

平成 2 4 年度火薬類の包装等に係る調査研究事業報告書  
補足資料 2

攪拌実験における規模効果の検討

平成 2 6 年 2 月 2 8 日

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 1. 概要

この文書は、小規模の攪拌実験について記した報告書 5.1.節（攪拌実験）を補足するものである。小規模実験 2（5.1.2.節）および中規模実験（5.1.3.節）において、包装材で覆われた箱が受ける力積を攪拌シミュレーションの結果（5.4.1.節）をもとに検討した。

## 2. 実験・解析の実施条件と解析結果

表 1 に実験および解析（攪拌シミュレーション）の実施条件を整理した。解析の結果も示した。解析の結果からは、力積は攪拌時間に比例するとみなしてよいこと、回転数を上げると力積がわずかに増えることが確認されている。

表 1. 実験および解析の実施条件と、解析の結果

|                        | 諸元                                   | 実験                        |                            | 解析                         |                  |
|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
|                        |                                      | 小規模実験 2<br>(5.1.2.節)      | 中規模実験<br>(5.1.3.節)         | ケース 1<br>(5.4.節)           | ケース 2<br>(5.4.節) |
| 攪拌機<br>(ミキサー)          | 口径×胴径×深さ mm                          | 345×600×601               | 550×850×820                | 496×845×820                |                  |
|                        | 混合羽根 枚                               | 2                         | 3                          | 1                          |                  |
|                        | 容量 $\ell$                            | 70                        | 150                        | —                          |                  |
| 攪拌物<br>(模擬土砂)          | 碎石の岩質                                | 砂岩 <sup>#1</sup>          | 硬質砂岩                       | モデル碎石                      |                  |
|                        | 密度 $\text{g/cm}^3$                   | 2.65                      | 2.65                       | 2.65                       |                  |
|                        | 2 号碎石量 kg                            | 25                        | 50                         | 50                         |                  |
|                        | 3 号碎石量 kg                            | 25                        | 50                         | 50                         |                  |
|                        | 水 kg                                 | 10                        | 20                         | 0                          |                  |
| 6 号雷管の箱                | 縦×横×高さ mm<br>〔6 面の表面積 $\text{m}^2$ 〕 | 120×160×90<br>〔0.088 800〕 | 325×325×115<br>〔0.360 750〕 | 325×325×115<br>〔0.360 750〕 |                  |
| KONEL 雷管の箱             | 縦×横×高さ mm<br>〔6 面の表面積 $\text{m}^2$ 〕 | 150×300×90<br>〔0.171 000〕 |                            |                            |                  |
| 攪拌時間 分                 |                                      | 60                        | 60                         | 3                          | 3                |
| 回転数 rpm                |                                      | 32                        | 14                         | 14                         | 28               |
| 外周速度 $V^{\#2}$ m/s     |                                      | 1.0053                    | 0.6231                     | 0.6194                     | 1.2388           |
| 解析の結果                  |                                      |                           |                            |                            |                  |
| 箱にかかる最大荷重 kN           |                                      | —                         | —                          | 10                         | 18               |
| 箱にかかる力積 $I^{\#3}$ kN・s |                                      | —                         | —                          | 112.94                     | 121.94           |
| 最大落下速度                 | 箱 m/s                                | —                         | —                          | 2.4                        | 2.6              |
|                        | 2 号碎石 m/s                            | —                         | —                          | 2.8                        | 3.4              |
|                        | 3 号碎石 m/s                            | —                         | —                          | 2.2                        | 3.5              |

#1 一部に粘性岩を層状に含む。

#2  $V = (\text{攪拌機の胴径}) \times (\text{円周率}) \times (\text{回転数}) / 60$

#3 出力値をそのまま記した。

### 3. 力積の評価

ケース1・ケース2のそれぞれにおいて、解析で得た荷重の時間履歴は図1のようになった。横軸は時間、縦軸は荷重である。包装材で覆われた箱の表面に作用する力積 $I$ は、(eq.1)のように、荷重 $f$ を時間 $t$ で積分して得られる。

$$I = \int f(t) dt \quad (\text{eq.1})$$

また、箱にかかる力積 $I$  [kN・s]は箱の表面積 $S$  [m<sup>2</sup>]、攪拌時間 $T$  [s]に比例することから、(eq.2)のようにも表すことができる。ただし、 $i$  [kN・s/(m<sup>2</sup>・s)]は単位時間・単位面積あたりの力積とする。

$$I = STi \quad (\text{eq.2})$$

図1の20～25秒の部分拡大したものをそれぞれ図2に示す。図1と図2とから、衝突は一律に起こる訳ではなく、およそ最大荷重が2.5 kN以下で1秒近くにわたって続く「鈍い衝突」と、ピーク状となって現れる不定期な「鋭い衝突」とが混在していることがわかる。鋭い衝突はピーク荷重が大きいことから包装材に与える損傷も大きくなるのではないかと考え、本報告ではこの2種の衝突を区別して取り扱った。

