

鉄道車両用セラミックス粒子の効率的噴射法の検討および 静電センサーによる噴射粒子量の推定

具嶋 和也^{1*}, 松坂 修二²

Efficient Ceramic Particle Jetting Method for Railway Vehicles and Estimation of Total Particle Mass by Electrostatic Sensor

Kazuya Gushima^{1*} and Shuji Matsusaka²

Received 20 May 2024; Accepted 18 July 2024

Railway vehicles may experience wheel slip/slide while braking in rainy or snowy conditions. Compressed air and ceramic particles are used and directed toward the wheel-rail contact area to improve wheel adhesion. In this study, bench tests were conducted to determine the effectiveness of continuous and intermittent jetting of ceramic particles. An electrostatic sensor was used to measure the flow rate of the particles. The goal was to identify an efficient method for jetting ceramic particles that minimizes air consumption while maximizing the mass of jetted particles. Additionally, the study derived a conversion coefficient to estimate jetted particle mass based on the time integral of the voltage output from the sensor for practical use.

Keywords: Railway vehicle, Wheel slide protection, Intermittent particle jetting, Particle flow rate, Electrostatic sensor.

1. 緒言

走行中の鉄道車両が制動運転に入るとき、乾燥条件下では車輪・レール間の粘着力が確保されているので滑走しないが、降雨や降雪あるいは結露などの湿潤条件下では粘着力の低下によって滑走する場合がある[1,2]。状況によっては、車輪にフラット[3]と呼ばれる偏平な損傷が生じ、レールには滑走傷が形成される。これらの損傷は、列車の乗り心地に影響するだけでなく、振動や騒音を増大させるので、車輪の転削やレールの削正が必要になる。また、列車の逸走を引き起こす原因にもなる。

車輪・レール間の粘着力を維持するために、主電動機に滑走検知再粘着制御機能を付加しても[4–6]、滑走を完全に防止するまでには至っていないため[7]、セラミックス粒子を車輪・レール間に向けて圧縮空気で高速噴射する増粘着材噴射装置が一部の車両では使用されている[8]。

粒子の噴射法には、連続噴射のほかに間欠噴射が考えられるが、列車の運行において、噴射に関する取り扱いが規定されていないため、鉄道事業者の方針や運転士の

判断に任されている。滑走防止のために連続噴射を30秒間行くと、空気を多量に消費するので、列車の運行に必要なほかの用途の空気量を確保するために、エアーコンプレッサーの起動回数および稼働時間を増やさなければならない。連続噴射と比較して、間欠噴射は空気の消費量が少なく電力も抑えられるが、粒子流量の定量評価に関する知見が不足している。

増粘着材噴射装置から気流とともに運ばれる粒子の流量は約0.5 g/sと少なく、車両の振動の影響も受けるので、粒子流量を市販の計測器で測定することは難しい。このような条件では、粒子が輸送管内を移動するときに生じる接触帯電を利用する方法が適している[9–11]。筆者らは、粒子流量が発生電流と相関することを利用して鉄道車両用粉体流量センサーの開発を進めてきた[12]。実車走行でも安定した検出性能が得られること[13,14]および耐久性・信頼性に優れていることを検証し[15]、セラミックス粒子の噴射状態の適否を判別する方法も検討した[16]。

本研究では、静電気式粉体流量センサーを用いて、連続噴射と間欠噴射による粒子流量の違いを明らかにするとともに、粒子の噴射量と空気の消費量に着目して必要な粘着力が得られ、かつ粒子の噴射量と空気の消費量が少ない効率的な粒子噴射法を検討する。さらに、センサーから得られる電圧と粒子の噴射量の関係を求め、センサーの出力値から噴射量を推定する方法を検討する。

1 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 車両技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

Vehicle Technology Division, Railway Technical Research Institute
(2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo 185-8540, Japan)

