

AE センシングによるインキ別ボールペン書き味評価

長谷 亜蘭

埼玉工業大学工学部機械工学科

alan_hase@sit.ac.jp

Evaluation of Writing Performance for Different Types of Ballpoint Pen Ink by AE Sensing

Alan HASE

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

During contact, deformation, and fracture of surface asperities between the friction surfaces of materials, acoustic emission (AE) waves are generated as the strain energy is released. By detecting the AE waves during friction using an AE sensor, the state of friction, wear, and lubrication between the friction surfaces can be measured and evaluated with high sensitivity. In this study, in order to establish the writing performance evaluation of ballpoint pens by AE sensing, the measurement method was examined and the AE signal waveforms were analyzed. As a result, it was found that AE sensing can detect phenomena that do not appear in the change in frictional force during writing. In addition, from the results of frequency analysis of the AE signal waveforms, it was found that there is a possibility that the difference in writing performance depending on the ink type of the ballpoint pen can be evaluated and interpreted.

Key Words: tribology, rolling friction, sliding friction, acoustic emission (AE), ballpoint pen

1. 緒 言

近年、様々な特徴や機能をもったボールペンが商品化され、書き味などに特長をもたせた製品開発が数多く進められてきた^{1,2)}。ボールペンの書き味は、主に先端部のチップ（ボールおよびボール受座）とインキによって決まると言われている。書き味は、人間の感性の他に、摩擦抵抗や振動の計測によって評価されている³⁾。しかしながら、チップにおいては微視的かつ複雑なトライボロジー現象が関わるため、従来の計測手法では比較が困難な場合も多い。より優れた製品開発を追求するためにも、その微視的かつ複雑な現象変化を計測・評価可能なセンシ

ング技術が求められる。

材料の摩擦界面における表面突起の接触・変形・破壊時に、ひずみエネルギーの解放に伴ってアコースティックエミッション波（AE波）が発生する⁴⁾。トライボロジー現象下で発生するAE波を検出し、その摩擦界面の摩擦・摩耗・潤滑の状態をその場計測・評価することができる⁵⁾。筆記用具に関するAE研究事例として、シャープペンシルでの筆記時に発生するAE波の計測から、引いた線の濃淡評価が可能と報告されている⁶⁾。その一方、ボールペンの書き味評価に関するAE研究事例は、筆者の知る限り報告されていない。

本研究では、AE センサを用いて摩擦中の AE 波を検出することによって、チップにおける摩擦・摩耗・潤滑の状態を高感度に計測・評価できると考え、AE センシングのボールペンの書き味評価への適用を試みる。本報告では、計測手法の検討および AE 信号原波形の計測・解析を行い、ボールペン筆記時に検出された AE 信号の特徴と AE 波の発生源について得られた知見を述べる。

2. 実験方法

図 1 は、本研究で使用した実験装置の概観である。ピン・オン・フラット型の往復摩擦試験機を用いて、ボールペンのリフィル（替芯）がピン側に固定できるように治具を製作した。試験紙は、フラット側（ステージ上）に固定した。本実験では、ボールペンの外装部品を外して、チップ（先端ボール径：0.7 mm）とリフィルのみを供試した。この際、リフィルは紙面と垂直に固定した。AE センサは、予備実験で設置位置を検討したうえで、図 2 に示すようにチップ近傍の治具側面に設置した（描画スケールは実際と異なる）。このとき、AE 波が減衰しないような距離および界面となるよう配慮した。また、ピン試験片固定部の板ばねにひずみゲージを貼り付け、筆記抵抗（摩擦抵抗）を計測した。

筆記条件は、筆圧（垂直荷重）1.0～1.5 N とし、筆記速度（平均摩擦速度）15 mm/s とした。30 mm の直線を 1 方向に 1 回だけ筆記する実験を室温中で繰り返し行った。試験紙は、紙厚 0.12 mm の上質紙を使用した。ボールペンのインキに関しては、一般的な油性染料と書き味が優れた油性染料で比較実験を行った。さらに、油性染料のみならず水性染料やゲルインキとの比較実験も行った。

