

## AE 法を用いた鉄道車両用制輪子の実験的評価 (第 2 報)

嵯峨 信一\* (鉄道総研) 長谷 亜蘭 (埼玉工大)

Experimental evaluation of brake shoes for railway vehicles using AE method (2nd report)  
Shinichi Saga\*, (Railway Technical Research Inst.) Alan HASE, (Saitama Institute of Technology)

Using an acoustic emission (AE) method which utilizes the phenomenon of releasing the elastic energy stored inside as elastic waves when the material is deformed or fractured, full-scale dynamo bench testing of brake shoes for railway vehicles was carried out, and the correlation between the elastic waves and the friction characteristics of brake shoes was evaluated experimentally. In the last fiscal year, we showed differences in the appearance tendency in AE waveforms for each brake shoe material with different brake performance. In this report, we carried out a more detailed analysis to clarify the characteristics of them.

キーワード：鉄道車両，制輪子，合成樹脂，焼結合金，鋳鉄，アコースティック・エミッション，ブレーキ性能  
(Railway vehicle, brake shoe, resin composite, sinter alloy, cast iron, acoustic emission, brake performance)

### 1. はじめに

鉄道車両には様々な材質や形状をした制輪子が使用されている。この理由としては、走行する線区条件や車両性能の諸元に適合するように制輪子の仕様を細やかに設計・調整していることが挙げられる。とりわけ、在来線車両用制輪子は鉄道事業者の要求に応えるべく特注化しており、種類が豊富である他、複合的な材質や形状あるいは構造をなしている。すなわち、製造メーカのノウハウの塊であり、これらの仕様や性能を一般化することは困難である。

しかしながら、制輪子の評価にあたっては、車輪踏面と制輪子の摩擦面で生じる諸現象を直接的に把握する手法がないため、従来から摩擦現象を間接的に表す内部温度や摩擦係数といった物理量を用いざるを得ない<sup>(1)</sup>。このため、摩擦面の諸現象を捉える測定・評価手法が求められている。

また、近年の環境負荷低減への関心の高まりを受けて、摩擦材から排出される摩耗粉の問題が顕在化してきており、自動車での規制が検討されている<sup>(2)</sup>。摩耗粉の成分や粒子径の分析装置は市販されているが、走行風や回転風を受けながら飛散する摩耗粉の捕集方法が課題である。仮に、実稼働状態でリアルタイムに摩耗状態が把握できる何らかの方法があれば、摩擦材の研究開発にも役立つものと考えられる。

こうした背景を踏まえ、本研究では、物体や材料が変形するあるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを弾性波として放出する現象を利用したアコースティック・エミッション法 (以下、AE 法)<sup>(3)(4)(5)(6)(7)</sup>を用いて、鉄道車両用制輪子の摩擦特性を実験的に評価する可能性について検討してきた。

昨年度の報告<sup>(8)</sup>では、AE 法を用いてブレーキ性能の異な

る 4 種類の鉄道車両用制輪子の摩擦現象を初めて測定し、AE 法が感度良く、再現性も高く取得できた他、各制輪子は各々異なる傾向であること、合成系と金属系 (焼結、鋳鉄) の違い等を示した。また、計測解析装置の周波数分解能やデータ収録性能等に課題があり、改良の必要性が判明した。このため、今年度は新たな計測解析システムを導入し、昨年度と同様の条件で測定データを取得・解析を行ったので、それらについて報告する。

### 2. アコースティック・エミッション法

一般的な振動法 (音響法) では数 Hz~数十 kHz の可聴領域の信号を検出・評価している。これに対して、AE 法ではいわゆる非可聴域である超音波領域を対象としており、物体や材料が外力を受けて変形あるいは破壊するときや、複合材料の界面で摩擦や衝突が起こる際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを弾性波 (数 kHz~数 MHz) として放出する現象を利用した手法である。その歴史は古く、日本では 1934 年、ドイツでは 1953 年まで遡る。

