

# 車両単位での列車ブレーキ性能評価手法

車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

研究員 土方 大輔

## 1. はじめに

列車のブレーキ性能は、停止距離を実測しその長短によって判断することが一般的である。この手法は、滑走や勾配等の影響を含んだ実性能を簡素な指標で表せるため実用的であるが、編成内の各車両を個別に評価することはできない。そこで本研究では、車両間の連結器を力センサとして利用し、そこに働く力（以後、自連力と呼ぶ）と車両の減速度を用いて、編成内の任意の車両のブレーキ力を推定する手法について検討した。本研究では、考案した手法を貨物列車による現車走行試験に適用し、その妥当性を検証した結果について述べる。

## 2. 編成内に働くブレーキ力モデル

複数の車両により組成された列車において、前後方向の運動のみを考える。減速中、編成内の各車両は個々にブレーキ力を発揮し、自車を減速させる働きをするとともに、連結器を介して他の車両とも相互に影響し合う。連結器は緩衝器を内蔵しているため、力はバネおよびダンパが作用したうえで伝達される。伝達される力が整定するまでは、車両間に相対運動が生じており、各車両には個別の減速度が働く。このとき、緩衝器のバネは非線形性を持つうえ<sup>1)</sup>、種別によりその特性が異なるため、厳密なモデル化によってブレーキ性能を把握するためには、使用する緩衝器固有のパラメータをすべて既知とする必要があり現実的ではない。

そこで、ブレーキ開始から一定時間が経過し、車両間の相対運動が収束した状態を仮定することにより、モデルの簡素化を考える。先頭車を機関車、後続の車両を貨車  $n$  両とする  $n+1$  両編成の列車において、編成内の各車両に働く力の模式図を図1に、各記号の意味を表1にそれぞれ示す。相対運動の収束によって各車両の減速度は等しくなるため、ブレーキ力は式(1)~(2)の様に表される。

表1 各記号の意味

記号	意味
$M$	機関車質量
$m_i$	貨車質量
$F$	機関車ブレーキ力
$f_i$	貨車ブレーキ力
$\alpha$	加速度
$R$	自連力

$$F = -R_1 - M\alpha \quad (1)$$

$$f_i = \begin{cases} R_i - R_{i+1} - m_i\alpha, & i < n \\ R_i - m_i\alpha, & i = n \end{cases} \quad (2)$$

ここで、添字  $i$  は貨車先頭からの両数を表す。加速度  $\alpha$  には減速度として負の値が入る。また、すべての貨車の式について総和をとり、 $\Sigma f$  を貨車の合計ブレーキ力、 $\Sigma m$  を貨車の合計質量とすると式(3)を得る。

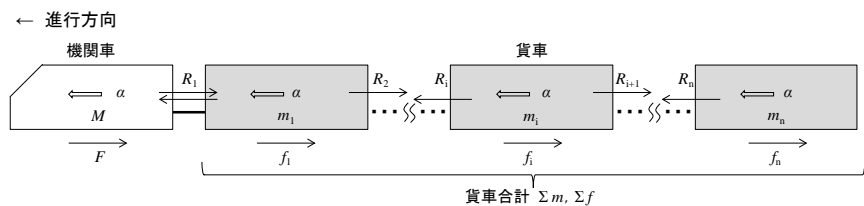


図1 簡素化したブレーキ力モデル

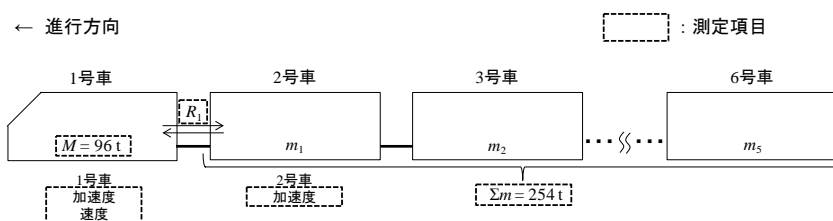
$$\sum_{i=1}^n f_i = R_1 - \left( \sum_{i=1}^n m_i \right) \alpha \quad (3)$$