AE センサからの出力信号は、プリアンプで増幅後、ノイズ除去の目的でフィルタ処理を行った。表 1 は、AE 計測条件である。AE 計測条件は、増幅率 100 dB とし、50 kHz ハイパスフィルタを用いた。AE 信号の評価には、AE 平均値電圧（AE 信号振幅）および AE 信号原波形を用いた。

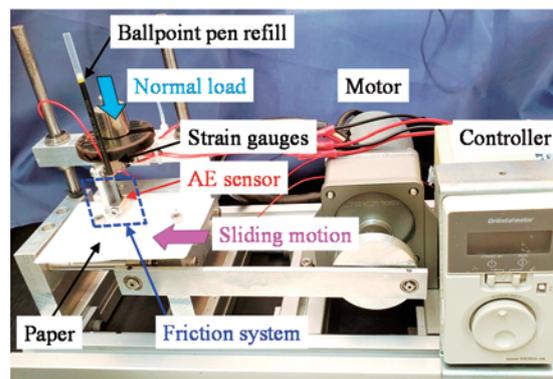


Fig. 1 Experimental setup for evaluating writing performance of a ballpoint pen by AE sensing.

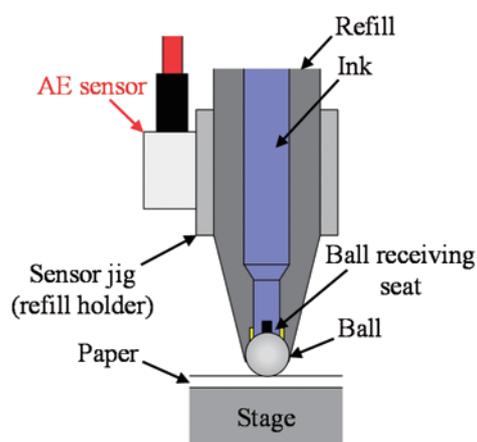


Fig. 2 Schematic diagram of the friction system in a ballpoint pen and the AE sensor position.

Table 1 Summary of the AE measuring condition

AE sensor (Frequency band)	Wideband-type (0.5–4.0 MHz)
AE amplification factor	100 dB
AE band-pass filter	HPF: 50 kHz LPF: Through

3. 実験結果および論議

3.1 ボールペン筆記時の AE 信号変化

先に、同じ油性染料でも性能が異なる一般的な油性染料と書き味が優れた油性染料との比較実験の結果について述べる。図 3 は、(a) 一般的な油性染料と (b) 書き味が優れた油性染料のボールペンを用いた実験後の筆跡の観察結果である。今回は、途中で途切れることなく線が引けた際のデータを整理した。

図4および図5は、筆記時の摩擦抵抗とAE信号振幅のインキ別による比較である。図5については、上図0~1 Vの範囲を拡大したグラフを下図に示している。この結果から、摩擦抵抗の大きさにはインキ性能の差があらわれているが、ほぼ一定の値であることがわかる。一方、AE信号振幅は大きさ(平均値)だけでなく、

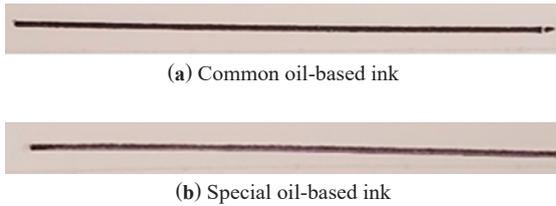


Fig. 3 Observations of a straight line drawn on the paper using the ballpoint pen with different ink type.

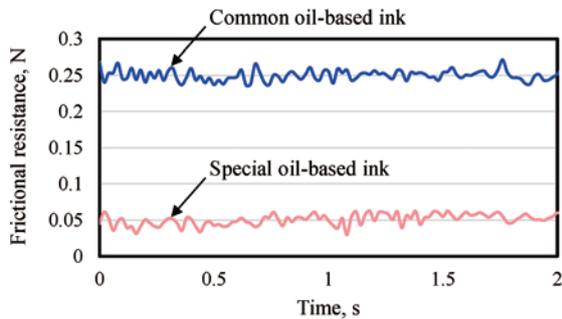


Fig. 4 Changes in the frictional resistance for different ink type.

