

圧電素子を用いたリアルタイムひずみ計測による小型飛翔物の衝突検知・判別システムの開発

早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科
三宅 章太

1. イントロダクション

バードストライクに代表される小型飛翔体の衝突は、現在でも世界各地で報告されており[1]、モビリティの安全性において重要な課題である。小型飛翔体が衝突した際、衝突物の種類や衝突位置を即座に識別し、機械システムが適切な応答を行うことができれば、重大事故の防止につながる可能性がある。そのため、多くのモビリティの外装部材として用いられる薄板構造物に対して、衝突物を解析する手法が求められている。

薄板に対する衝突物解析には、加速度センサ[2]、FBG センサ[3]、音響センサ[4]、圧電センサ[5][6]等が用いられている。従来研究では、複数センサによる衝突位置検出[7][8]や、単一センサによる衝撃力推定[9][6]が報告されている。一方で、加速度センサはセンサ重量による振動特性の変化[10]やモード節点で振幅が 0 となる問題[11]、FBG センサは温度とひずみの分離が困難であること[11]や装置が高額であること[12]、音響センサは騒音や反射音の影響[13]が課題である。これに対し、圧電センサは接着条件への依存や脆性による曲面取り付けの困難さはあるものの、小型軽量で構造物の振動特性への影響が小さく、板に発生する衝突振動を低コストで直接計測できる[14][15]。また、高周波振動の計測にも適しているため[16]、本研究では衝突現象の解析に圧電素子を用いる。

圧電素子を用いた構造物の振動解析は広く研究されており[17][18]、特に圧電体と構造体の連成を扱う有限要素解析や振動抑制に関する研究が進められてきた[19][20]。また、板のひずみと圧電素子の電荷出力の関係が定式化されたことで[21]、機械的モデルと圧電出力を結び付けた振動解析が可能となった。しかし、圧電素子を用いた従来の衝突解析は、主に衝突位置や衝突力の推定に焦点を当てている。そこで本研究では、衝突現象をより詳細に分析するため、衝突物そのものの判別に着目する。

本研究では、金属薄板に設置した単一の圧電素子から取得した振動信号を用いて、衝突物を判別するシステムを構築する。衝突物判別にはサポートベクターマシン (SVM) を用い、特徴量は衝突によって発生する板振動モデルに基づいて設計・選択する。実験では、直径 5, 10, 15 mm のゴム、ポリプロピレン (PP)、ステンレス球を厚さ 1 mm のステンレス板に衝突させ、圧電素子により取得した振動データから減衰特性および FFT 結果を比較した。さらに、得られたデータセットを用いて SVM による衝突物判別を行い、分類に支配的な特徴量を分析した。本研究により、従来の衝突位置や衝撃力の推定に加えて、衝突物の種類に関するより詳細な分析が可能となる。

2. 板の振動データの収集

2.1 データ収集方法

本研究で使用する実験装置を図 1 に示す。圧電素子 (FGT-15T-6.0A1W40, UNIVERSAL (CHANGZHOU) ELECTRONICS CO., LTD) は、厚さ 1 mm, 110 mm 四方の SUS304 製正方形金属板の中央に取り付けた。圧電素子の取り付けには、24 時間で完全硬化する 2 液混合エポキシ接着剤を用いた。接着剤を塗布した後、圧電素子を金属板表面に圧着し、24 時間静置して完全に硬化させた。金属板には、100 mm 四方の頂点 4 か所に固定用の穴が設けられており、M3 スチールねじおよびスチールスペーサーを用いた 4 点固定により実験装置に取り付けた。

衝突物には、ゴム、ポリプロピレン (PP), ステンレス (SUS304) の 3 種類の材質について、直径 5 mm, 10 mm, 15 mm の球を用いた。各衝突物は、球径と同じ内径を有するアクリルパイプ内に設置し、空気圧により加速して金属板に向けて射出した。アクリルパイプの軸線は金属板の中央を垂直に通過するように調整しており、衝突物は金属板の中央付近に衝突する。また、衝突速度を計測するため、アクリルパイプと金属板の間に速度計測装置を設置した。この装置は、衝突物の移動経路上に設けた 2 点の通過時間から速度を算出し、0.1 m/s の分解能で衝突速度を計測する。