2 京都大学名誉教授

Professor Emeritus at Kyoto University

* Corresponding Author gushima.kazuya.30@rtri.or.jp

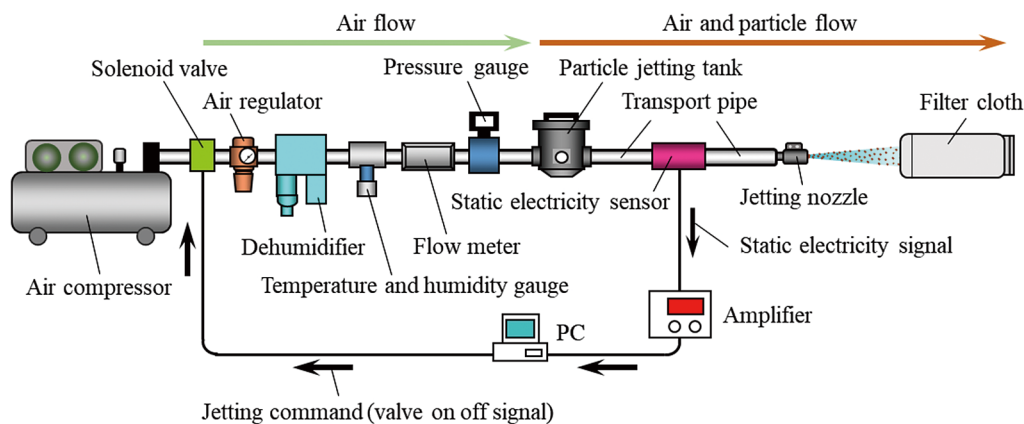


Fig. 1 Schematic illustration of the ceramic particle jetting apparatus and jetting particle detection system

2. 試験装置および方法

2.1 試験装置

Fig. 1 に、試験装置の全体構成を示す。本試験装置は、エアコンプレッサー、電磁弁、レギュレータ、除湿機、温湿度計、空気流量計、圧力計から成る気流関連の設備に加えて、セラミックス粒子噴射タンク（TESS 製、10 型）、輸送管、静電気式粉体流量センサー、I-V 変換アンプ、噴射ノズル、計測制御用 PC で構成される。噴射用セラミックス粒子（以下、増粘着材）は、セラミックス粒子噴射タンク（以下、噴射タンク）に収納されている。

2.2 噴射タンクの構造および増粘着材の噴射原理

Fig. 2 に、噴射タンクの構造を示す。鋼鉄製噴射タンクの底部には水平管が貫通しており、2 本の鉛直管が取り付けられている。片方の鉛直管には、噴射タンク内の圧力を調節するためにニードル弁が付加されている。増粘着材の噴射を行う場合、エアコンプレッサーによる圧縮空気が水平管を通過するが、一部の空気は 2 本の鉛直管に分岐して噴射タンク内に入る。噴射タンクが空気で加圧されると、水平管の下面に設けられた $\phi 2.5$ mm の小孔から増粘着材が入り、気流とともに輸送管を通過してノズルから噴射される。なお、圧縮空気の供給を停止すると、噴射タンク内の気流が乱れて増粘着材が飛散し、その一部が $\phi 9.0$ mm の鉛直管の上端から気流とともに水平管に入る。

2.3 試験方法および条件

エアコンプレッサー（電動機定格出力 3.7 kW、最大圧力 0.8 MPa、空気タンク容量 160 L、タンク出口の空気流量 400 L/min）の圧縮空気の供給は、電磁弁の開閉により行い、その自動制御にプログラムリレー（オムロン製、ZEN 10C1DR-D-V1）を用いた。噴射タンクから気流とともに搬送される増粘着材は、輸送管前半部（長さ 1.0 m）、センサー、輸送管後半部（長さ 1.0 m）を経て、口径 2.5 mm のノズルから約 100 m/s の速度で噴射した。噴射の開始から終了までの試験時間は、連続噴射も間欠噴射も 30 s とした。間欠噴射は、電磁弁の開と閉の各設定時間が等しい等間隔・間欠噴射（以下、等間欠噴射）と