AE 法は回転機械の部品や土木構造物などで幅広く使われており、近年では、それまで特殊で高価であった計測機器類の性能向上と低価格化に加えて、IoT を活用した AE 監視システムなどへの適用が拡大している。一方で摩擦材関連ではこれまで報告事例がほとんどなかったブレーキ摩擦材に関する研究<sup>(9)(10)</sup>も報告されている。いずれも試験片レベルの実験であるが、AE 法の有効性が示されている。

Fig.1 は台上試験の模式図である。実物大の制輪子の摩擦面では無数の微視的な摩耗や破壊が逐次繰り返されており、小さな試験片に比べて大きな弾性エネルギーが生じ、高い検出感度を得られる可能性がある。そこで、本研究では、実

物大の鉄道車両用制輪子の摩擦特性を AE 法により実験的に評価する可能性について検討することとした。

Fig.2 は AE 信号波形の模式図である。数 MHz の信号波形を捉えるためにサンプリング周波数を上げると、データ容量が膨大となり (サンプリング定理)、その後の信号処理に影響を及ぼす懸念がある。また、一般的に亀裂進展などの AE 信号は Fig.2 のような突発型波形を示すため、波形の最大値をつなぎ合わせた包絡線検波 (エンベロープ) 処理を行うことにより、サンプリング周波数を下げてデータ量を減らせるという長所と同時に、周波数分解能が低下してしまうという短所もある。しかしながら、包絡線検波処理後の信号の実効値あるいは平均値は扱いやすく、これらを摩擦現象の特徴量として評価できることが知られている。

昨年度の結果から、本研究で取得した AE 信号波形はいずれの制輪子においても突発型波形ではなく、連続型波形 (変形・摩擦・摩耗に伴うといわれている) であったことから、今年度は包括線検波処理を行わず、高い周波数分解能を活かして短時間フーリエ変換処理 (STFT) を行うこととした。

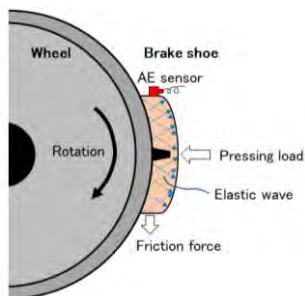


Fig.1. Schematic of AE wave of brake shoe

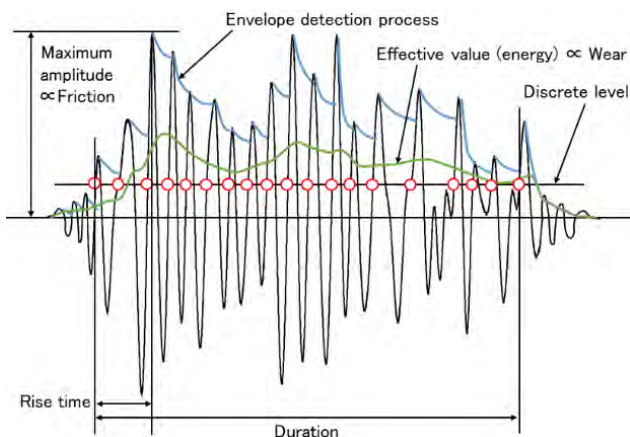


Fig.2. Schematic of AE waveform

### 3. 実物大台上試験機による実験

〈3-1〉 実験概要 鉄道総研が所有する実物大台上試験機 (ブレーキ性能試験機) を用いて、AE 法の実験を行った。本研究で使用した計測解析システムの模式図を Fig.3 に示す。AE 波を検出するセンサは超小型不平衡型の AE-900M-WB を、検出信号を増幅するプリアンプは不平衡片接

地型の 9917 (昨年度は AE-912) を、検出信号の解析は、最新式の AE アナライザ AE9701 (昨年度はディスクリミネータ AE9922, 今年度は補助的に使用) をそれぞれ用いた。いずれもエヌエフ回路設計ブロック社製である。