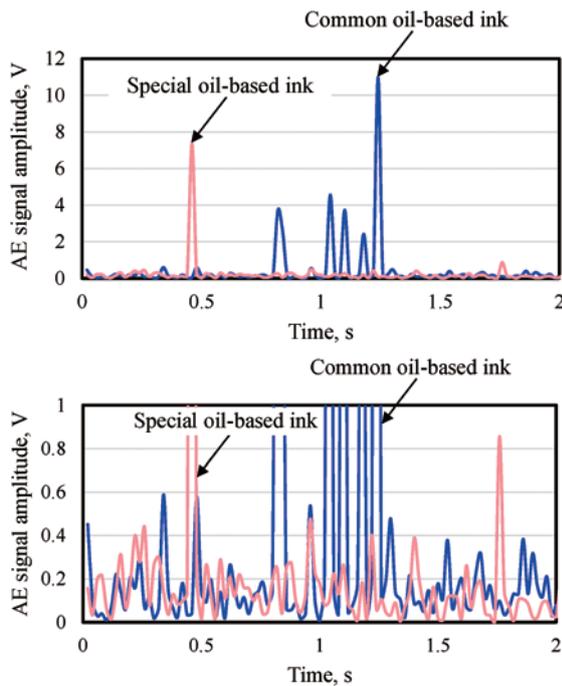


Fig. 5 Changes in the AE signal amplitude for different ink type.

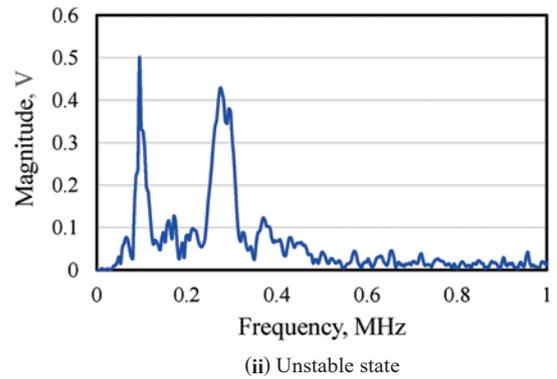
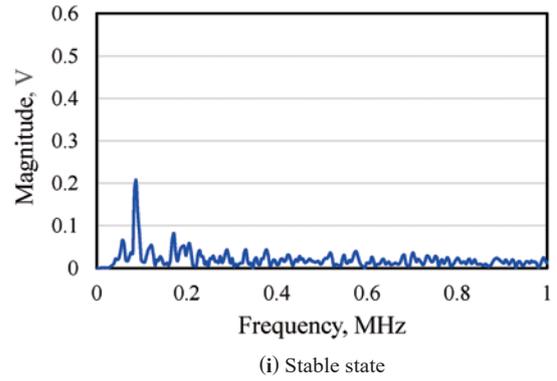


Fig. 6 Typical frequency spectra of the AE signal waveforms for common oil-based ink.

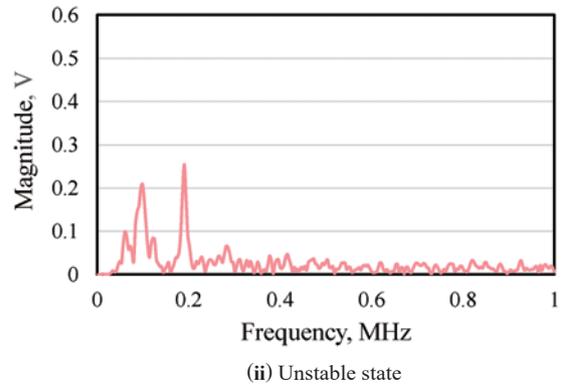
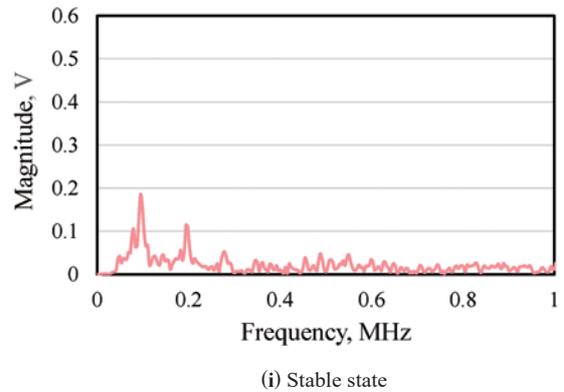


Fig. 7 Typical frequency spectra of the AE signal waveforms for special oil-based ink.

