超高速の世界を映し出すハイスピードカメラ

キース・テイラー、ワイ・チャン

超高速カメラのトリガー方式である統合型速度トラップは、弾丸の到達時間を戦略的に配置した２つのトリガーから自動的に計算し、超高速衝撃を捕捉する。

コリンズ英語辞書では、「超高速（hypervelocity）とは3000m/sの非常に高い速度」と定義されている。超高速衝突の影響は宇宙探査や宇宙軍事分野において特に懸念されており、宇宙船やミサイルの部品に軽微な損傷を与えたり、完全に破壊したりする可能性がある。衝突物および衝突面では一時的な液化または気化が起き、空力特性を損なう可能性がある。固体衝突物では、衝突過程においてプラズマ放電が発生し、宇宙船の電子機器に干渉する可能性がある。

超高速衝突の影響を研究することは、宇宙船やミサイルの安全な構造技術の開発に不可欠だ。しかし、制御された環境内で再現性のある現象を発生させることは決して容易ではない。

超高速衝突の研究の多くは、実験室ベースで行われている。米サウスウェスト研究所（Southwest Research Institute）のライトガスガンのようなものを使用して、3000m/sを超える速度まで粒子を加速させる（**図1**）。典型的なライトガスガンのセットアップでは、弾丸は長い滑らかな筒状の管内で加速される。弾丸は、砲身内での保護を目的にサボットという包装材で包まれていることもある。砲口から発射される際にサボットは分離し、弾丸は衝突点まで進むことができる。標的と衝突するとプラズマが噴出し、弾丸と標的の素材からなる塵と破片の雲が生じる。標的の反対側で素材が剥離することもある。

超高速衝突の基礎的なダイナミクスを研究するためのイベントウィンドウは、数百ナノ秒から100マイクロ秒にわたることがある。短時間スケールでは衝突によって生じるプラズマなどの