AE アナライザは、サンプリング 4MHz で HPF (20kHz~) を設定し、波形の S/N 比を勘案して固定のゲインとした。ディスクリミネータ (低周波側で BPF : 100kHz~200kHz, 高周波側で HPF : 500kHz~) により分波されたエンベロープ波形およびその平均化処理波形 (AE 平均値) を取得するデータロガーのサンプリングを 20kHz とした。

その他、加速度ピックアップ (NP-3560B), アンプ (PS-1300), マイクロフォン (MI-1235), 高機能型騒音計 (LA-3560) を用いた。いずれも小野測器社製である。さらに、サーモカメラ (Seek thermal 社製, Compact PRO), CCD カメラを設置した。なお、散水装置、回転エンコーダ、トルクメータ、熱電対は台上試験機に標準装備されている。

車輪は在来線車両で使用されている B 型車輪 (直径 860mm) である。制輪子の供試体はそれぞれ材質・形状とブレーキ性能の異なる 4 種類とし、合成系 (A), 焼結ブロック入り合成系 (B), 焼結系 (C), 鋳鉄系 (D) である (Fig.4)。

ブレーキ試験前の車輪踏面粗さの初期設定は、算術平均  $Ra$  がおよそ  $0.6\mu\text{m}$  となるように整えた。ブレーキ条件は、いずれの制輪子においても初速 95km/h からの停止距離がおおよそ 400m (制輪子 D は 600m) となるような押付力 (片押しで非常ブレーキ相当) を各々設定し、各条件で 6 回繰り返し、乾燥条件では初速度毎に摩耗量を測定した。

環境条件は、乾燥 (以下, Dry), 湿潤 (散水 200ml/min,  $5^{\circ}\text{C}$ , 以下, Wet200), 湿潤強 (散水 1000ml/min,  $5^{\circ}\text{C}$ , 以下, Wet1000) の 3 種類とし、乾燥から順に実施した。なお、各制輪子の湿潤時における摩擦係数の低下率 (ダウン率: 乾燥条件に対する湿潤条件の摩擦係数の相対比率) は、A, B, C, D の順で低下する (影響が小さい) ことがこれまでの知見<sup>(1)</sup>で判明している。

#### 〈3-2〉 実験結果

(1) 経時変化の傾向 AE アナライザにおける STFT の窓幅を 2048, 特徴量 (最大振幅, 周波数重心: 周波数スペクトル分布図の全面積を等分する周波数, エネルギー: 振幅の 2 乗累積値) の算出間隔を 10ms とした。乾燥条件における初速 95km/h からの AE 信号 (振幅, STFT) の例を Fig.5 ~ Fig.8 に示す。いずれの制輪子においても AE 信号は感度良く取得できており、再現性も高かった。

制輪子 A は連続型波形で、減速中に大きな振幅変動がみられた。STFT の AE 信号は凡そ 100kHz までの範囲で出現し、振幅増大の際は 20kHz~100kHz 帯が顕著であった。

制輪子 B は連続型波形で、制輪子 A に比べ振幅が小さい傾向がみられたが、STFT の AE 信号の出現タイミングは制輪子 A と同様であり、20kHz~60kHz の狭い範囲であった。

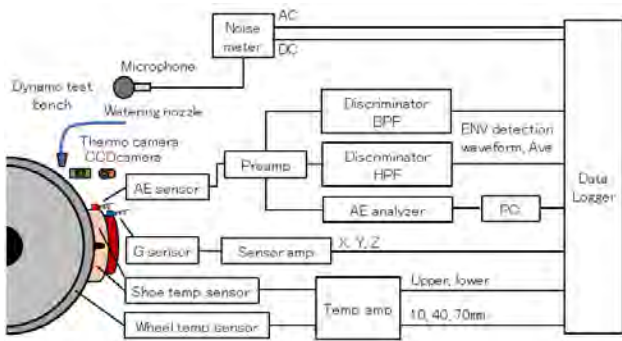


Fig.3. Schematic of AE measurement system

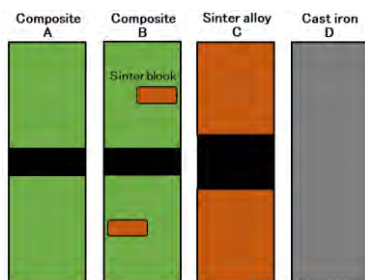


Fig.4. Schematic of brake shoe specimen (friction surface)