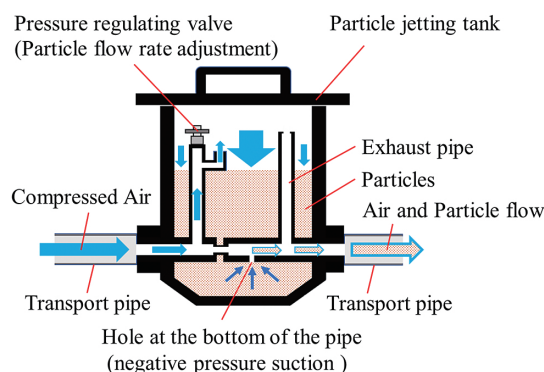


Fig. 2 Structure of the particle jetting tank and the principle of particle jetting

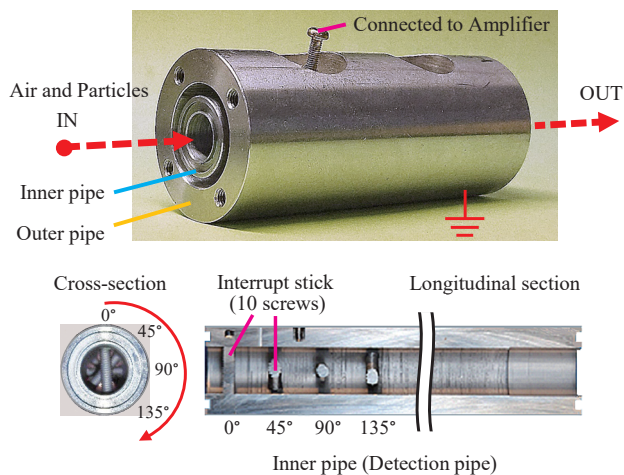


Fig. 3 Structure of the sensor

各設定時間が異なる不等間隔・間欠噴射（以下、不等間欠噴射）の 2 通りを実施した。噴射された増粘着材は、ろ布で捕集して質量を測定した。増粘着材の流量は、噴射タンク内の圧力調節用ニードル弁で変更でき、連続噴射において 0.5 g/s の条件に設定した。Fig. 3 に、センサーの構造を示す。増粘着材は、輸送管の内壁と接触を繰り返すことによって帯電していくが、センサー内でも接触

帯電が生じるので、センサー内の帯電量の経時変化を電流として検出し、I-V 変換アンプ（三協パイオテック製、ESA-11 型、変換比： 1.0×10^9 V/A）の出力電圧を 1.0 ms の周期で PC に記録した。

増粘着材は、質量基準中位径 0.3 mm のアルミナ粒子を使用した。輸送管は、内径 12 mm のニトリルゴムの外側にクロロプレングムを被覆した耐摩耗性、耐熱性および耐炎性に優れたゴムホース（ブリヂストン製、O.K.EXCEL）を使用した。試験時の環境条件は、実用を考慮して特別な制御は行っておらず、試験装置周辺の外気の温度は 13~34°C、相対湿度は 34~62%であった。噴射タンクに流入する圧縮空気の相対湿度は 23~46%であった。

3. 試験結果および考察

3.1 連続噴射

Fig. 4 に、連続噴射試験の各測定値の経時変化を示す。グラフの最上段はセンサーから得られた電圧（分解能：1 mV）、2 段目と 3 段目は噴射タンクに入る空気の流量（分解能：10 L/min）と圧力（分解能：4 kPa）、最下段は PC による電磁弁の開閉信号である。

電圧の経時変化には、電磁弁を開いた直後の 5 秒間に最初のピーク波形（以下、前ピーク）が見られる。これは、噴射タンク内の圧力が無加圧状態から増加して、増粘着材が最初に押し出されたことを意味する。その後の 25 秒間は、電圧にわずかな減少傾向が見られるが大きな変動はないので、増粘着材の流量は比較的安定している。電磁弁を閉じると、前ピークよりも大きいピーク波形（以下、後ピーク）が見られるが、これは水平管内の圧力が急速に低下するのに対し、噴射タンク内には残圧があり、この差圧によって生じた気流が増粘着材を鉛直管の上端から輸送管に移動させたためである。すなわち、連続噴射試験における電圧の経時変化には、前ピーク、安定した波形、比較的大きい後ピークの 3 つの状態が見られる。

