

超音波で摩擦メカニズムを捉える



嵯峨 信一
Shinichi Saga
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員



長谷 亜蘭
Alan Hase
埼玉工業大学
工学部機械工学科
准教授

はじめに

鉄道車両のブレーキにはさまざまな材質や形状をした**制輪子**[®]が使用されています。制輪子の種類が多い理由としては、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調整したことがあげられます。とりわけ、在来線車両用制輪子の種類が豊富であり、これらの複合的な材質や形状には制輪子メーカーのノウハウが鉄道事業者のニーズに応えるべくつぎ込まれており、仕様と性能を一般化することは困難とされています。

ただし、制輪子の評価にあたっては、摩擦表面で起きている現象を直接的に捉える方法がないため、従来から摩擦係数や内部温度あるいは表面温度のほか、音圧や振動を用いた評価が行われています¹⁾²⁾。また、近年は環境負荷低減への関心の高まりから、摩擦材から排出される粉じんの問題が顕在化しつつあり、欧州の自動車分野ではタイヤやブレーキから排出される摩耗粉を規制

化³⁾する動きがあります。このため、摩擦や摩耗といった現象のメカニズムを捉えることが可能な測定・評価手法が求められています。

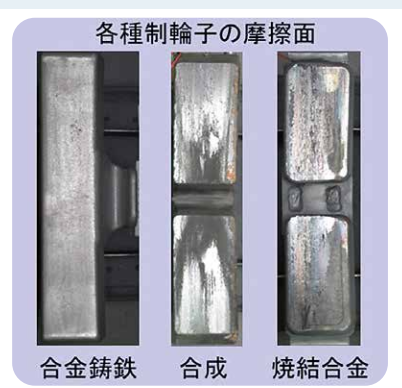
ここでは、音や振動と同様に、波の一種として知られている超音波に着目しました。具体的には、物体や材料が変形するあるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを**弾性波**[®]として放出する現象を利用したアコースティック・エミッション法(AE法)^{4)~7)}を用いて、鉄道車両用制輪子の摩擦特性(摩擦係数や摩耗)を実験的に評価しました。

コラム「制輪子」

車輪踏面に押し付けて摩擦力を得るしゅう動材。ディスクブレーキ用のパッドも含まれますが一般的に踏面ブレーキ用の摩擦材を指す場合が多いです。さまざまな材質があり、古くは合金鋳鉄制輪子から始まり、合成制輪子、焼結合金制輪子などの種類があります。合金鋳鉄制輪子は雨や雪などでも摩擦性能が安定している特徴があります。合成制輪子は熱硬化性樹脂を結合材とした金属粉の複合摩擦材で、配合成分の自由度が高く、摩耗も少ない特徴があります。焼結合金制輪子は高い耐熱性により摩擦性能が安定しており、天候や押付力あるいは速度の影響が小さい特徴があります。なお、制輪子を車輪に押し付ける装置には、1つの制輪子で行う片押し式(図I)と2つの制輪子で行う両抱き式があります。

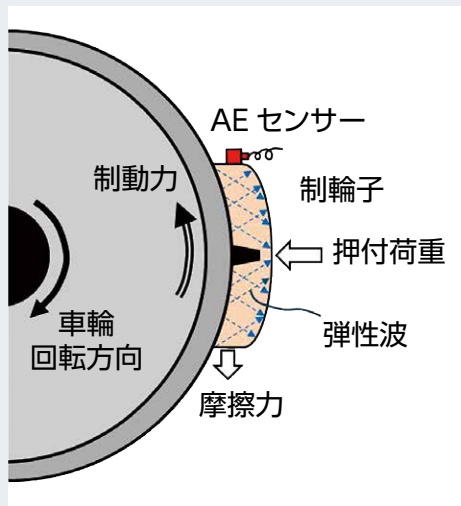


図I 制輪子と押付装置(片押し式)

