

落下の衝撃を軽減する構造の探求

宮城県仙台第三高等学校 物理5班

近年、世界的にドローンを用いた配送の普及が進んでいる。中でも、Zipline社¹⁾の手掛けるシステムが世界的に広がりつつあるが、配送完了時には荷物を空中で投下するために多量の緩衝材で衝撃を軽減する方式を採っている。そのため、緩衝材を削減し省資源化を実現できるような構造の探求を目的として研究を行った。仮説として、落下時の衝撃が回転方向に分散される事によって内部への衝撃を軽減できると考え、正二十面体や直方体を用いた対照実験を行った。その後、パラシュートを用いて落下時の速度の差を減少させたが、直方体が最も多くの衝撃を軽減する結果となった。直方体、正八面体、正二十面体での対照実験より、傾向として辺の長さが長いほど衝撃が少ないことに着目し、構造の衝撃軽減には辺の長さによる剛性の違いに由来する弾性変形が関連しているのではないかと仮説を立てた。

1. 背景

近年、近距離を短時間で輸送できるとして、世界的にドローン配送の実用化が進んでいる。特に米国に本社を置くZipline社による新興国を中心としたサービスは年々市場を拡大しており、日本市場参入をも検討している²⁾。また日本政府も2023年度中の本格導入へ向け³⁾、実証実験をすすめている。

また、Zipline社¹⁾による機体(図1)は固定翼機構を採用しており、配達完了時には空中で商品



を投下する方式を採っている。 図1 ドローン配送の様子³⁾

この機構の利点として着陸の時間的ロスが少ないことが挙げられるが、欠点として商品に落下時の衝撃が加わる事があり、同社は商品に多量の緩衝材を用いることで衝撃緩和を図っている。そこで我々は、配送費用や環境保護の観点から少量の緩衝材でも商品を衝撃から保護できる仕組みを構築することを目的として、商品を梱包する構造部分に着目した研究を行った。

2. 仮説

本研究にあたり、我々は従来配送に使用される構造の直方体よりも衝撃軽減の観点で優秀な構造が存在するのではないかと考えた。

また、地面との衝突時に構造が回転することによって衝撃が複数の方向へ分散されるのではないかと考え、「構造の角の数が多くなるほど衝撃を軽減することができる」と仮説を設定した。

3. 衝撃値の定義

参考文献⁴⁾⁵⁾より、物体に加わる衝撃の大きさは加速度に由来する衝撃値(G)を用いて数値化できるとされている。加速度 a [m/s^2]で衝突した物体に加わる衝撃値は次のように表される。

$$G = 9.8 a \quad (\text{式1})$$

これは非SI単位系であるが、G値等の名称で重力の何倍の力が加わったかの指標として一般にも使用されている。

以降、本研究で衝撃値を使用する際には本定義による。

4.1 実験1

[目的]

仮説を検証するべく、従来配送に用いられる構造の直方体と多くの回転が期待できる正二十面体で構造間の衝撃値を比較する。

[使用物品]

- ・直方体(15 cm * 10 cm * 7.2 cm, 139.0 g)
 - ・正二十面体(一辺 10 cm, 139.9 g)
- ※上記2種の構造は素材に段ボールを使用した
- ・テープ
 - ・タコ糸
 - ・加速度計

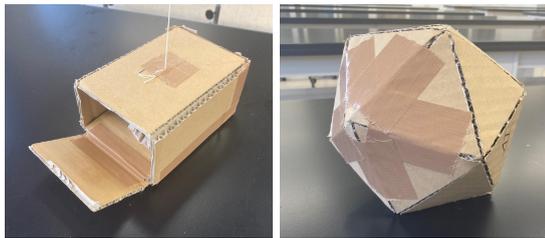


図2 使用した直方体(左)と正二十面体(右)

[実験手順]