圧電素子の出力電圧は、アンチエイリアスフィルタを備えたオシロスコープを用いて、サンプリング周波数 5 kHz で取得した。電圧信号は、3 V の立ち上がりを検出した時刻を基準として、その前後 100 ms の範囲を記録した。

データセットを構築するため、各材質および各球径について、衝突速度 5-15 m/s, 15-25 m/s, 25-35 m/s の 3 条件で、それぞれ 30 回以上のデータ取得を行った。ただし、球径および衝突速度が大きい条件では、衝突により金属板が大きく塑性変形し、繰り返し計測が困難となる可能性がある。そのため、このような条件ではデータ取得を行わなかった。

2.2 データ収集結果

取得を行った条件とデータ数を表 1 に示す。合計で 985 回の衝突のデータを取得した。PP と金属の球について、球径と速度が大きい条件では金属板が塑性変形してしまいデータ取得を行うことができなかった。また、各条件 30 回ちょうどのデータ数になっていない。これは、空気圧によって球を加速させているため球の衝突速度が安定しなかったためである。

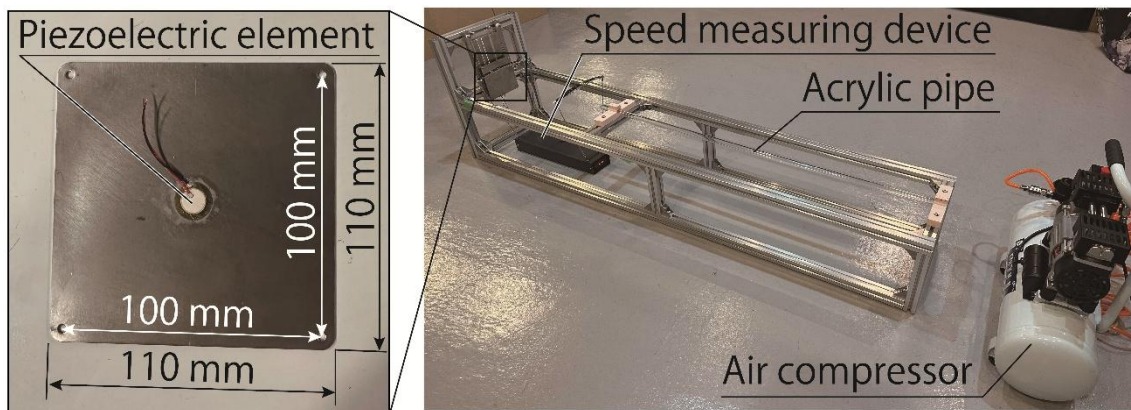


図 1 実験装置

表 1 データ収集結果

材質	直径 [mm]	10 m/s	20 m/s	30 m/s
ゴム	5	39	53	55
	10	62	68	70
	15	33	31	32
PP	5	33	38	41
	10	81	44	35
	15	31	—	—
金属	5	73	32	—
	10	61	40	—
	15	33	—	—

3. 衝突物判別

3.1 実験方法

本研究の衝突物分類は SVM を用いて行う。データ取得の実験結果には衝突物の材質、直径、速度を含むが、本研究の学習では利用しない。特徴量は、衝突時に圧電素子の出力電圧を波形データとして処理し、算出した。特徴量の数が多いと過学習される可能性があるため、適切に特徴量を選択する必要がある。しかし、すべての特徴量の組み合わせについて計算することは、計算量が膨大となるため現実的ではない。そこで、本研究では次の手順で特徴量を選択を行った。最初に、重要と考えられる特徴量を必ず使用しつつ、特徴量が一定以上となる場合について、ハイパーパラメータを固定し、スクリーニングを行う。その後、F1-score が上位の特徴量の組み合わせについて、求められた特徴量の組み合わせについてハイパーパラメータのチューニングを行った。