なお、空気の流量と圧力は電磁弁の開閉と連動するが、

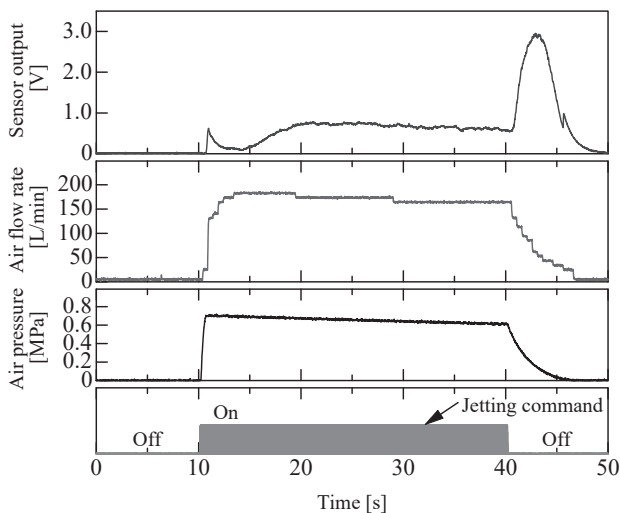


Fig. 4 Bench test performed with continuous jetting

空気タンク内の圧力の低下に伴ってわずかに減少した。連続噴射における空気消費量は 92 L、増粘着材の噴射量は 14 g であった。

3.2 間欠噴射

Fig. 5 に、等間欠噴射試験の各測定値の経時変化を示す。電磁弁の開の設定時間 T_0 と閉の設定時間 T_c が 0.5 s のとき (Fig. 5a)、電圧の経時変化は連続噴射と同様に 3 つの状態になるが、前後ピーク間の波形には電磁弁の開閉周期と同じ脈動が見られた。 $T_0 = T_c = 1.0$ s に変更すると脈動の振幅は大きくなった (Fig. 5b)。 $T_0 = T_c = 2.0$ s では脈動の振幅はさらに大きくなり、個々の脈動波形の振幅は後ピークに近づいた (Fig. 5c)。設定時間をさらに長くして $T_0 = T_c = 5.0$ s にすると、脈動波形は後ピークと同じような波形となった (Fig. 5d)。これは、電磁弁を閉じておく時間が長くなり、噴射タンク内の残圧によって増粘着材が気流とともに輸送管に移動し、後ピークと同様の条件が成立したためと考えられる。なお、空気の流量と圧力の変動は、電磁弁の開閉と一致しており、周期ごとに見られる最大値は連続噴射時の値と同程度であった。

3.3 増粘着材の噴射量

Fig. 6 に、等間欠噴射における増粘着材の噴射量 M の測定結果を示す。 $T_0 = T_c = 0.5$ s のとき $M = 14$ g であり、連続噴射時の値と同じであった。しかし、 T_0 と T_c の増加とともに M は大きくなり、同図の右側縦軸からわかるように、連続噴射時に対する間欠噴射時の物理量の比 R は最大で 80% 増加した。噴射量の増加の原因として、電磁弁を閉じるたびに後ピークと同様の現象が生じたことが挙げられる。一方、 $T_0 = T_c > 3.5$ s で M が減少したのは、電磁弁を閉じる時間が長くなりすぎて、増粘着材の平均流量が下がったためと考えられる。

Fig. 7 は、不等間欠噴射における M と T_c の関係を示したものであり、パラメータは T_0 である。 T_c を大きくすると後ピークと類似の現象によって M は連続噴射時の値を越えて大きくなった。なお、 $T_0 \leq 1.5$ s では M への影響はほとんどないが、 T_0 をさらに大きくすると後ピークの周期回数の減少によって M は低下した。