図1　サウスウェスト研究所のライドガスガン（サウスウェスト研究所提供）

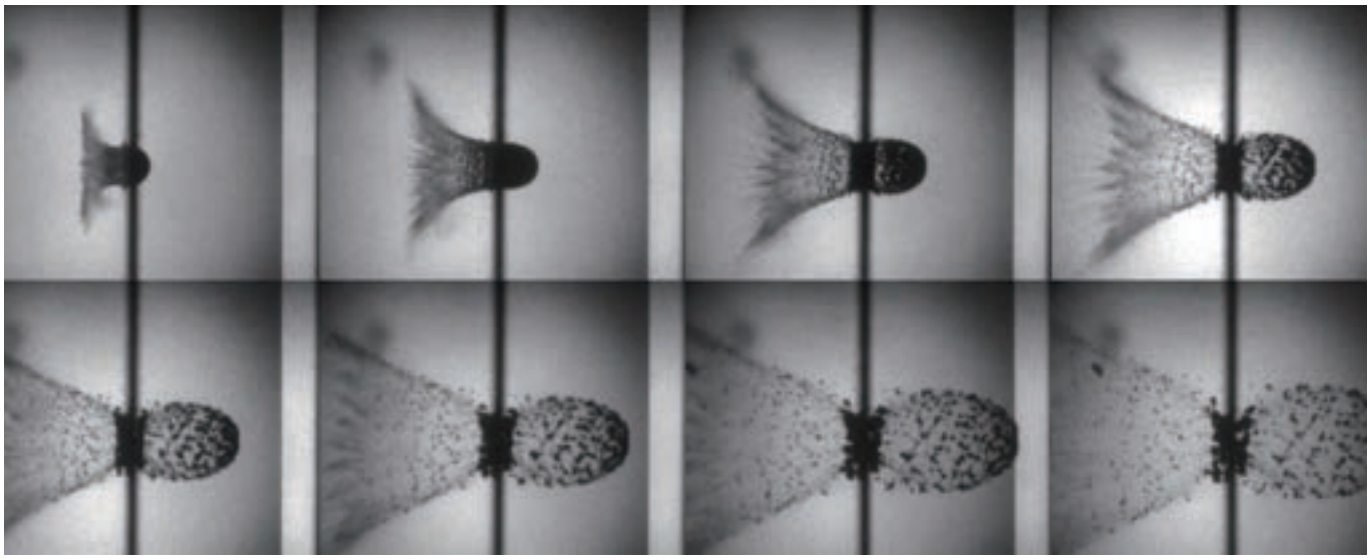

図2　2mmのアルミニウム粒子が傾斜した金属板に衝突した際の衝撃と、その結果生じる破片雲。弾丸の速度は2500m/s（仏ティオ・アンジュニエリ社提供）

現象を調べ、長時間イベントでは破片雲、衝突による剥離、衝突中および衝突後の構造的安全性を研究する。

超高速カメラ

高速イメージングアプリケーションでは、タイミングがすべてである。衝突体の移動速度が5km/sの場合、瞬きする間に5m移動する。この速度の場合、2mmの小さな弾丸なら4マイクロ秒以内に自身の直径分を移動する。移動物体を撮影する際、ぼやけた画像を避けるには露光時間を十分に短くし、対象物の動きを最終画像の1ピクセル未満に抑える必要がある。

例えば、画像の幅は1000ピクセルで視野が10cmの場合、各ピクセルの幅は100μm（0.1mm）になる。2mmの弾丸が5km/sで移動する場合、1ピクセルを200ナノ秒で通過する（**図2**）。この動きを静止画にするには1秒あたり最低500万枚のフレームレートが要求される。現代の最も高速なハイスピードカメラでも不可能であり、このような結果を得るには特殊なカメラが必要である。

英スペシャライズド・イメージング社（Specialised Imaging）は研究者と緊密に連携して、このようなイメージングスピードを目的にした超高速カメラ

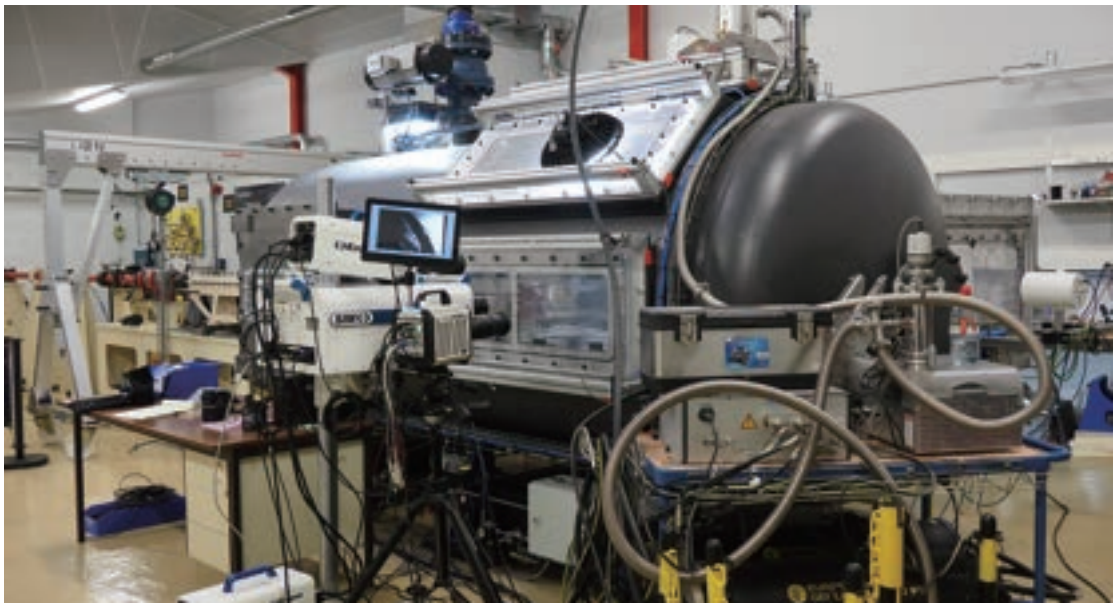

図3　超高速カメラを搭載した超高速衝撃実験（ティオ・アンジュニエリ社提供）

の開発を進めている。現代のフレーミングカメラでは1秒あたり最大10億フレームの速度で画像を撮影できるが、撮影可能な画素数が限られているという重大な欠点がある（カメラの種類にもよるが通常は8から180）。画素数が限られることによる最も大きな問題は、トリガーのタイミングが極めて重要になる点だ。トリガーを1マイクロ秒見逃すと、毎秒1億フレームの速度では100フレームが失われる。最も高速な撮影速度では10mのケーブルがトリガーを最大50フレーム分遅延させるため、配線の長さも考慮しなければならない。

こうしたことは、最新の超高速カメラに組み込まれた高度なトリガー機能を活用する、我々の超高速研究者にとって日常的な業務の一環である（**図3**）。統合型速度トラップなどの機能により、戦略的に配置された2つのトリガーから、弾丸が標的に到達する時間を自動的に計算する。