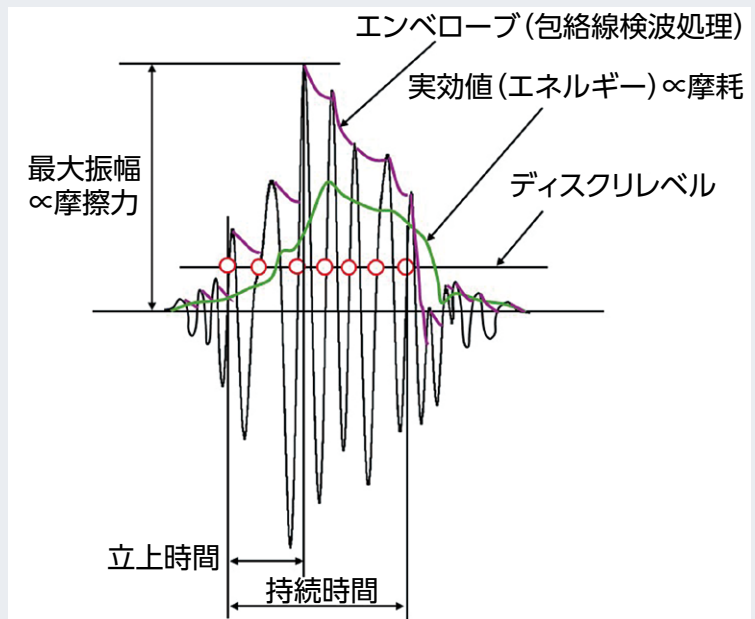


各種制輪子の摩擦面

合金鋳鉄 合成 焼結合金



(a) AE 法測定



(b) AE 信号

図1 台上ブレーキ試験のイメージ

アコースティック・エミッション法 (AE法)

一般的に、振動や騒音の測定法では数Hz～数10kHzの可聴領域の信号を検出・評価しています。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、前述のとおり、内部に蓄えていた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す。その歴史は古く、日本では1934年⁸⁾まで遡ります。

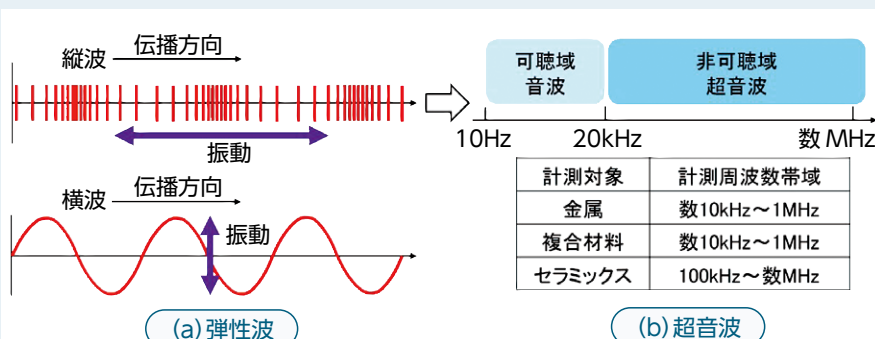
AE法は回転機械の部品や土木構造物などの破壊検知で幅広く使われており、近年ではIoT(モノのインターネット)を活用した状態監視システムなどへの適用が拡大しています。一方、摩擦材の関連ではこれまで報告事例がほとんどなかったブレーキ摩擦材への適用研究⁹⁾も報告されています。この報告では、小型試験片の実験ではあるもののAE信号と摩擦特性の相関性などが示されています。

実物大の制輪子を用いた台上ブレーキ試験に

おけるAE法測定のイメージおよび取得されるAE信号の波形イメージを図1に示します。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、小型試験片に比べて大きなエネルギーが生じて、明瞭なAE信号が得られる可能性があります。一般的に、き裂が進展するときに発生するAE信号は図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)処理を行うことでデータ量を大幅に減らし、信号の実

コラム「弾性波と超音波」

物体に外力を加えると、その大きさに比例した体積や形状の変化が生じ、外力を取り去ると元に戻る固体を弾性体、その中を伝搬する波動を弾性波(図II(a))とよびます。弾性波は、波の進行方向に平行で振動する縦波(1次波(P波)、圧縮波、疎密波など)と、波の進行方向に垂直で振動する横波(2次波(S波)、剪断波など)に分けられます。超音波(図II(b))は縦波の一種で、人の耳では聞こえない20kHz以上の音波を指します。一方、10Hz～20kHzの音波は聞こえるため、可聴域とよびます。超音波の応用事例は、距離計、漏洩計、厚さ計、軸力計、流速計、加湿器、洗浄器、非破壊検査、胎児検査など多岐にわたります。