3.4 空気消費量

Fig. 8 に、等間欠噴射における空気消費量 Q の測定結果を示す。 T_0 と T_c の増加とともに Q は減少し、 $T_0 = T_c = 5.0$ s では連続噴射時の値の 64% になった。なお、空気消費量は、噴射タンク内の増粘着材の充填量にはほとんど影響しなかった。

Fig. 9 は、不等間欠噴射における Q と T_c の関係を示したものであり、パラメータは T_0 である。同図より、 Q は T_c の増加および T_0 の減少とともに小さくなるのがわかる。

3.5 間欠噴射の効率化

Fig. 10 に、間欠噴射における増粘着材の噴射量を空気消費量で除した値を評価指標 M/Q として示す。 M と Q は、 T_c と T_0 に対して独立に変化するので、両者を組み合わせた M/Q はさらに複雑になるが、 T_c と T_0 に対して

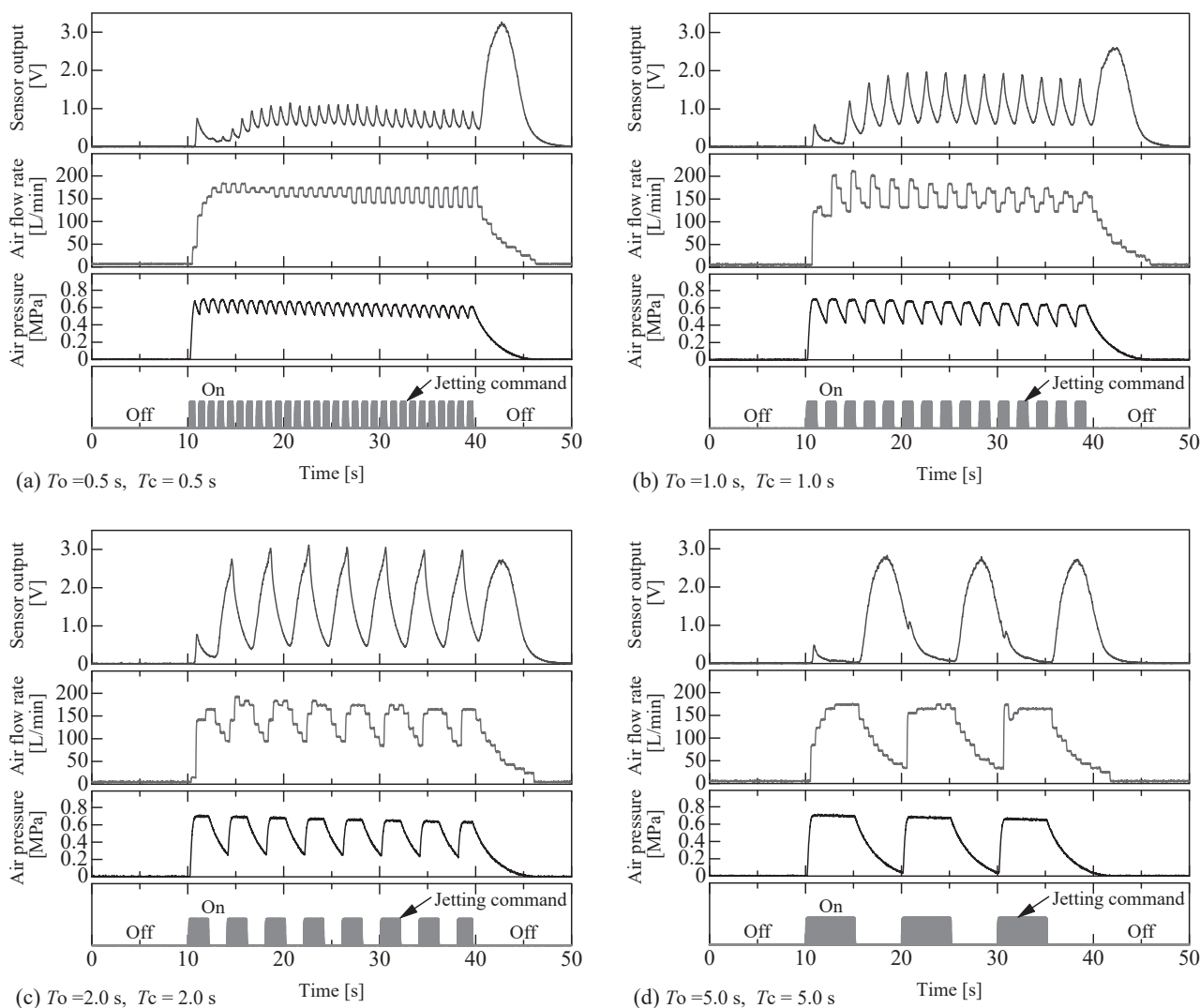


Fig. 5 Bench test performed with intermittent jetting at various valve opening and closing times, T_o and T_c

