特集 4

大学入試問題を実験する教材　終端速度

株式会社島津理化　松本　崇

1. はじめに

終端速度とは，重力によって落下する物体が空気や液体から受ける抵抗力のために，それ以上速度が増加しなくなった状態の速度を指す。私たちは雨粒が一定以上速くならないことや，パラシュート降下の際に速度が安定することを経験的に知っているが，この現象の理解には長い科学史が存在する。

古代ギリシャの哲学者アリストテレスは，重い物体ほど速く落下すると考えた。当時は体系的な実験がほとんど行われておらず，自然観察と論理的推論が中心であった。そのため，落下運動そのものについても正確な理解は得られていなかった。しかし，空気中を運動する物体が何らかの影響を受けるという考えは後の研究の出発点となった。

16 世紀末から 17 世紀初頭にかけて，イタリアの科学者ガリレオ･ガリレイが登場する。ガリレオは落体運動を実験によって研究し，物体の質量に関係なく同じ加速度で落下することを示したとされる。ピサの斜塔からの落下実験の逸話は有名であるが，実際には斜面を利用した精密な実験が重要であった。ガリレオは空気抵抗が無視できる場合には落下速度が時間とともに増加することを示し，近代力学の基礎を築いた。

ガリレオの研究は，空気抵抗という要素を分離して考える契機となった。もし空気抵抗が存在しなければ，理論上は速度は増加し続ける。しかし現実には速度がある程度以上になると抵抗力も増大する。この問題を理論的に整理したのが 17 世紀後半のアイザック･ニュートンである。ニュートンは運動の法則を確立し，物体に働く力のつり合いによって運動を説明した。

ニュートン力学では，落下する物体には重力が下向きに働き，空気抵抗は上向きに働く。落下開始直後は重力が優勢であるため加速するが，速度が増加するにつれて抵抗力も大きくなる。やがて重力と抵抗力が等しくなると加速度はゼロとなり，一定速度で落下する。この速度が終端速度である。終端速度の概念はニュートン力学によって初めて明確な理論的意味を持つようになった。

18 世紀になると流体力学の研究が進展した。ダニエル･ベルヌーイは流体の圧力と速度の関係を解明し，流れる空気や水の性質を数式で表現した。さらにレオンハルト･オイラーは流体運動の基礎方程式を導き，空気抵抗の解析に大きな貢献を行った。これらの研究は終端速度を定量的に扱うための重要な基盤となった。

19 世紀にはイギリスの物理学者ジョージ･ガブリエル･ストークスが小さな球体が粘性流体中を運動する際の抵抗力を理論化した。いわゆるストークスの法則である。微小な粒子では抵抗力が速度に比例することが示され，液体中を落下する粒子の終端速度が計算できるようになった。この成果はコロイド研究や粒子測定技術に大きな影響を与えた。

また，19 世紀末から 20 世紀初頭にかけては，落下する小球を利用した実験が数多く行われた。代表例としてロバート･ミリカンの油滴実験が挙げられる。ミリカンは空気中を運動する微小な油滴の終端速度を精密に測定し，その結果から電子の電気量を求めた。この研究はノーベル賞につながり，終端速度の概念が単なる落下現象の説明にとどまらず，原子物理学の発展にも貢献したことを示している。

20 世紀には航空工学の発展によって空気抵抗の研究が飛躍的に進歩した。風洞実験が各国で行われ，飛行機やロケットの設計に終端速度や抗力係数の考え方が取り入れられた。第二次世界大戦以降には高高度からの降下実験も実施され，人間が到達できる終端速度の研究が進められた。パラシュートの設計にも終端速度の知識が不可欠となった。

現代では，終端速度は高校の物理から大学の流体力学まで幅広く学習される重要な概念である。気象学では雨滴や雪片の落下速度の解析に利用され，環境科学では大気中の粒子拡散の研究に応用されている。また，生物学においても植物の種子がどのように遠くへ運ばれるかを理解する際に終端速度が活用される。