筆記中の突発型 AE の発生タイミングも異なる。これは、インキの滲出量などが関係しており、後述するチップにおける微視的な摩擦現象を捉えているためである。

AE センシングにおける特徴の一つとして、AE 原波形の周波数解析から、変形・破壊現象の特定および判別が可能である⁷⁾。そこで、図 5 における筆記中の安定時（小振幅 AE 発生時）と不安定時（大振幅 AE 発生時）の AE 信号原波形の周波数解析を行った。図 6 および図 7 は、それぞれ (a) 一般的な油性染料と (b) 書き味が優れた油性染料のボールペンでの結果である。(i) 安定時には、0.1~0.2 MHz 付近（低周波域）に周波数ピークが確認される。対して、(ii) 不安定時には、0.1~0.2 MHz 付近のみならず 0.2~0.4 MHz 付近（中周波域）にも大きな周波数ピークが確認されることがわかった。

トライボロジー現象下で計測される AE 信号波形の周波数解析結果から、低周波の AE 信号は摩擦現象に起因し、中周波の AE 信号は表面突起の変形・破壊に起因することがわかっている⁸⁾。したがって、一般的な染料ではボールと受座間の摩擦・潤滑状態が悪く、摺動に伴う変形・破壊に起因した低・中周波の AE 信号強度が大きくなったと考える。

3.2 インキ種別による AE 信号周波数変化

つぎに、インキ種別による書き味評価のために、油性染料（一般的な染料、書き味の優れた染料）、水性染料、ゲルインキのボールペンでの筆記中に検出された AE 信号原波形の周波数変化の特徴について述べる。