式(1)~(3)に示す通り、機関車のブレーキ力は、その質量と加速度、接する1つの自連力から求まり、貨車の合計ブレーキ力も同様である。また、任意の貨車のブレーキ力は、その車両の質量と加速度および接する前後の自連力を取得すればよいことがわかる。なお、勾配区間を走行する場合には、水平区間相当に勾配補正した減速度を $\alpha$ に用いればよい。

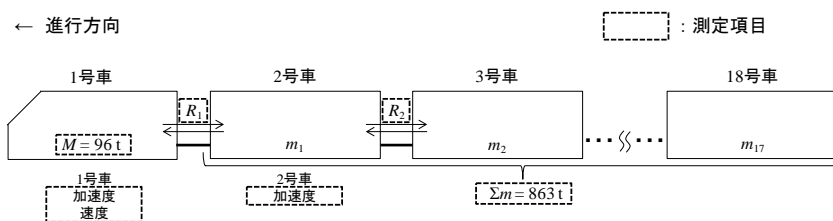
### 3. 現車試験による検証

#### 3.1 試験方法

考案手法を適用し、貨物列車にて現車試験を行った。試験列車の概要を図2に示す。機関車はDF200形式、貨車はコキ104形式および106形式を使用した。まず、機関車+貨車5両で組成される6両編成の列車を用いて、特定のブレーキ操作における推定ブレーキ力の挙動を構内で検証した。次に、機関車+貨車17両で組成される18両編成の列車を用いて、考案手法によるブレーキ力の推定値と理論値の比較を本線上で行った。各貨車の質量は、デッドウェイトを積載することでほぼ一律となるよう調整し、質量に起因する各貨車のブレーキ力の差が生じないようにした。自連力の測定には、連結器にひずみゲージを貼付して荷重校正したものを使用し、正の値が引張力、負の値が圧縮力である。加速度は機関車と機関車次位貨車(編成内2号車)に加速度センサを設置して測定した。



(a) 6両編成(構内試験)



(b) 18両編成(本線試験)

図2 試験列車概要

#### 3.2 機関車+貨車5両での構内試験

##### 3.2.1 機関車だけにブレーキをかけた場合

ブレーキ初速度25km/hから単弁2ノッチ扱いをした際の速度、加速度、自連力および推定ブレーキ力の結果を図3に示す。なお、単弁とは機関車だけにブレーキをかける操作である。

この操作では、機関車のみが減速しようとする中で、後続の貨車群が機関車を押す働きをする。したがって、機関車・貨車間の連結器には圧縮力が働く。実測された自連力はその傾向を示しており、ブレーキ開始直後に強い圧縮変動力が働き、その後一定の時間をかけて変動は減衰し、以後一定の値で推移した。この自連力が安定した状態においては、機関車と貨車の加速度がほぼ一致しており、車両間の相対運動が収束したことを示している。

推定ブレーキ力は、機関車において立ち上がりから立ち下がりまで安定した値を示し、貨車合計においてブレーキ開始直後に振動的な値をとるものの、その後ほぼ0kNで推移した。この結果は、機関車だけにブレーキをかけたことに符合する。また、単体の車両を対象としている機関車の推定ブレーキ力は、自連力が過渡応答時でも式(1)から自車の加速度を用いて適正に算出される

が、貨車合計の推定ブレーキ力は貨車5両の運動を機関車次位貨車の加速度で代表しているため、相対運動の収束前では誤差を含み、収束後に妥当な値を示したものと考えられる。

### 3. 2. 2 機関車と貨車の両方にブレーキをかけた場合

ブレーキ初速度 25km/h から自弁 3 ノッチ扱いをした際の速度、加速度、自連力および推定ブレーキ力の結果を図 4 に示す。なお、自弁とは機関車と貨車の両方にブレーキをかける、通常使用するブレーキ操作である。

この操作では、基本的に機関車と貨車の減速度が概ね同等となるよう設定されており、連結器には大きな力が働かない。実測された自連力はその傾向を示しており、瞬間的な圧縮力が数回働いた他は、ほぼ力のかからない状態で推移した。このときのスパイク状の応答は、相対運動による衝撃力を検出したもので、機関車と貨車の加速度に一定の差が生じている時、特に逆方向のピークを同時に持つ時に比較的大きく生じていることがわかる。