図II 弾性波と超音波

効値あるいは平均値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ます。学術的な知見⁴⁾⁵⁾によると、AE信号の最大振幅は摩擦力との関連が、実効値は摩耗との関連があるとされています。ディスクリレベル(任意に設定する区切)を超過した数で微視的破壊などの傾向を把握します。

実物大台上ブレーキ試験

図2に示す実物大台上試験機(ブレーキ性能試験機、車輪径860mm)を用いて、摩擦特性とAE信号の関連性評価を行いました。制輪子は材質と形状の異なる、合金鋳鉄制輪子、合成制輪子、焼結合金制輪子の3種類です。

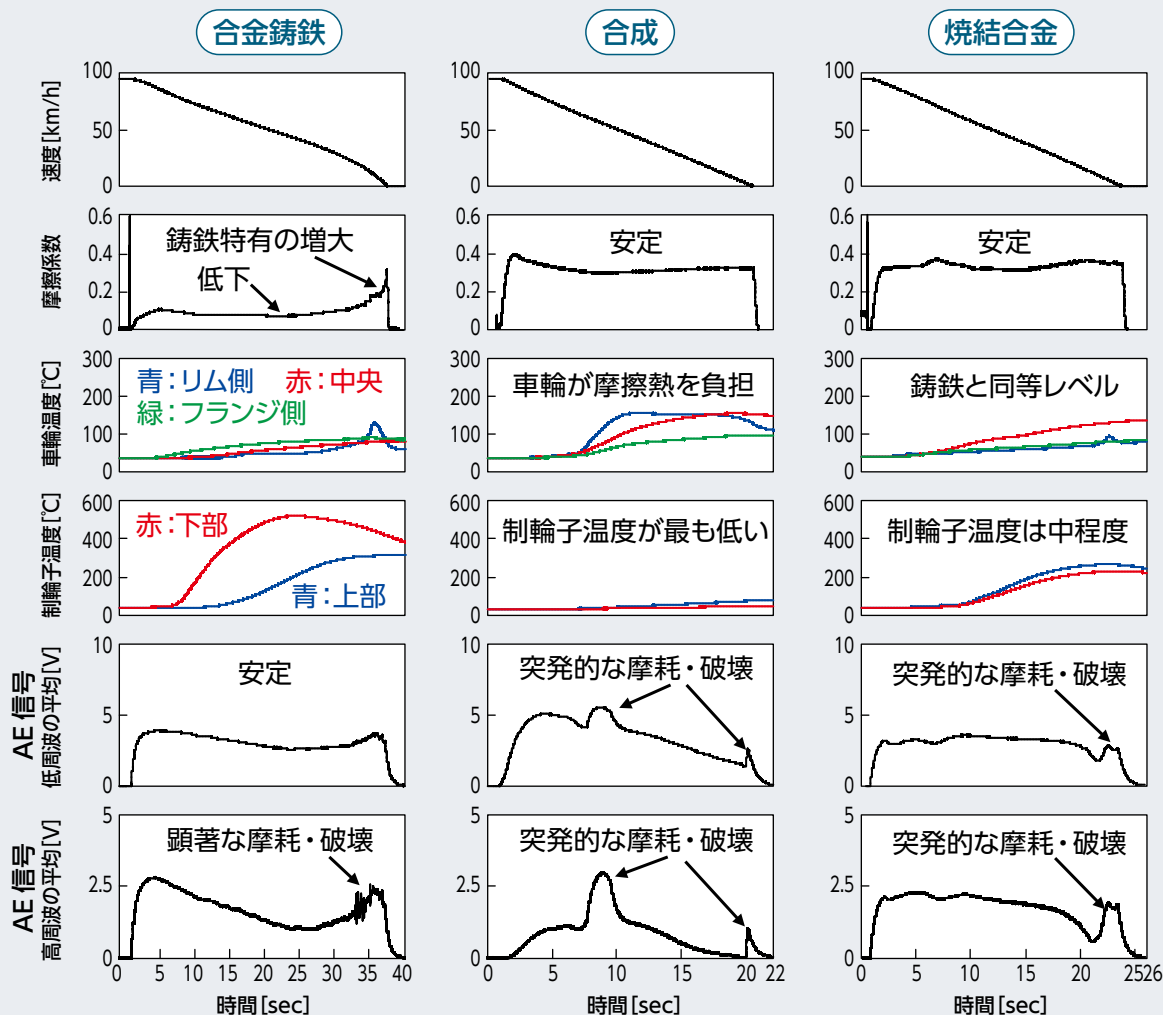
試験は、初速35, 65, 95km/hから複数回