このように終端速度の研究は，アリストテレスの

自然哲学から始まり，ガリレオの実験，ニュートンの力学，ベルヌーイやオイラーの流体力学，ストークスの理論，ミリカンの精密実験を経て発展してきた。終端速度は単なる落下速度の限界ではなく，力と運動，流体との相互作用を理解するための重要な概念であり，現在も航空宇宙工学や環境科学など多くの分野で活用されている。科学史を振り返ると，終端速度の理解は実験と理論の積み重ねによって築かれた典型的な例であり，物理学の発展そのものを象徴するテーマの一つといえる。

2. 大学入試問題に終端速度が取り上げられる理由

終端速度が大学入試問題で頻繁に取り上げられる理由は，単なる速度計算の題材ではなく，物理学の基本原理を総合的に評価できる題材だからである。大学入試は知識の暗記量だけではなく，現象を論理的に理解し，それを数式やグラフによって説明する能力を測定することを目的としている。終端速度はその目的に適した特徴を備えている。

第一に，終端速度はニュートン力学の根幹である「力と運動の関係」を評価しやすい。落下する物体には重力と空気抵抗が作用し，速度の増加とともに抵抗力も大きくなる。最終的に両者がつり合うと加速度はゼロとなるが，速度はゼロではなく一定値を保つ。この現象を理解するには，速度と加速度の違いを正確に把握する必要がある。大学入試では受験生が本質を理解しているかを見極めるうえで有効な題材となる。

第二に，終端速度は高校物理と大学物理をつなぐ役割を果たしている。大学では微分方程式を用いて運動方程式を解くが，高校段階では数式そのものよりも現象の変化を考察することが重視される。終端速度の問題を通じて，速度の増加に伴い加速度が小さくなっていく過程を理解することは，大学で学ぶより高度な力学への導入となる。

第三に，現実社会との関連性が高い。雨粒や雪片，綿毛の落下，パラシュート降下，航空機設計など，多くの自然現象や工学的応用が終端速度と関係している。大学入試問題では身近な現象を題材にすることで，受験生が物理法則を実際の世界に結び付けて理解しているかを測定できる。

第四に，グラフを用いた思考問題を作りやすい点も重要である。速度と時間，加速度と時間，抵抗力と速度などの関係を図示することで，単なる計算ではなく論理的な解釈力を評価できる。近年の大学入試や大学入学共通テストでは，思考力や判断力を重視する傾向が強まっており，終端速度はその出題方針とよく一致している。

第五に，エネルギーの考え方まで発展させることができる。空気抵抗が無視できる場合には力学的エネルギー保存則が成り立つが，終端速度の問題では一部のエネルギーが熱や乱流として失われる。そのため受験生は，理想的な条件と現実の条件の違いを学ぶことができる。

以上のように，終端速度は力学，エネルギー，グラフ解析，現象理解を一つの問題で総合的に評価できる題材である。大学入試で継続的に出題される背景には，学力の本質を測定しやすいという教育的価値が存在すると考えられる。特に思考力･判断力･表現力を重視する現代の入試制度において，終端速度は極めて優れた出題テーマの一つである。

3. 動画解析の実験利用

落下運動の実験は，物理教育において最も基本的かつ重要な実験の一つである。従来の高校物理や大学初年次教育では，落下する物体の速度や加速度を測定するために記録タイマーと記録テープが広く使用されてきた。記録タイマーは一定時間ごとにテープへ打点を記録する装置であり，生徒は打点間隔から速度を求め，さらに速度変化から加速度を算出していた。この方法は長年にわたり効果的な教育手法として利用されてきたが，専用機器や消耗品が必要であり，データの読み取りに時間を要するという課題もあった。

近年ではスマートフォンやタブレット端末の高性能化により，これらの機器を活用して同様の実験を実施できるようになっている。現在のスマートフォンは毎秒 60 フレームから 240 フレーム以上の高速度撮影が可能であり，落下する物体の位置変化を詳細に記録できる。単純な実験では，一定の高さから球体などを落下させ，その様子を動画として撮影する。撮影した映像を画像解析ソフトや動画解析アプリで分析することで，時刻ごとの位置データを取得できる。解析ソフト上で落下する物体をフレームごとに追跡すると，時間と位置の関係を数値データと