これらを分離するため、今回は鋭い衝突を「荷重出力履歴において直前の時刻点からの変化が+2.5 kN以上となるピーク」とした。力積 $i$ を(eq.3)のように、2.5 kN以上の鋭い衝突に由来する部分 $i_1$ と、それ以外の部分 $i_0$ とに分けた。図2では各ケースで上段に $i_1$ 、中段に $i_0$ 、下段に $i$ を示した。

$$i = i_0 + i_1 \quad (\text{eq.3})$$

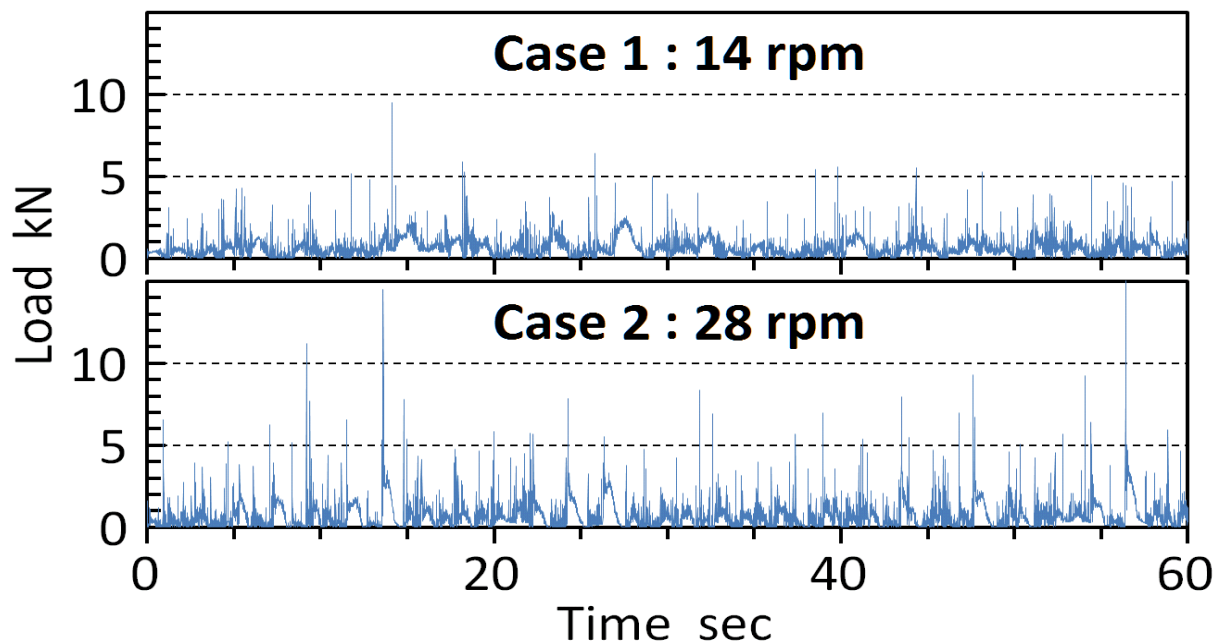


図1. 箱にかかる荷重  
報告書 p.88 の図 4.1-5, p.99 の図 4.1-12 のスケールを変えたものである。

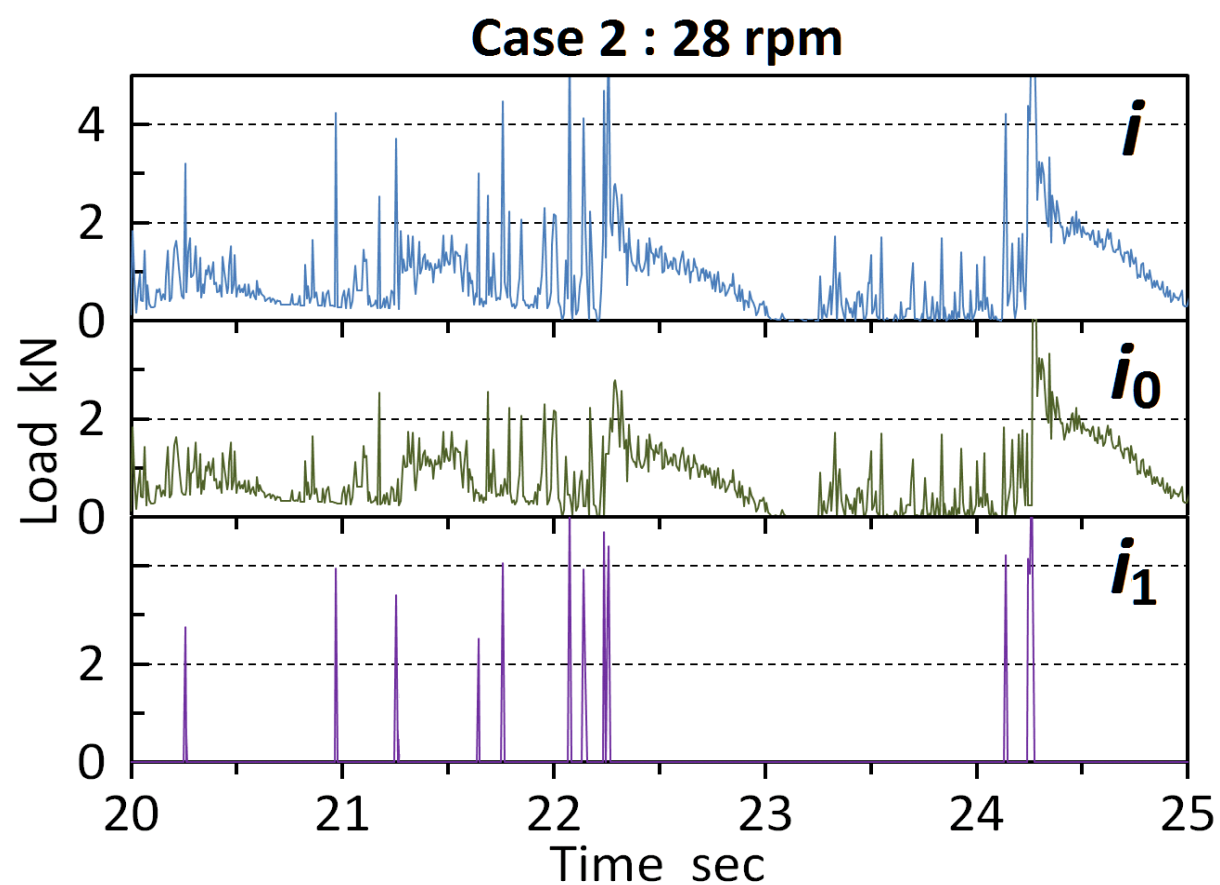
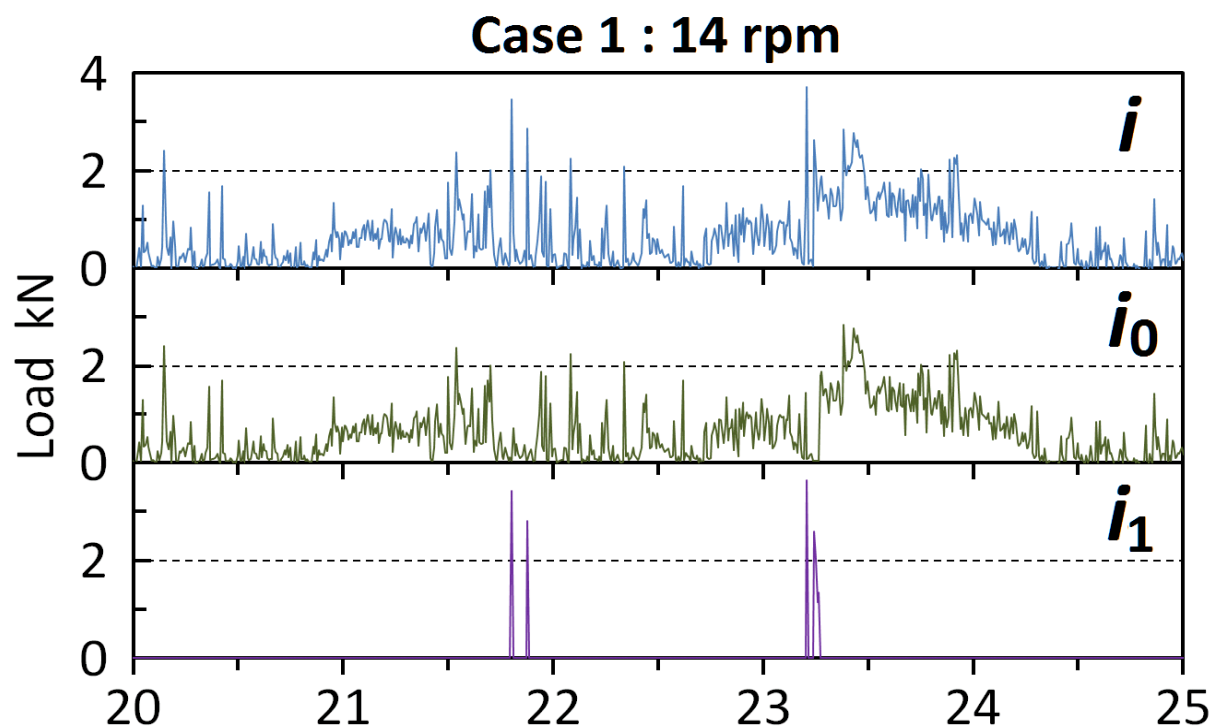