制輪子 C は連続型波形と突発型波形が混在しており、合成系の制輪子 A および B に比べて、振幅が大きく断続的であるなど経時変化に富んでいた。STFT の AE 信号は凡そ 200kHz までの範囲で出現し、強い AE 信号が 20kHz~100kHz の範囲でみられた。合成系の制輪子よりも高い周波数帯が出現した理由としては、焼結材の主成分が銅系<sup>(11)(12)</sup>であることが影響していると考えられる。

制輪子 D は連続型波形であるが、停止間隙で突発型波形がみられた。振幅は最も大きく、安定的な経時変化を示した。STFT の AE 信号は凡そ 350kHz までの範囲で出現し、停止間隙まで強い AE 信号が出現していた。合成系や焼結系の制輪子よりも高い周波数帯が出現した理由としては、鑄鉄材が主成分であることと、アブレイブ摩耗<sup>(13)</sup>が影響していると考えられる。実際に車輪踏面には鑄鉄制輪子の移着物が多数みられた。

(2) ブレーキ性能と AE 信号の関係 各条件において、距離基準平均摩擦係数 (以下、摩擦係数)、AE 信号の振幅の最大値、摩耗量およびエネルギーの最大値について Fig9 ~ Fig.12 に示す。なお、初速度や環境条件の違いによる比較を容易にするために、摩擦係数および AE 信号の振幅の最大値については、前述のダウン率 (摩擦係数は+側で性能低下、-側で性能向上) で、摩耗量については、初速度 35km/h に対する各初速度の比でそれぞれ表すこととした。

摩擦係数のダウン率について、制輪子 A は散水量が多いほど影響を強く受けてダウン率の増加が著しい。すなわち、摩擦係数のさらなる低下により停止距離が乾燥条件よりも

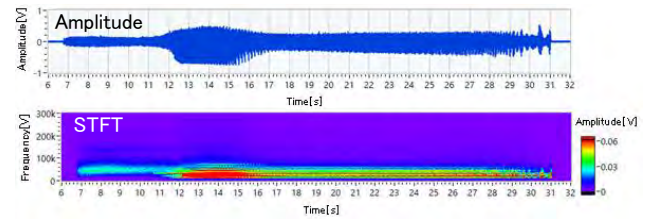


Fig.5. Example of measurement chart (Shoe A, 95km/h, Dry)

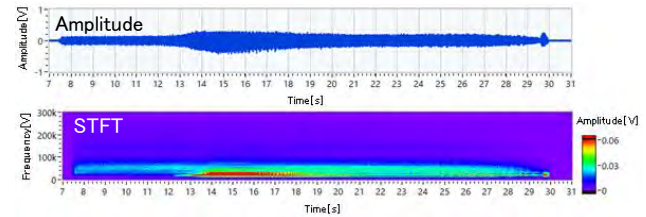


Fig.6. Example of measurement chart (Shoe B, 95km/h, Dry)

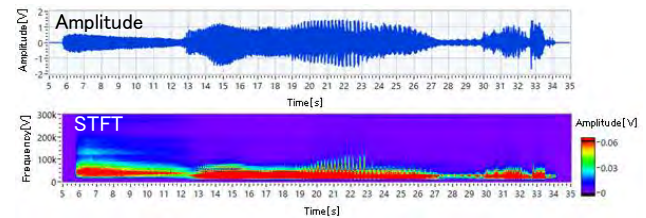


Fig.7. Example of measurement chart (Shoe C, 95km/h, Dry)

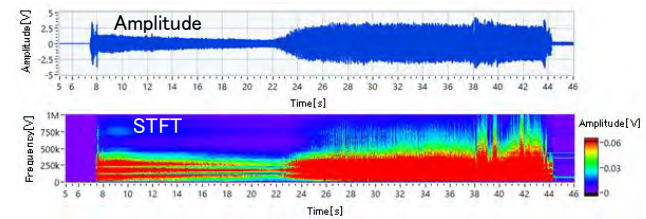


Fig.8. Example of measurement chart (Shoe D, 95km/h, Dry)