各構造の内部に加速度計を固定し、基準とした高さ(5.0 m)から投下する。

その後、衝突時の加速度から(式1)を用いて衝撃値を算出する。

同様に、各構造につき10回測定を行う。

各回の衝撃を比較する際には推移の中で衝撃値が最大となった点を使用した。

加速度計としてケニス社のPocket Lab⁶⁾を使用し、x軸、y軸、z軸の3軸合成値を用いて加速度を測定した。

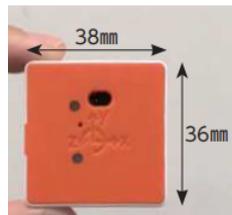


図3 Pocket Lab⁶⁾

[実験環境]

高さ: 5.0 m, 床材: コンクリート

構造を糸で吊るしてから鉛直下向きに投下し、空中での回転を制御する。

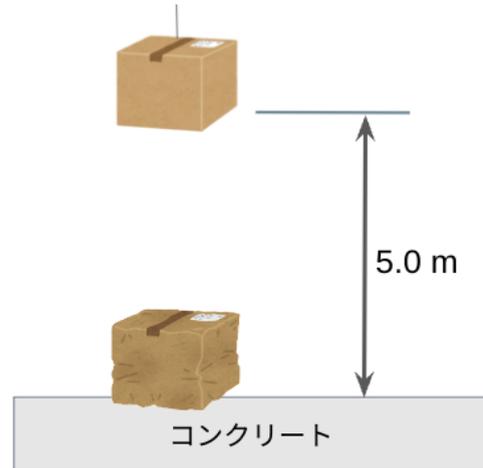


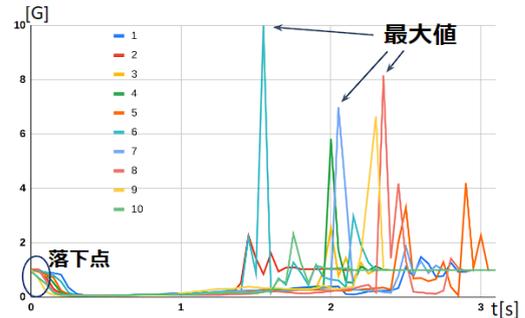
図4 実験環境・手順のイメージ

4.2 結果

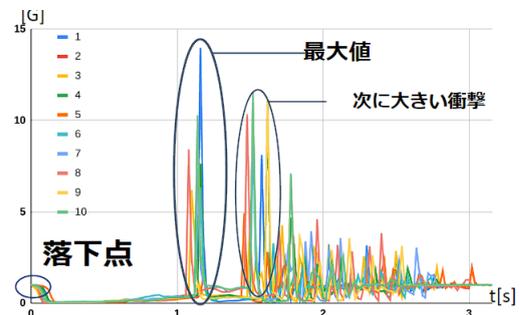
投下時の衝撃値の推移を示すグラフ1,2 各種数値を示す表1 が得られた。

グラフでは色を用いて各回の結果を区別した。

縦軸: 衝撃値[G] 横軸: 時間[s]



グラフ1 直方体投下時の衝撃値の推移



グラフ2 正二十面体投下時の衝撃値の推移

表1 実験1での構造ごとの各種数値

	直方体	正二十面体
最大衝撃値(G)	9.00	12.98
平均衝撃値(G)	4.26	8.98
平均速度(m/s)	5.89	8.41
直方体を基準とした理論値(G) (基準値)	4.26	8.68

4.3 考察

グラフ2に見られるように、仮説通り正二十面体で多くの回転が発生したが、想定と反対に正二十面体の場合での衝撃が大きくなった。

また構造ごとに加わるエネルギーの大きさを比較するべく、運動エネルギー方程式(式2)を用いて速度の差を補正した。

質量 m [g], で速度 v [m/s]である物体に加わる運動エネルギー K について、次のように表される。

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \text{ (式2)}$$

また、本実験では運動エネルギー方程式を用いるにあたり、直方体と正二十面体の質量は同一とした。

直方体を基準として、速度の差を補正した正二十面体での理論値を算出したところ、直方体の方が衝撃を軽減した結果が得られた。

以上より、仮説「構造の角が多くなるほど衝撃を軽減することができる」は間違っていたと考えられる。

5.1 実験2

[目的]

構造間の速度を統一するべく、パラシュートを取り付けた状態で衝撃値を測定する。

また、構造による傾向を探ることを目的として直方体、正八面体、正二十面体の3種の構造を使用する。

[使用物品]