図2 実物大台上ブレーキ試験

繰り返しました。その際のブレーキ条件は、初速95km/hからの停止距離がおおよそ300m(合金鋳鉄制輪子は500m)となるような押付力(最大ブレーキ相当)としました。環境条件は乾燥, 湿潤(散水200ml/min, 5°C), 湿潤強(散

図3 測定結果例(最大ブレーキ相当, 乾燥, 初速95 km/h)



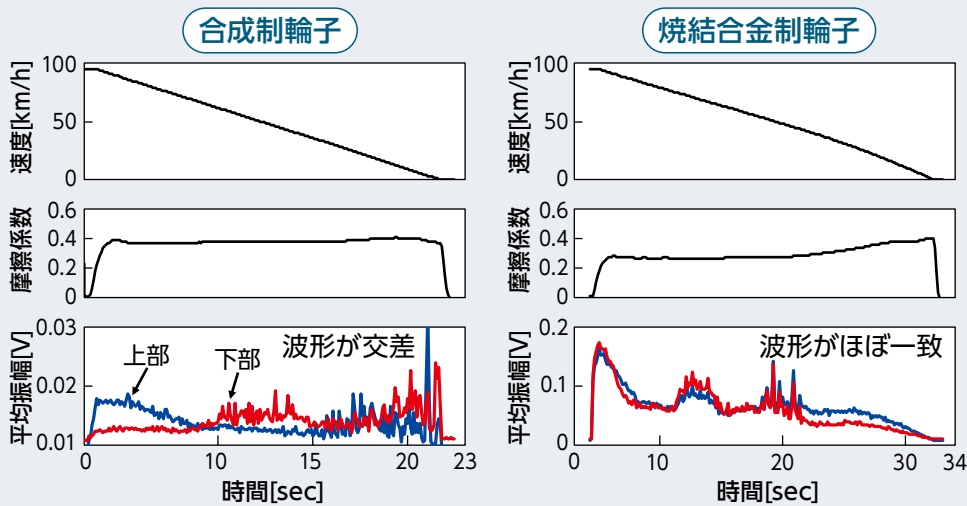


図4 制輪子の上下セグメントにおけるAE信号の傾向（最大ブレーキ相当）

ており、車輪温度が上昇する時間で低周波と高周波がともに突出した波形となり、突発的な摩耗や破壊が起きていると考えられます。焼結合金制輪子では、摩擦係数は安定していますが、車輪と制輪子は中程度の温度上昇を示しています。停止