推定ブレーキ力は、機関車において単弁扱い時と同様の傾向を示し、貨車合計において断続的な変動を伴いながら概ね一定の値で推移した。貨車合計ブレーキ力の変動は、自連力がスパイク状に応答するタイミングと一致するため、相対運動による衝撃力が要因であると考えられる。なお、このような推移を示す場合であっても、ブレーキ中の時間平均値をとることにより、ブレーキ力の評価は可能である。

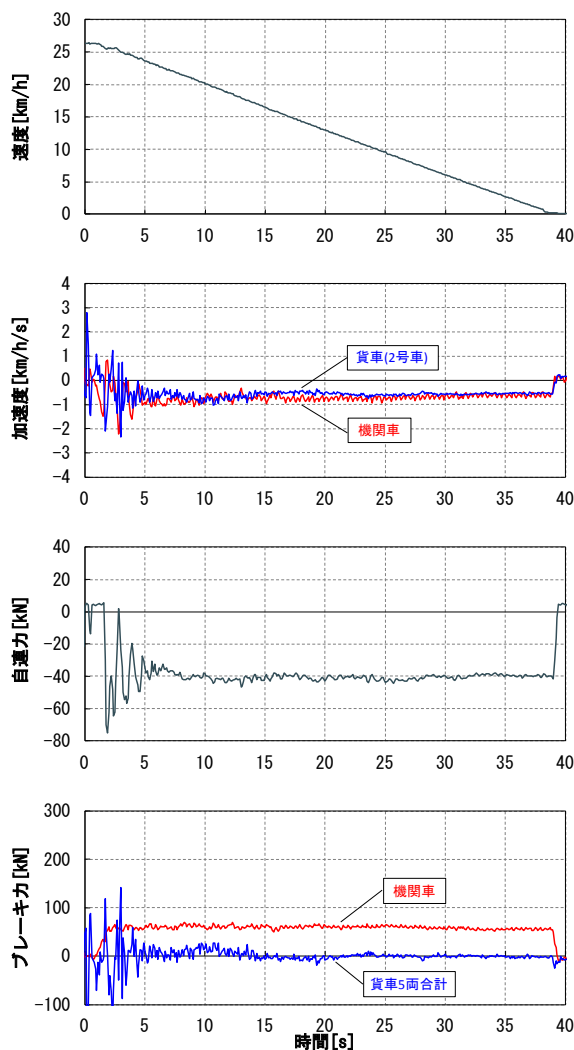


図 3 試験結果(単弁 2 ノッチ)

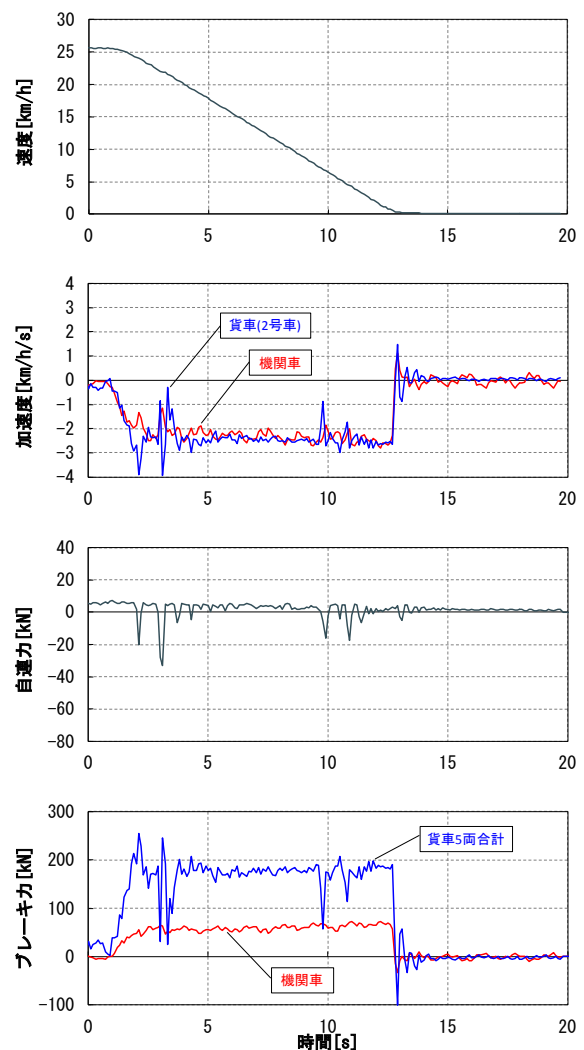


図 4 試験結果(自弁 3 ノッチ)