- ・直方体(15 cm * 10 cm * 7.2 cm, 139.0 g)
- ・正二十面体(一辺 10.0 cm, 139.9 g)
- ・正八面体(一辺 9.0 cm, 140.0 g)
- ・パラシュート(半径 15.0 cm)

※3種の構造は段ボール、パラシュートは発泡スチロールを素材とした。

- ・テープ
- ・タコ糸
- ・加速度計



図5 正八面体(左)とパラシュート(右)

[実験手順]

実験1と同様の手順で行った。

[実験環境]

高さ:5.0 m, 床材:コンクリート

構造上部にパラシュートを取り付けた状態で鉛直下向きに落下させる。

5.2 結果

各構造での10回投下した際の衝撃値の平均と平均速度を示す表2 が得られた。

表2 実験2での構造ごとの各種数値

	直方体	正二十面体	正八面体
平均衝撃値(G)	7.73	8.54	11.33
平均速度(m/s)	5.49	4.97	4.91

5.3 考察

パラシュートの使用により、構造間の速度差が大きく減少した。しかし、依然として直方体で最も衝撃が少ない結果となった。

そこで、各構造の辺の長さに着目したところ、各辺の長さや衝撃の大きさのどちらも、

直方体 > 正二十面体 > 正八面体

となっていることに気が付いた。

辺の長さが衝撃軽減に関与していると仮定して文献を調べたところ、「剛性」が深く関わっているのではないかと考えた。

6. 剛性

剛性とは、ある力が物体に加わった際に、どれ程構造が変形しづらいかを示す値である。⁷⁾

また特徴として、物体の両端が固定されている場合、物体の辺が短いと剛性は高くなり、辺が長いと剛性は低くなる。

実験2を例示すると、辺の長さは

直方体 > 正二十面体 > 正八面体

であり、剛性の大きさは

正八面体 > 正二十面体 > 直方体

となる。

そのため、直方体が多く衝撃を軽減する原因として、他の構造にくらべて剛性が低く、地面との衝突時に辺が変形しやすいことが挙げられる。

7. 仮説

以上の実験を通し、

・直方体が正八面体、正二十面体よりも多くの衝撃を軽減した

・直方体は他2種の構造よりも剛性が低く、弾性変形が起こりやすい

上記の2点が判明した。そのため、我々は落下時の衝撃に強い構造の仮説として、

「構造の辺の長さが長くなるほど、より多くの衝撃を軽減できる」のではないかと考えた。

8. 結論

本研究は落下時の衝撃を軽減する事のできる構造の探求を目的として行った。

落下時の衝撃を衝撃値(G)を用いて計測し、複数の構造間での衝撃を比較した。

剛性による辺の弾性変形が衝撃軽減に関連しているのではないかと考え、仮説「構造の辺の長さが長くなるほど、より多くの衝撃を軽減できる」を立てた。

9. 謝辞

本研究にあたり、物理担当の先生方や京都工芸繊維大学 ロボティクス研究室 澤田祐一教授、東善之助教をはじめ多くの方にご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

10. 参考文献 [令和5年6月13日時点参照]

1) ZipLine社ホームページ、

<https://www.flyzipline.com>

2) 「日本郵政株式会社2023年にドローン配達を実用化」、ITmedia, 2022.12.6

3) 「ドローン宅配の米CEO「日本は有望市場」」、日本産経新聞, 2023.4.28

4) 斎藤勝彦, 久保雅義, 劉剛, 宅急便で輸送される荷物が受ける衝撃力の実態, 日本包装学会, Vol.7 No.1, 1998,

<https://www.spstj.jp/publication/thesis/vol7/Vol7No1-2.pdf>

5) 衝撃の強さは加速度(衝撃値:G)で表せる, 神戸大学 海事科学研究科,

https://www.research.kobe-u.ac.jp/gmsc-t-pack/cp/cushioning_pack_03.html

6) PocketLab, ケニス株式会社,

<https://archive.thepocketlab.com/japan/>

7) 剛性, 機械工学辞典, 日本機械学会,

<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/07:1003968>