して取り出すことができる。得られたデータから速度や加速度を計算しグラフを作成することで，記録タイマーを用いた場合と同様の考察が可能となる。

例えば，位置と時間の関係をグラフ化すると放物線状の変化が観察される。さらに速度と時間の関係を求めると，空気抵抗が小さい範囲では速度がほぼ直線的に増加していくことが確認できる。また，落下距離を十分にとり，質量が小さい物体を落下させることで，加速度が変化する様子や終端速度に近づく傾向を観察することも可能である。

スマートフォンやタブレットを活用する利点は多い。撮影した映像を繰り返し確認できるため，生徒は現象を視覚的に理解しやすい。また，取得したデータを表計算ソフトへ取り込み，近似曲線や回帰分析を行うなど，データサイエンス的な学習へ発展させることもできる。

さらに動画解析では，記録タイマーでは難しかった多様な実験への応用が可能である。自由落下運動だけでなく，斜方投射，単振動，衝突実験，振り子運動なども同じ手法で解析できる。

一方で注意点も存在する。撮影時にはカメラを固定し，スケールとなる定規などを画面内に配置しなければならない。また，撮影方向による誤差やレンズの歪み，フレームレートによる時間分解能の限界なども考慮する必要がある。しかし，これらの誤差要因を検討すること自体が科学的な考察能力を育成する機会となる。

このように，スマートフォンやタブレットを利用した動画撮影と画像解析は，デジタル機器ならではの視覚性やデータ処理能力を活用することで，物理現象の理解を深めるとともに，現代社会で求められるデータ活用能力の育成にもつながる。今後の理科教育においては，従来手法の長所を生かしながら，動画解析を組み合わせた実験がますます重要になると考えられる。

4. 大学入試問題に登場した「終端速度」

令和 5 年度大学入学共通テスト「物理」第 2 問では，身近な素材であるアルミカップ（弁当のおかず容器として広く利用されている薄肉アルミ製容器）（図 1）の落下運動を題材として，空気抵抗と終端速度の概念を理解しているかを問う問題が出題された。問題では，同じ形状のアルミカップを 1 枚から 5 枚まで重ね，一定の高さから落下させた際の運動データが示された。受験者は，落下距離を 20cm ごとに区切った各区間の通過時間を比較しながら，質量が増加した場合の運動の変化を読み取ることが求められた。アルミカップの枚数を増やすと質量が増加する一方で，空気抵抗を受ける面積はほぼ変化しないため，重力に対する空気抵抗の相対的な影響がどのように変化するか，また終端速度がどのように変化するかを考察する内容となっている。単なる計算問題ではなく，表や実験結果を基に法則性を導き出す思考力が重視されており，観察結果から力のつり合い，加速度の変化，終端速度の成立条件を総合的に判断する力を評価する出題であった。また，日常生活の材料を用いた実験を題材とすることで，物理法則を現実の現象と関連付けて理解する力も求められた。

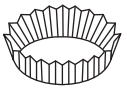


図 1　アルミカップ

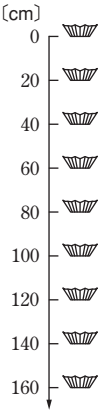


表 1　20cm の落下に要する時間〔s〕

区間〔cm〕＼枚数 n	1	2	3	4	5
0~20	0.29	0.25	0.23	0.22	0.22
20~40	0.23	0.16	0.14	0.12	0.12
40~60	0.23	0.16	0.13	0.12	0.11
60~80	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10
80~100	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10
100~120	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10
120~140	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10
140~160	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10