3.2 実験結果

最も F1-score が高くなった分類結果と、誤分類の結果について図 2 に示す。本実験では F1-score について、macro ave. は 0.9160, weighted ave. は 0.9187 と、高い分類性能が得られた。従って、本研究で用いた手法は安定した識別性能を有していることが確認された。クラス別に見ると、Rubber は Precision は 0.9408, Recall は 0.9408 と最も高い値を示しており、高精度な分類が可能であることがわかる。これは、Rubber が長い接触時間および大きな減衰特性を持つことで、他材質と異なる振動応答を示したためと考えられる。一方、Metal および PP は F1 スコアが Rubber と比較するとやや低い値となった。Metal は Recall が Precision より高く、本来 Metal であるデータ

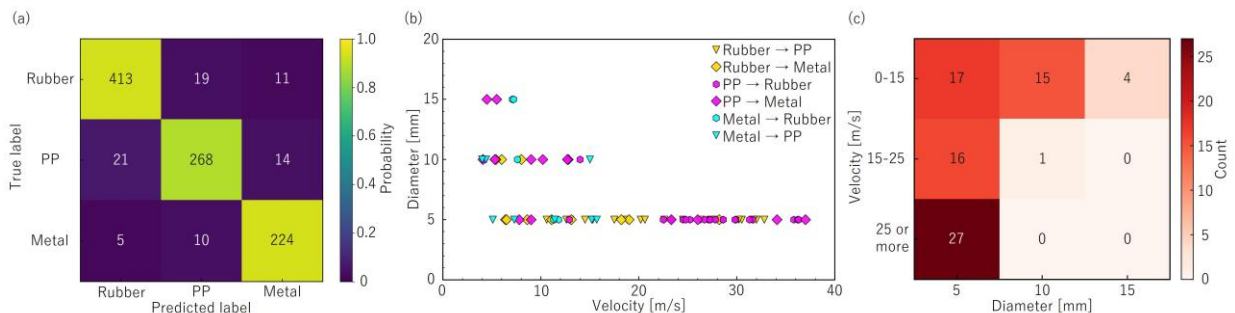


図 2 実験装置

は比較的正しく分類できている一方で、他クラスを Metal と誤分類している場合が存在することがわかる。これは、Metal 衝突時には接触時間が短く、高周波成分や高次モード励起が発生しやすいため、高速条件の PP などと部分的に類似した特徴空間を形成したためと考えられる。PP では Precision が 0.9024, Recall が 0.8845 となっており、本来 PP であるデータが他クラスへ誤分類される場合が多かった。図 5(a)を見ると、PP は Metal および Rubber の両方へ誤分類されており、特定クラスとのみ混同しているわけではないことが確認できる。これは、PP がヤング率や密度において Metal と Rubber の中間的性質を持つため、特徴量空間において両クラスと部分的に重なったためと考えられる。

縦軸に速度、横軸に直径を取り、誤分類されたパターンによってプロット形状を示したグラフを図 2(b)に示す。最も多い誤分類は直径 5 mm の PP が高速域で Rubber と判定されることであった。小径高速条件では接触時間が短くなることで入力スペクトルが広帯域化する一方、PP と Rubber を分離していた帯域エネルギー差や減衰差が相対的に小さくなったと考えられる。その結果、特徴量空間における PP と Rubber の重なりが増加し、Rubber への誤分類が増加したと考えられる。さらに、誤分類データについて縦軸に衝突物の直径、横軸に速度としたヒートマップを図 2(c)に示す。この結果から、特に直径 5 mm の速度の速いデータについて誤分類が多いことがわかる。これは、衝突時の接触時間が短くなることで信号が高周波成分に支配され、材料固有の減衰特性や弾性特性が十分に現れないためと考えられる。その結果、異なる材料間で類似した信号が生成され、特徴量空間におけるクラス間の重なりが増加することにより識別が困難となり、誤分類が多く発生した。