大幅に延伸した。制輪子 B はダウン率の増大がみとめられるが、制輪子 A と比べてその程度は小さく、散水量の違いも小さく抑えられている。これは、挿入されている焼結ブロックによる水切り効果が得られた結果である。制輪子 C はダウン率が凡そ 0% 近傍にあり、散水および散水量の影響を受けにくい。制輪子 D はダウン率が-側に大きくシフトしており、散水量が多いほどその度合いが高い。すなわち、摩擦熱が散水によって抑えられたことにより、摩擦係数が低下せずに上昇し、停止距離が乾燥条件よりも大幅に短縮した。

AE 信号の振幅の最大値のダウン率について、いずれの制輪子も初速度および散水量に対する傾向が摩擦係数の傾向に似ており、概ね相関性があるといえる (ただし、制輪子 D の初速度 35km/h を除く)。特に、金属系の制輪子 C および D では散水量の違いが反転している。これは、金属系の制輪子が散水に対して性能低下しないことに起因している。以上の結果から、AE 信号の振幅の最大値を扱うことによって摩擦係数の評価が一定程度可能であることが示された。

乾燥条件の初速度 35km/h に対する各初速度の摩耗量につ

いて、合成系の制輪子 A および B では初速度の増加に伴って摩耗量は増大傾向を示し、特に制輪子 A が顕著であった。一方、金属系の制輪子 C および D では微増傾向であった。

乾燥条件の初速度 35km/h に対する各初速度における AE 信号のエネルギーの最大値について、エネルギーの常用対数の傾向が摩耗量の傾向と概ね相関性があるといえる。常用対数である理由としては、実物大かつ実稼働状態というスケール効果の影響が現れたと考えられる。以上の結果から、AE 信号のエネルギーの最大値 (常用対数) を扱うことによって摩耗量の評価が一定程度可能であることが示された。

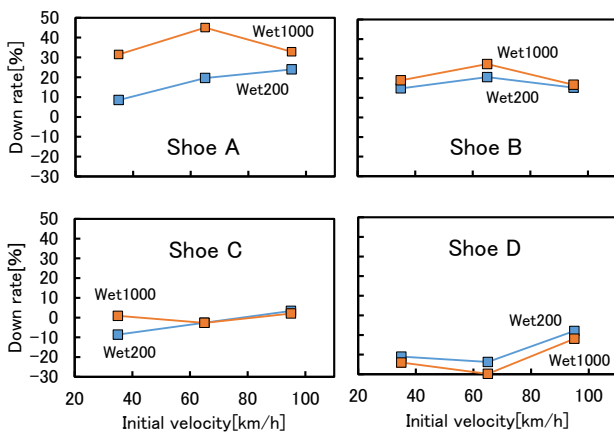


Fig.9. Experimental result of friction coefficient (down rate)

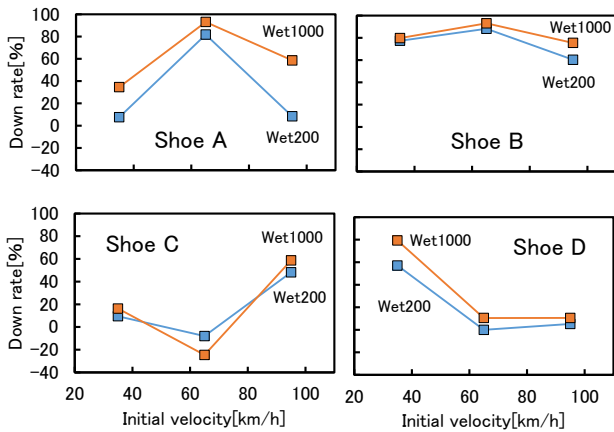


Fig.10. Experimental result of maximum amplitude (down rate)

