r(x)$ および f_c と a_c を代入すると、Fig.8 の実線のような正弦半波 DBC が得られる。ここで、反発係数は不明であるため落下試験高さ h を式(8)に代入すると、内容品に発生する速度変化の範囲は 3.4m/s から 6.8m/s となる (Fig.8 内の縦点線)。ここで許容加速度は、この範囲の最小加速度であることから、 809.6 m/s^2 となる。また矩形波 $T_r(x)$ を用いた場合の DBC は Fig.8 の破線となり、このとき許容加速度は 713.5 m/s^2 となる。

4. 結論

本報告では、製品衝撃強さ試験の普及を目的とし、緩衝包装設計に必要な包装内容品の許容加速度を、JIS よりも簡便に推定するため、1 試料の供試品のみで正弦半波パルスを用いた衝撃強さ試験方法を検討した。

具体的には、正弦半波パルスによる DBC において、内容品の許容速度変化を現実的な範囲の中で任意の最小値に設定すれば、許容速度変化が未知であっても、安全側に許容加速度が得られることを示し、許容速度変化試験をスキップさせることで、試験に必要な供試品数を削減した。

また、許容加速度試験の限界点での正弦半波パルスから導かれる SRS を用いて、DBC 算出に必要なパラメータ (f_c と a_c) を同定し、DBC を関数的に描画した上で、

包装貨物落下試験の試験落下高さをもとに、許容加速度を設定することで、正弦半波パルスのみでも、許容加速度値が得られる方法を検討した。さらに包装系に正弦半波パルス以外の衝撃パルスが入力される場合も想定し、矩形波パルスによる DBC を用いることで、あらゆる衝撃パルスに対応した許容加速度の決定方法についても検討した。

ただし、本提案法では内容品の許容速度変化を明確にしないことから、内容品本来の許容加速度を正確に導くことはできず、得られる許容加速度は過小評価(本来の許容加速度よりも少なく見積もられる)となる傾向にあることに留意しなければならない。また、蓄積疲労の影響が考えられる試料であれば、複数の試料を用意するなどの対策を検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 中嶋隆勝、日本包装学会誌 20(2)、99-106(2011)
- 2) 堀口翔伍、川口和晃、日本包装学会、日本包装学会誌 26(6)、357-367(2017)
- 3) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、日本包装学会誌 11(4)、217-229(2002)
- 4) Shogo Horiguchi, Katsuhiko Saito, Packag. Technol. Sci. 32(4): 199-200 (2019)
- 5) JISZ0119:2002、付属書 1

- 6) 斎藤勝彦編集、“実務者のための力学的輸送包装設計ハンドブック”、テクノシステム(株)出版、183-185, (2018)

(原稿受付 2020 年 5 月 18 日)

(審査受理 2020 年 6 月 10 日)