水1000ml/min, 5°C)の3種類です。

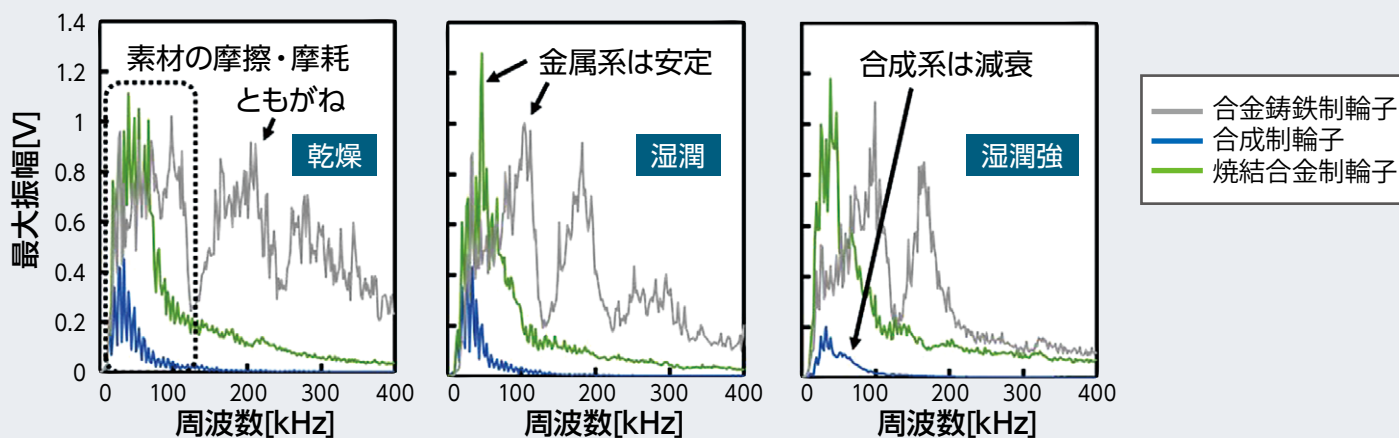
弾性波を検出するAEセンサー(制輪子の上部セグメントに貼り付け)は直径5mm, 高さ2.3mmの円筒形で、加速度センサーよりもさらに小型軽量かつ高周波数帯域(~4MHz)です。取得したAE信号は複合材成分を対象とした低周波(100kHz~200kHz)と金属成分を対象とした高周波(500kHz以上)に分波した後に包絡線検波処理を行い、さらに平均化しました。

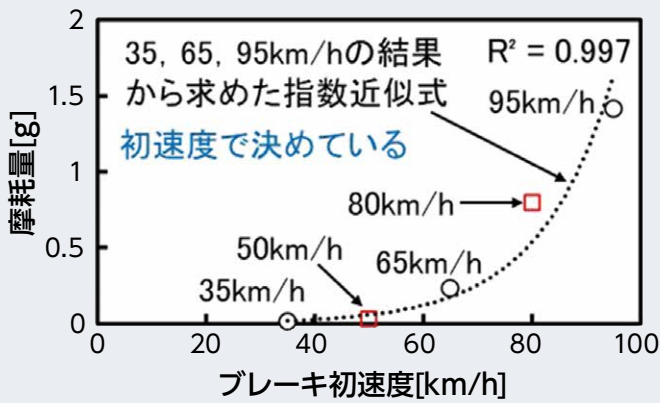
図3に測定結果(乾燥, 初速95km/h)の例を示します。合金鑄鉄制輪子では、停止間際に摩擦係数が増大することが知られており、高周波でも同様の傾向がみられ、顕著な摩耗や破壊が起きていると考えられます。また、制輪子温度が最大となる時間で高周波成分と摩擦係数とともに低下しています。合成制輪子では、摩擦係数は安定していますが、車輪が摩擦熱を負担し

停止間際に突出した波形を示し、突発的な摩耗や破壊が起きていると考えられます。このようにAE信号を処理して得られた低周波と高周波の経時変化は各制輪子で異なることから、それぞれの摩擦現象の違いが現れていると考えられます。また、図4は制輪子の上下セグメントにAEセンサーを貼り付けたときのAE信号(分波なし)の経時変化を比較したものです。図のように、合成制輪子では上下で交差するような挙動が、焼結合金制輪子では上下でほぼ一致する挙動が現れ、各セグメントの摩擦状態を把握することができます。こうした挙動は加速度センサーによる振動測定では捉えられず、AE法によって新たに捉えることができたと言えます。

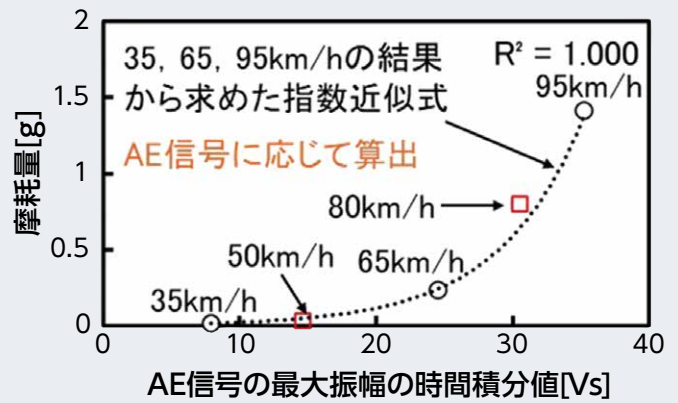
さらに詳細に調べるために、AE信号の周波数解析を行いました(図5)。出現する周波数帯は合金鑄鉄制輪子の場合で約400kHz, 合成系