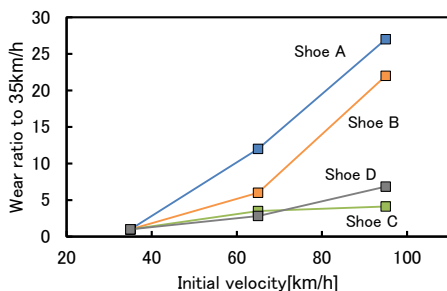


Fig.11. Experimental result of amount of wear (Dry)

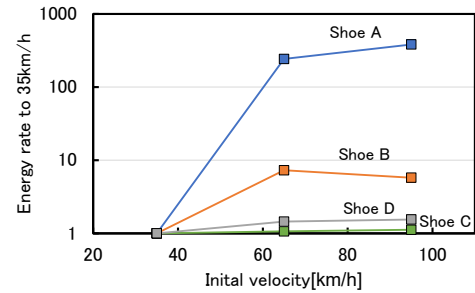


Fig.12. Experimental result of maximum energy (Dry)

#### 4. まとめと考察

本研究では、アコースティック・エミッション法を用いて、鉄道車両用制輪子の摩擦特性に関する実験的評価を進め、摩擦係数と AE 信号の振幅の最大値に、摩耗量とエネルギーの最大値に一定程度の相関性があることを示した。

特に、摩耗量の評価は相応の試験回数をこなす必要があること、瞬間摩擦係数のようにリアルタイム測定が困難であること、さらに摩耗粉の捕集の課題もある。そこで、短時間フーリエ変換結果における振幅 (エネルギー) の増大時に、摩耗が促進されている可能性が高いことから、今後は、振幅の増減と摩耗粉の多寡との関係について、調べていく。

#### 文 献

- (1) 嵯峨信一, 半田和行, 道辻洋平:「冬期走行環境を模擬した制輪子のブレーキ性能評価手法」, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.17-22 (2019)
- (2) たとえば, 環境省の Web サイト:「排出ガス規制に関する欧州の動向について」, <https://www.env.go.jp/council/07air-noise/%E3%80%909065-sannkou%E3%80%91.pdf> (2006)
- (3) 日本非破壊検査協会:「アコースティック・エミッション試験 I」 (2006)
- (4) 日本非破壊検査協会:「アコースティック・エミッション試験 II」 (2008)
- (5) エヌエフ回路設計ブロック:「AEの基礎と測定方法」 (2018)
- (6) 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, Vol.78, No.10 (2012)
- (7) 湯山茂徳:「アコースティックエミッション (AE) 法による腐食損傷評価」, 防食技術, Vol.35, pp.163-170 (1986)
- (8) 嵯峨信一, 長谷亜蘭:「AE法を用いた鉄道車両用制輪子の実験的評価」, 第28回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, SS1-4-2 (2021)
- (9) 水田和甫, 西澤幸男, 杉本考司, 岡山勝弥, 長谷亜蘭:「アコースティックエミッション法によるブレーキパッド摩擦特性の評価」, 日本機械学会年次大会論文集, No.13-1, S114042 (2013)
- (10) 長谷亜蘭, 水田和甫, 西澤幸男, 杉本考司, 岡山勝弥:「アコースティックエミッション計測による自動車用ブレーキ材料の摩擦特性評価」, 日本機械学会, 第25回交通・物流部門大会 (TRANSLOG), 1214 (2016)
- (11) 長谷亜蘭:「AE法を用いた通電トライボロジー現象下の損耗診断・評価に関する研究」, 科学研究費助成事業 研究成果報告書 (2016)
- (12) 和田正毅, 水野萬亀雄, 笹田直著:「AEによる摩擦・摩耗の研究 銅の摩耗形態と AE 周波数」, 精密工学会誌, Vol.56, No.8, pp.1474-1479 (1990)
- (13) 清水 一道, 楠本 賢太:「鋳鉄のアブレッシブ摩耗特性とエロージョン摩耗特性」, 鋳造工学, Vol.88, No.5, pp.234-240 (2016)