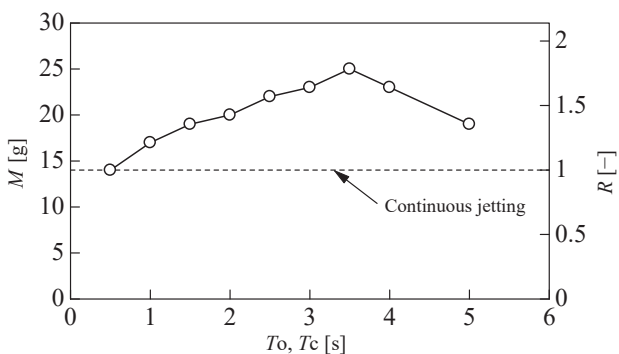


Fig. 6 Mass of particles jetted under continuous and intermittent modes

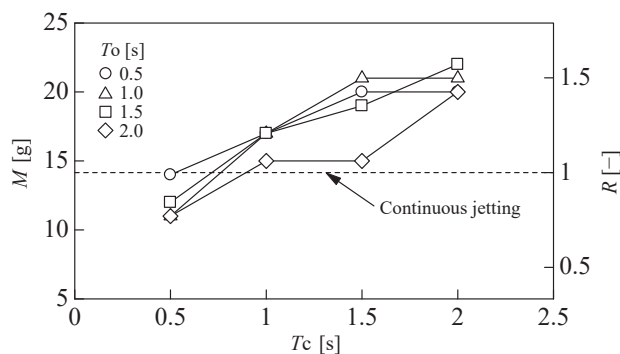


Fig. 7 Mass of particles jetted under various operation modes

全体的傾向は認められる。すなわち、 M/Q は T_c の増加および T_o の減少とともに大きくなるが、 T_c の効果の方が顕著である。ここでは $T_c = 2.0$, $T_o = 0.5$ または 1.0 s において M/Q が高い値を示しており、効率的な噴射条件といえる。なお、本研究では噴射タンク内のニードル弁の開度を一定にして試験を行っており、 $T_c = 0.5$ で $T_o = 1.0$,

$T_o = 1.5$, $T_o = 2.0$ の条件を除いて連続時よりも間欠時の粒子の噴射量の方が多かった。間欠噴射でも連続噴射と同等の噴射量 14 g を標準としてニードル弁の開度を調節すると、空気消費量はさらに少なくなるので、エアコンプレッサーの起動回数および稼働時間を減らせることになり、省エネルギー化も図れる。