図5 周波数解析の結果





(a)従来方法



(b)AE信号を用いた方法

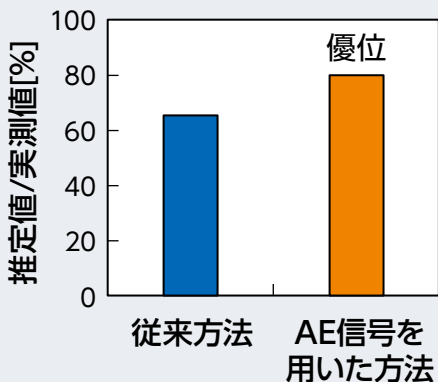
図6 摩耗量の指数近似式（合成制輪子，最大ブレーキ相当，乾燥，Rは相関係数）

の制輪子の場合で約100kHz，焼結合金制輪子の場合で約200kHzです。これら周波数の違いは材料主成分の違いであるため，合金鑄鉄制輪子では合金鉄が，合成制輪子では熱硬化性樹脂が，焼結合金制輪子では銅合金の摩擦・摩耗を捉えていると考えられます。また，雨や雪に強いとされている金属系の制輪子は合成系に比べて最大振幅および周波数帯域の減衰が小さく安定しています。とくに，合金鑄鉄では“ともがね（同種金属による焼き付き）”とよばれる摩擦現象が顕著です。

次に，摩擦係数や摩耗量とAE信号の関係について調べたところ，摩耗量をAE信号の指数関数で表せることがわかりました。合成制輪子の例を図6に示します。従来の摩耗量の評価

は，数百回のブレーキ条件（初速度と押付力）における実測摩耗量（試験回数平均）の関係をj用いて求めているため，あるブレーキ条件に対する推定摩耗量を一意的に決めています。一方，AE信号を用いた場合には，測定したAE信号（最大振幅の時間積分値）に応じた推定摩耗量がブレーキ試験の都度（1回あたり），算出されます。いずれの方法も35，65，95km/hの実測摩耗量の結果から指数近似式を求めています。そこで，中間の速度である50と80km/hのブレーキ試験を実施し，摩耗量の実測値と指数近似式から求めた推定値の比（誤差）および両者の性質を図7に示します。比の結果から，AE信号を用いた方法の方が優位であるのがわかります。また，摩耗量の総量値と瞬間値がわかる長所が

図7 摩耗量の比較（合成制輪子，最大ブレーキ相当，乾燥，80 km/h）



各方法における摩耗量推定の性質

	推定の種別	
	ブレーキごとの総量	ブレーキ中の瞬間
従来方法	△（一意的）	×
AE信号を用いた方法	○	○

あります。

さらに、詳細な解析を進めたところ、AE信号の瞬時値を用いて瞬時的な摩擦消費量も精度よく推定できることができました(図8)。

おわりに

本研究では、鉄道車両用制輪子の摩擦現象を把握するために、超音波を利用したアコースティック・エミッション法(AE法)を適用した事例を紹介しました。従来手法では得られなかった新たな特徴の違いを捉えることができ、今後、摩擦メカニズムの解明や摩擦消費量の推定などにつながる手法として活用できる知見を得ました。特に、摩擦消費量を評価するには、従来手法では相当数の試験を繰り返しこ

なす必要があります。瞬時的な摩擦消費量を測定することも困難です。さらに、発生する粉じんの影響を評価するには摩擦消費粉を捕集する必要があるなど、課題が山積しています。超小型のセンサーで取得できるAE信号を用いることにより、従来では不可能であった瞬時的な摩擦消費量の推定に加えて、走行する実車両の稼働状態における評