4. まとめ

本研究では、金属薄板に設置した単一の圧電素子から取得した振動信号を用いて、衝突物の材質を分類する手法を提案した。実験では、SUS304 薄板に対して Rubber, PP, Metal の球体を衝突させ、圧電素子によって取得した振動データから特徴量を抽出し、衝突物を分類可能であることを確かめた。本研究では単一の圧電素子のみを用いたにも関わらず、高い分類性能が得られた。これは、圧電素子が局所的な接触変形のみを計測しているのではなく、衝突によって板全体に励起された複数の振動モードを重ね合わせとして観測しているためであると考えられる。その結果、接触時間や材料特性の違いがスペクトル構造や減衰特性として反映され、単一位置での計測であっても材質分類が可能となった。今後は、異なる板構造や境界条件に対する汎化性能の評価を行うとともに、複数センサへの拡張や時系列モデルを用いた解析を行うことで、より高精度かつ高汎用な衝突物分類システムの構築を目指す。また、本研究で提案した物理ベース特徴量設計を、他の振動診断や構造ヘルスマニタリング問題へ応用することも期待される。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年前期研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- [1] Aviation and Railway Accident Investigation Board, "Preliminary Report on the Accident of Jeju Air Flight 2216," 2025.
- [2] Nathan Dwek, et al., Frequency response function data of a composite plate under various damage identification scenarios, *Data in Brief*, vol. 59, 2025.
- [3] A. Rezayat, et al., Reconstruction of impacts on a composite plate using fiber Bragg gratings (FBG) and inverse methods, *Composite Structures*, Volume 149, 2016.
- [4] Georg Karl Kocur, et al., Acoustic source localization by deep-learning attention-based modulation of microphone array data, vol. 148, 2024.
- [5] Ioannis Katsidimas, et al., Impact Events for Structural Health Monitoring of a Plastic Thin Plate, arXiv:2209.10018, 2022.
- [6] Jianli Liu, et al., A Study on Impact Force Detection Method Based on Piezoelectric Sensing, *Sensors*, vol 22(14), 2022.
- [7] Shengsheng Huan, et al., Low Velocity Impact Monitoring of Composite Tubes Based on FBG Sensors, *Sensors*, vol. 24(4), 2024.
- [8] Michael Tracy et al., Identifying Impacts in Composite Plates with Piezoelectric Strain Sensors, Part II: Experiment, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Volume 9, Issue 11, 1998.
- [9] Li Zhang, et al., An efficient impact force identification methodology via a single sensor utilizing the concept of generalized transmissibility, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 211, 2024.
- [10] O. Özşahin, et al., Analysis and compensation of mass loading effect of accelerometers on tool point FRF measurements for chatter stability predictions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 50, Issue 6, June 2010.
- [11] Avitabile, P., *Experimental Modal Analysis – A Simple Non-Mathematical Presentation*, Sound and Vibration Magazine, University of Massachusetts Lowell, 2001.
- [12] Camilo A R Díaz, et al., Low-Cost Interrogation Technique for Dynamic Measurements with FBG-Based Devices, *Sensors (Basel)*, vol. 17(10), 2017.
- [13] Allison M. King, et al., Impact localization on a metal plate using matched field processing and a microphone array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 157, 2025.
- [14] Mira Mitra, et al., Guided wave based structural health monitoring: A review, *Smart Materials and Structures*, Volume 25, Number 5, 2016.
- [15] Bin Lin, et al., Review of in situ fabrication methods of piezoelectric wafer active sensor for sensing and actuation applications, *Proc. SPIE 5765, Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2005.
- [16] Jiachao Xu, et al., High-Frequency Vibration Analysis of Piezoelectric Array Sensor under Lateral-Field-Excitation Based on Crystals with 3 m Point Group, *Sensors*, 22(9), 2022.
- [17] Edward F. Crawley and Javier de Luis, Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, 1987.

- [18] Clinton Y. K. Chee, et al., A Review on the Modelling of Piezoelectric Sensors and Actuators Incorporated in Intelligent Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Volume 9, Issue 1, 1998.
- [19] H.S. Tzou and C.I. Tseng, Distributed piezoelectric sensor/actuator design for dynamic measurement/control of distributed parameter systems: A piezoelectric finite element approach, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 138, 1990.
- [20] Shih-Chuan Her and Han-Yung Chen, Vibration Excitation and Suppression of a Composite Laminate Plate Using Piezoelectric Actuators, *Materials*, Volume 15, 2022.
- [21] Sirohi J and Chopra I., Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000.