図 8 は、各実験で取得した AE 信号原波形の周波数スペクトルの経時変化である。筆記中に検出された 17 波形を時系列に並べた。AE 信

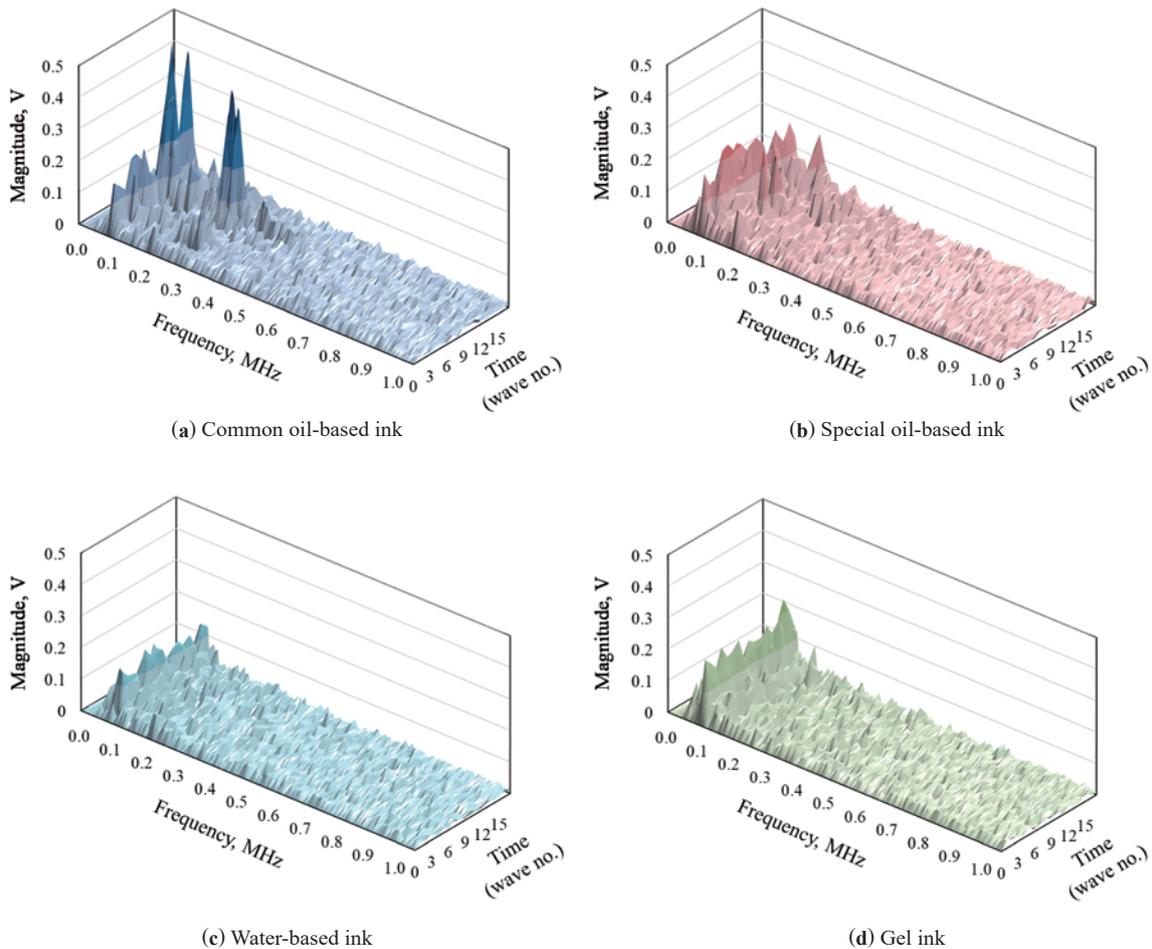


Fig. 8 Changes in the frequencies of the AE signal waveforms at various times during writing.

号強度は、(c) 水性染料、(d) ゲルインキ、(a) 油性染料の順で大きくなっていることがわかる。これは、一般的なインキ種別による書き味の良さの序列と一致する。潤滑下のすべり摩擦実験における AE 信号計測から、膜厚比による摩擦状態の変化を高感度に検出できることがわかって⁹⁾。したがって、インキの粘度および滲出量の変化によるボール・受座間の摩擦状態を捉えていると言える。

先に述べたように、筆記安定時には 0.1~0.2 MHz 付近 (低周波域)、不安定時には 0.2~0.4 MHz 付近 (中周波域) にも大きな周波数ピークが確認された。この傾向は、インキ種別が異なっても同様であり、AE 信号強度の小さい水性染料、ゲルインキにおいても確認されている。ゲルインキにおいては、筆記最後で線がわずかに細くなる傾向があった。これは、インキの滲出量が減少したことでボール・受座間の摩擦が大きくなり、微視的な損傷が進行した影響と推察する。実験後、各ボール表面外観を観察したが、大きな損傷は確認されなかった。筆記距離が短いことから、受座やその他接触部の軽微な損傷と考える。

3.3 AE センシングを用いたボールペン書き味評価

図 9 は、インキ種別の異なるボールペンを用いた実験で得られた AE 信号振幅平均とすべり摩擦係数の関係を示している。このすべり摩擦

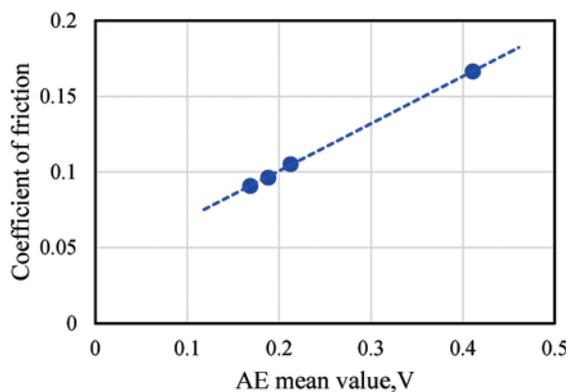


Fig. 9 Relationship between the AE mean value and the coefficient of friction.