図2. 箱にかかる荷重  
 上段：解析の出力  
 中段：上段と下段との差  
 下段：抽出した 2.5 kN 以上のピーク

表 2. 力積  $i$  に占める鋭い衝突<sup>#</sup>  $i_1$  の影響

|       |                         | 外周速度<br>$V$ m/s | 単位時間・単位面積あたり力積 [kN·s/(m <sup>2</sup> ·s)] |                                         |                                          |
|-------|-------------------------|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
|       |                         |                 | $i_0$<br>( $i_1$ に含まない部分)                 | $i_1$<br>(鋭い衝突の部分)                      | $i$<br>(合計)                              |
| ケース 1 | 胴径 850 mm<br>回転数 14 rpm | 0.6194          | $106.98 \times \frac{1}{ST}$<br>= 1.6475  | $5.96 \times \frac{1}{ST}$<br>= 0.0918  | $112.94 \times \frac{1}{ST}$<br>= 1.7393 |
| ケース 2 | 胴径 850 mm<br>回転数 28 rpm | 1.2388          | $106.55 \times \frac{1}{ST}$<br>= 1.6409  | $15.38 \times \frac{1}{ST}$<br>= 0.2369 | $121.94 \times \frac{1}{ST}$<br>= 1.8779 |

# 直前の出力点からの荷重の変化が 2.5 kN 以上のピーク  
解析では、箱の表面積  $S$  は  $S=0.360\ 750\text{ m}^2$ 、攪拌時間  $T$  は  $T=180$  秒としている。

ケース 1 とケース 2 に対して  $i_0$  と  $i_1$  を求めた結果を表 2 に示す。鋭い衝突の寄与  $i_1$  は小さいことがわかる。また  $i_0$  は両者ともに  $1.64\text{ kN}\cdot\text{s}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  程度で大きな差はなく、攪拌機の回転数の増加は、鋭い衝突  $i_1$  の寄与が増えることに結びつくものとみなせる。

実験における速度の代表値として容器の外周速度  $V$  を参照し、 $V$  が  $k$  倍になったとき力積  $i_1$  は  $k^A$  倍になると仮定する。このとき、 $i_1$  は  $A, B$  を定数として以下の (eq.4) で書ける。

$$i_1 = B V^A \quad (\text{eq.4})$$

表 2 の関係から定数を見積もると  $A=1.37, B=0.17670$  となった。また、 $i_0$  はケース 1・ケース 2 の平均から  $i_0=1.6441\text{ kN}\cdot\text{s}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  とした。このとき、力積  $i$  の予測値は (eq.5) となる。

$$\begin{aligned} i &= i_0 + i_1 \\ &= 1.6441 + 0.17670 V^{1.37} \end{aligned} \quad (\text{eq.5})$$

外周速度  $V$  は、表 1 より、小規模実験 2 では  $1.0053\text{ m/s}$ 、中規模実験では  $0.6231\text{ m/s}$  であるから、単位時間・単位面積あたりの力積  $i$  の予測値は、(eq.5) から以下ようになる。

**単位時間・単位面積あたりの力積  $i$  の予測値**

- ・ 小規模実験 2      力積  $i = 1.6641 + 0.17670 \times 1.0053^{1.37} = 1.84\text{ kN}\cdot\text{s}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
- ・ 中規模実験        力積  $i = 1.6641 + 0.17670 \times 0.6231^{1.37} = 1.76\text{ kN}\cdot\text{s}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

力積  $i$  は、中規模実験のときよりも小規模実験 2 のときのほうが 5% 程度大きいと見積もれた。包装材に与える損傷と力積  $i$  との相関関係が高いと仮定するならば、中規模実験と小規模実験 2 との差がただか 5% 程度であることから、両者はほぼ同程度の損傷を与えられられる。

#### 4. まとめ

攪拌シミュレーションから得た荷重の履歴から、鈍い衝突と鋭い衝突とが混在していることがわかった。また、攪拌機の回転数が大きくなることで、鋭い衝突の最大荷重や頻度が大きくなることが確認された。

攪拌機の外周速度から箱が受ける力積を見積もったところ、箱が受ける単位面積あたりの力積は、中規模実験のときよりも小規模実験2のときのほうが5%程度大きいと見積もれた。

包装材に与える損傷と力積 $i$ との相関関係が高いと仮定するならば、中規模実験と小規模実験2との差がただか5%程度であることから、両者はほぼ同程度の損傷を与えと考えられる。