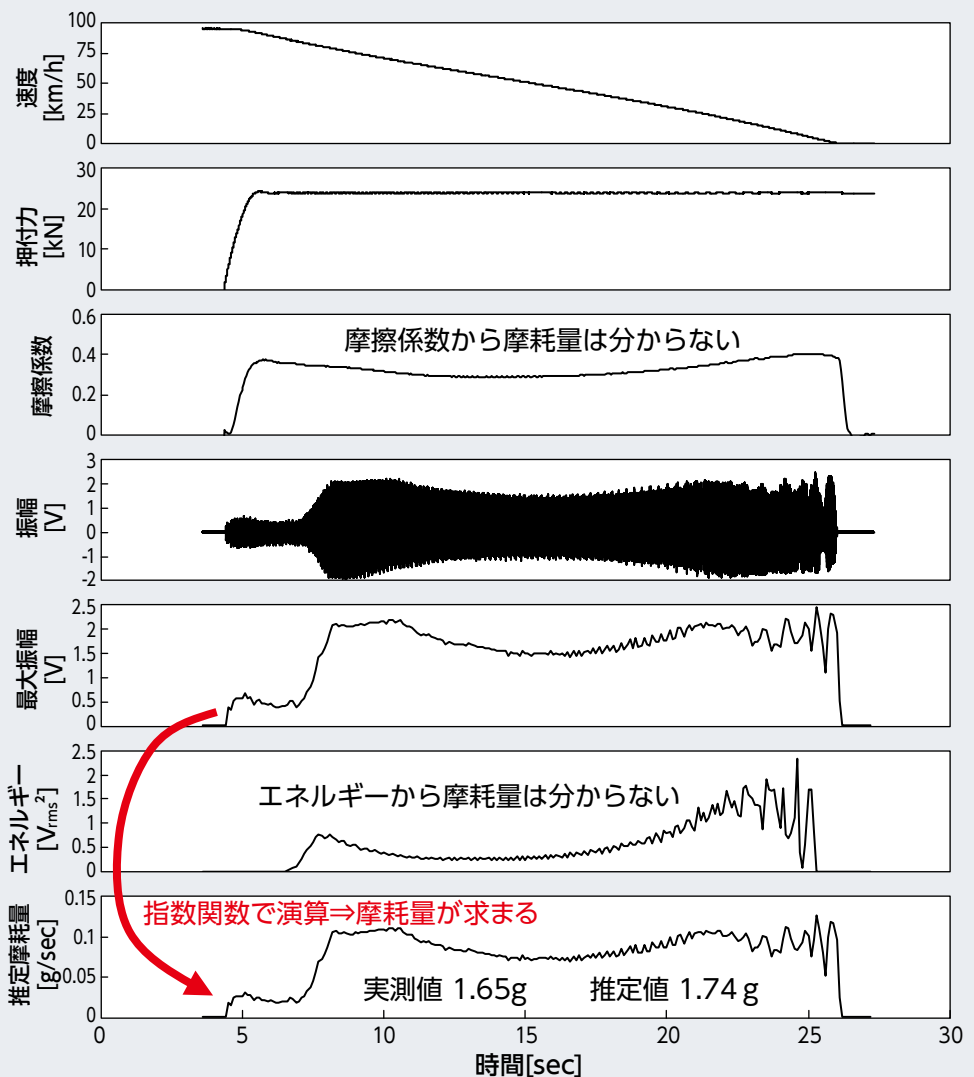


図8 摩擦消費量の推定結果例(合成制輪子, 最大ブレーキ相当, 乾燥, 初速95km/h)

価の実現も期待できます。また、将来的には摩擦の少ない制輪子の開発や制輪子の効果的(摩擦を抑えつつ踏面粗さを生成など)なブレーキ操作方法といった応用展開も考えられます。

RRR

文献

- 1) 嵯峨信一, 下田恵輔, 新山正剛, 狩野泰, 芳賀昭弘, 中橋順一: 車輪への熱負荷軽減と制動性能を両立した合成制輪子の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.5, pp.35-40, 2013
- 2) 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
- 3) 環境省: 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/07 air-noise/>【65-sannkou】.pdf (入手日: 2024年2月19日)
- 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I, 2006
- 5) 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
- 6) エヌエフ回路設計ブロック: AEの基礎と測定方法, 2018
- 7) 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
- 8) 岸上冬彦: 破壊の進行に関する一実験, 地震, No.6, pp.25-31, 1934
- 9) 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), No.1214, 2016