### 3. 3 機関車+貨車 17 両での本線試験

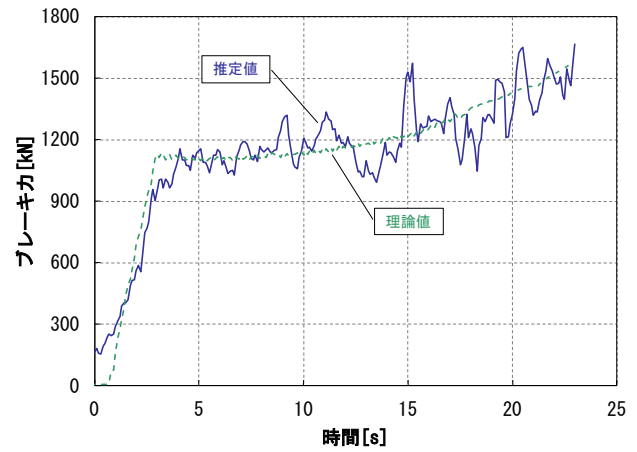
#### 3. 3. 1 推定値と理論値の比較

ブレーキ初速度 75km/h から非常ブレーキ扱いをした際の貨車 17 両合計の推定ブレーキ力を図 5(a)に示す。図中には、推定ブレーキ力と併せて車両諸元から算出されるブレーキ力の理論値を示した。

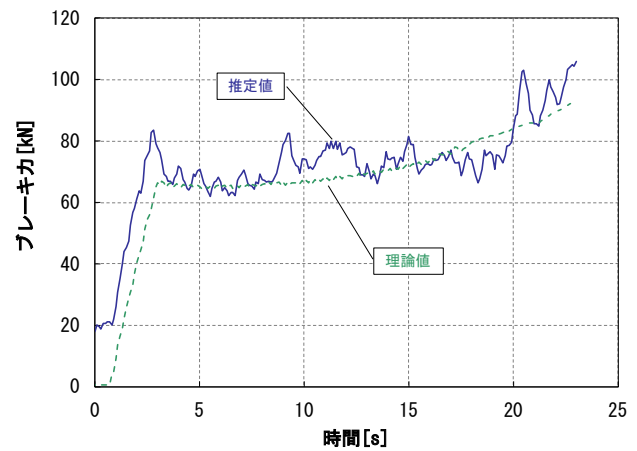
推定ブレーキ力は、多数の車両の相対運動によって振動的な挙動を示すが、平均的には理論値に沿って徐々に上昇する妥当な値で得られ、その変化を時系列で把握可能であることがわかった。

#### 3. 3. 2 任意車両 1 両のブレーキ力

考案手法では、対象とする車両を任意に選ぶことができる。ここで、例として機関車次位貨車 1 両を対象として、図 5(a)と同一の試験における、対象車両 1 両の推定ブレーキ力と理論値を図 5(b)に示す。推定ブレーキ力は、振動的な挙動を示しながら理論値に近い値で推移した。これは、17 両合計の結果と同様であり、編成内の任意の車両 1 両を対象とした場合においても、考案手法が適用可能であることがわかった。



(a) 貨車 17 両合計



(b) 2 号車単体

図 5 推定値と理論値の比較

### 4. おわりに

本研究では、編成内の各車両に働くブレーキ力を自連力と加速度によって推定する手法を考案した。考案手法を現車試験に適用した結果、次の知見が得られた。

- (1) 編成内の車両のブレーキ状態を反映した挙動が得られ、作用しているブレーキ力の大きさを実用上問題のない精度で検出可能である。
- (2) 推定したブレーキ力の推移を時系列で把握することができる。
- (3) 対象とする車両を先頭車・中間車および複数・単体を問わず、任意にとることができる。

### 参考文献

- 1) 早勢剛, 長南征二 “列車座屈に関する数値解析”, 日本機械学会論文集(C編), 66 巻, 646 号 (2000-6), pp.1943-1951.
- 2) 土方大輔 “編成における任意車両群のブレーキ力推定手法”, 日本機械学会, 第 23 回交通・物流部門大会講演論文集(2014), pp.111-114.