係数は、筆記抵抗の平均値を筆圧で除した値とした。この結果から、AE 信号振幅平均とすべり摩擦係数の間には線形関係があることがわかる。筆圧や筆記速度などがこの関係に与える影響を明らかにする必要があるが、AE センシングによってボールペンの書き味を定量的に評価できる可能性がある。

ボールペンの書き味を左右する原因を追究するため、AE 信号原波形の周波数解析結果を活用してみる。ここでは、図 8 の周波数スペクトル平均から、周波数成分ごとの信号割合を算出した。先行研究で得られた知見から⁸⁾、0~0.2 MHz は摩擦現象、0.2~0.5 MHz は表面突起および表面下の塑性変形・き裂進展、0.5~1.0 MHz はアプレシブ摩耗、1.0~1.5 MHz は凝着摩耗のように分類した。図 10 は、分類した周波数成分ごとの信号割合で AE 平均値電圧を整理した結果である。これより、水性染料およびゲルインキの摩耗に関する周波数成分割合は、油性染料に比べて大きいことがわかった。この結果は、実際のインキ種別によるボール受座の摩耗量の実測値と傾向が一致する¹⁰⁾。したがって、本手法を用いてボールペンの書き味や寿命を左右する因子を特定できると考える。チップの構造、インキ粘度やボール硬さなどで AE 信号周波数成分の割合が変化することが考えられ、製品開発における最適化への活用が可能となる。

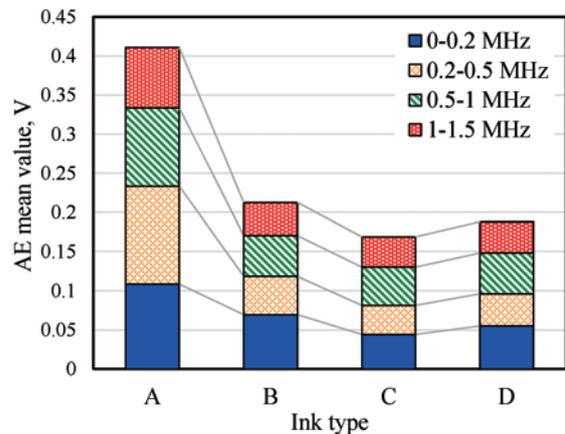


Fig. 10 Comparison of the AE mean value for different ink type: (A) common oil-based ink; (B) special oil-based ink; (C) water-based ink; and (D) gel ink.

4. 結 言

本研究では、AE センシングを用いてボールペン筆記時に検出される AE 信号から、インキ種別による書き味評価について実験および検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) AE センシングでは、摩擦抵抗の計測よりも高感度に筆記時のボールペンのチップで起こる摩擦現象を捉えられる。
- (2) 筆記安定時には 0.1~0.2 MHz 付近（低周波域）、不安定時には 0.2~0.4 MHz 付近（中周波域）にも大きな周波数ピークが確認される。
- (3) AE 信号振幅平均とすべり摩擦係数に相関があることがわかった。
- (4) AE 信号振幅の変化のみならず AE 信号周波数成分の割合から、ボールペンのインキ種別による書き味の違いを評価・解釈できる可能性がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実験治具の製作および実験データの取得に協力いただいた埼玉工業大学 工学部 機械工学科の当時学生であった島村椋太氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 市川秀寿：近年のボールペンインクの動向，色材協会誌，**92**，11 (2019) pp.329-335.
- 2) 川端克彦：筆記具用インキ，化学と教育，**43**，5 (1995) pp.286-290.

- 3) 山田雄太：インク特性の違いで書き心地が変わる!? ~ボールペンの性能を調査~, FCG LABO, **26** (2020) pp.2-3.
- 4) 長谷亜蘭：アコースティックエミッション計測の基礎，精密工学会誌，**78**，10 (2012) pp.856-861.
- 5) 長谷亜蘭：トライボロジー現象下で生じるアコースティックエミッション，トライボロジスト，**58**，11 (2013) pp.798-803.
- 6) 結城宏信，石毛厚行，湯口竜人，中村俊一：AE 計測による手書き製図における線の濃淡評価，第 19 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，(2013) pp.13-16.
- 7) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, Vol.292-293 (2012) pp.144-150.
- 8) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, Vol.8 (2020) 37.
- 9) R.J. Boness, S.L. McBride: Adhesive and Abrasive Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques, Wear, Vol.149, 1-2 (1991) pp.41-53.
- 10) 早乙女辰男：ボールペンにおける最近の精密加工技術について—ナノメートルチップ加工への挑戦—，精密工学会誌，**73**，1 (2007) pp.23-27.