図 2　アルミカップの落下

5. 教材製作

今回，令和 5 年度大学入学共通テスト「物理」第 2 問で出題されたアルミカップの落下運動を題材として，実際に終端速度に関する実験を実施した。実験では，アルミカップを複数枚重ねて落下させ，その様子をスマートフォンで動画撮影した後，無料の動画解析アプリ「Tracking Analysis for Physics」（図 3）を用いて運動解析を行った。その結果，問題中に示された傾向と整合するデータを取得することができ，アルミカップの質量増加に伴う終端速度の変化や空気抵抗の影響を実験的に確認することができた。

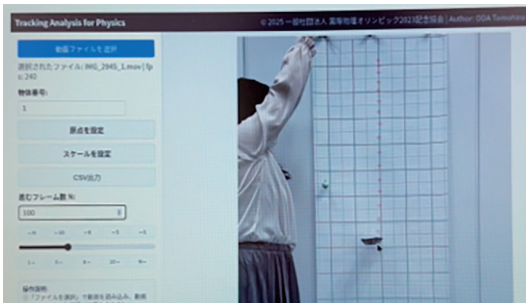


図３　画像解析アプリ Tracking Analysis for Physics

本実験において特に有効であったのが，アルミカップの背後に設置した方眼スクリーンである。動画解析では，撮影した映像上の長さを実際の長さへ換算するために基準となる尺度が必要となる。しかし，一般的な実験では定規やメジャーを画面内に設置するだけでは測定範囲が限定され，動画内の位置によって誤差が生じやすいという課題がある。また，落下運動のように移動距離が大きい実験では，映像全体に基準長さが存在しないため解析精度が低下する場合がある。

そのため，新たに動画解析に適した方眼スクリーン「動画解析スクリーン」を製作し，教材として製品化した。素材にターポリンを採用し，破れにくく，また，紙の様に巻きグセがつかないため，縦向きでも横向きでも，実験台の上に敷いて使っても良い。



図４　動画解析スクリーン

この動画解析スクリーンは，全面に一定間隔の方眼が印刷されているため，撮影映像全体に共通した長さの基準を設定することができる。特に 10 cm ごとの格子は，動画解析ソフトによるスケール校正を容易にし，落下位置の読み取り精度向上に大きく寄与する。また，物体の移動量を視覚的に確認しやすいため，生徒が動画を見ながら運動の様子を理解するうえでも有効であった。

さらに，動画解析スクリーンは位置座標の取得だけでなく，撮影時の視差やカメラ角度のずれを確認する目安としても活用できる。撮影条件が適切であるかを容易に判断できるため，実験データの信頼性向上にもつながる。従来の記録タイマーを用いた実験では，打点間隔の測定に多くの時間を要していたが，動画解析スクリーンを利用したデジタル実験では，撮影後すぐに位置データを取得でき，グラフ作成や考察へと学習活動を発展させることができる。

6. おわりに

３号に渡り寄稿してきた大学入試問題を実験する取り組みは，企画･開発を一般社団法人国際物理オリンピック 2023 記念協会，設計製造･販売を島津理化が担うプロジェクトである。この取り組みは「Physics Exam Lab 物理入試ラボシリーズ®」[7]とし，先生と生徒がともに“確かめる物理”を体験できる場をつくることを目的としている。

高校理科の授業においても，実際に手を動かし，目の前で起こる変化に驚き，失敗や成功を体験することには，代えがたい価値がある。自分の体験を通して得た感覚や気づきは，単なる情報としての知識とは異なり，深い理解や探究心を育てる土台となる。

AI がどれほど進歩しても，現実の世界に触れ，そこから学び取る経験は人間にしかできない。実験を通じて得られる感動や発見は，生徒たちが主体的に学び続ける力を育み，AI 時代に求められる創造性や問題発見能力を支える大切な基盤となるはずである。

理科教員のための実験共創コミュニティ“しまづりか実験広場”稼働中

参考文献

1) 令和５年度大学入学共通テスト「物理」 第２問
2) R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*
3) D. Halliday, R. Resnick, *Fundamentals of Physics*
4) J. Walker, *Physics*
5) 小出昭一郎『物理学』
6) 今井功『流体力学』
7) 一般社団法人国際物理オリンピック 2023 記念協会
Physics Exam Lab
物理入試ラボシリーズ®