弾丸と衝突のイメージング

2つのトリガー間の距離とカメラの視野角を把握することで、弾丸が視野内に到達する前に実際の速度を測定して遅延を再計算できる。レーザダイオードとフォトダイオードのペアのような高精度なトリガーをガスガン実験に組み込むことですべての弾丸を検出でき、発射を見逃すことはない。トリガーが1つではライトガスガンの発射機からの速度の自然な変動を考慮できず、タイミングが大幅にずれてイベントを完全に逃す可能性がある。

近年の超高速研究の例として、米スティーブンス工科大（Stevens Institute of Technology）とサウスウェスト研究所による研究が挙げられる。この研究では、スペシャライズド・イメージング社のKirana超高速ビデオカメラを使用し、液体と固体の衝突が超音速航空宇宙機体に及ぼす影響を調査した。

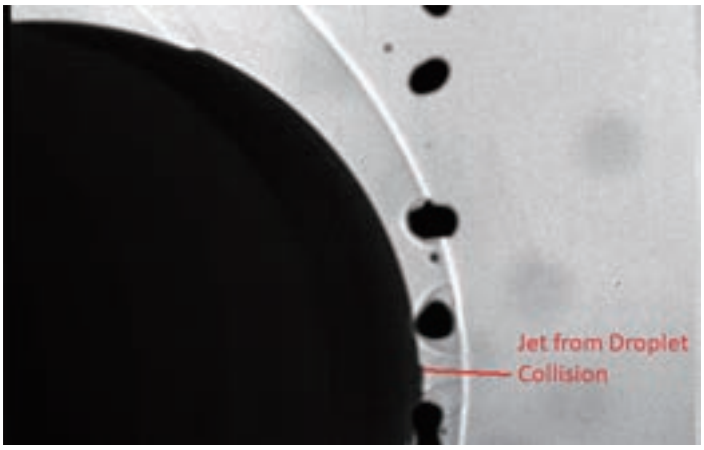

図4　超高速弾丸が液滴の流束と相互作用するシャドウグラフ画像

超高速で待機中を移動する物体は、待機中に浮遊する塵の粒子や液滴によって容易に損傷を受ける可能性がある。単に塵の粒子や液滴を材料の試料に当てるだけでは、これらの相互作用の理解に有用であるとは限らない。そもそも、場合によっては不可能かもしれない。そこで研究者は、液滴の軌道を移動する超音速物体の影響を研究し、現実の気象現象をシミュレートするための実験を考案した。

高速衝突時に材料に与える損傷の程度を決定するのは衝撃を与える液滴のサイズと形状であるため、その破裂挙動の正確な特徴づけが重要である。スティーブンス工科大の研究チームによる実験手法では、ライトガスガン施設においてさまざまな材料を高速に加速し、液滴を注入し、高度な診断技術とカメラシステムを用いて相互作用を研究した。

毎秒500万フレームのKirana超高速ビデオカメラを用いて、低圧窒素媒体内を2.4km/sの速度で移動する弾丸と液滴の流束との相互作用を撮影した。画像のキャプチャにはレーザ逆光シャドウグラフ法が用いられた（**図4**）。シャドウグラフは、物体が通過する際に大気が圧縮されることで光が屈折するため、衝撃波を可視化できる。レンズ効果により、密な圧縮ガスが明るい領域と暗い領域が視野内に現れ、衝撃波を極めて明確に示す。

この実験の結果、境界の剥離も含めた液滴の破裂現象、液滴と弾丸の衝突点からの液体の噴出、その他の多相超音速流動現象が相互作用中に発生したことが示された。

現在、超高速領域における現象を観察し、宇宙船や衛星の打ち上げ成功を妨げる可能性のある現象を研究することが可能になっている。これは、超高速カメラシステム、照明、発射システムの長年にわたる開発を基盤として実現したものだ。多様な分野の科学者やエンジニアの専門知識を要するが、時には目に見えない現象を可視化して、これらのツールと技術が世界をより安全な場所とすることに貢献している。

著者紹介
キース・テイラー（Keith Taylor）とワイ・チャン（Wai Chan）は英スペシャライズド・イメージング社（Specialised Imaging）のディレクター。
e-mail:wai@specialised-imaging.com　https://specialised-imaging.com

LFWJ