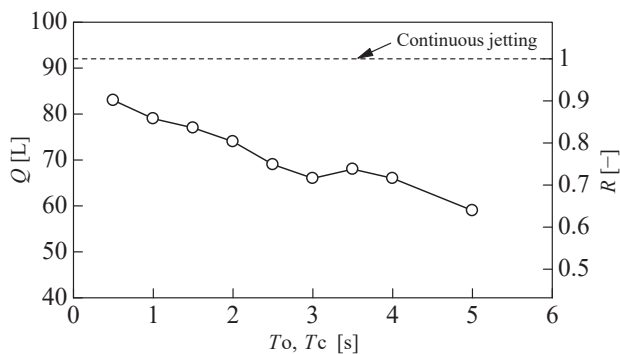


Fig. 8 Air consumption for continuous and intermittent modes

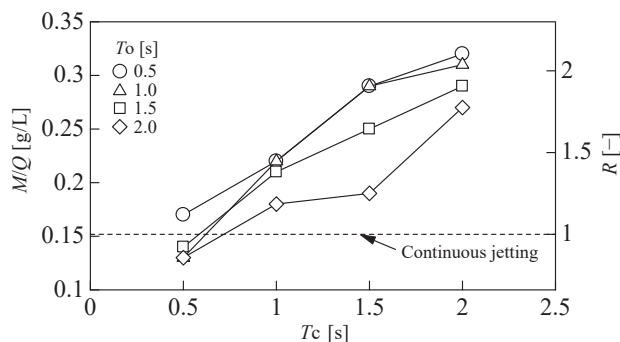


Fig. 10 Evaluation of operation modes

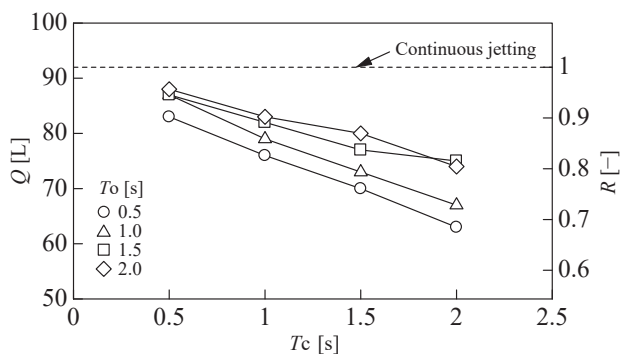


Fig. 9 Air consumption for various operation modes

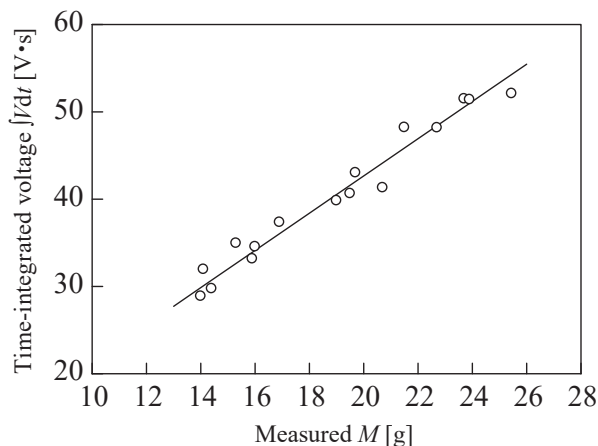


Fig. 11 Correlation between the time integral of the sensor's voltage output and the mass of jetted particles measured

3.6 増粘着材噴射量の推定

Fig. 11 に、間欠噴射においてセンサーから得られた電圧の時間積分値 $\int V dt$ と実測値 M の関係を示す。両者は比例関係にあり、最小二乗法により得られた近似直線は $\int V dt = 2.13 M$ であった。すなわち、噴射量への換算係数は $0.469 \text{ g}/(\text{V}\cdot\text{s})$ であった。連続噴射における換算係数は $0.485 \text{ g}/(\text{V}\cdot\text{s})$ であり、両者の相対誤差は 3% なので良好な結果といえる。

Fig. 12 は、センサーから得られた電圧の時間積分値に換算係数を乗じて求めた推定噴射量に対して実測噴射量を示したものであり、相対誤差は約 5% の範囲であった。従来、増粘着材の噴射量を把握するには、ろ布で回収した増粘着材の質量を測定しなければならなかったが、本センサーを使用することによって簡便に噴射量が求められるようになった。今後は、実車両において増粘着材の間欠噴射による滑走防止ならびに空気消費量の低減・省エネ化を検証する予定である。

4. 結 言

鉄道車両に搭載されている増粘着材噴射装置の効率的な利用方法を検討するために連続噴射と間欠噴射を実施し、静電気式粉体流量センサーを用いて増粘着材の噴射状態および空気の消費量を評価した。また、センサーの出力値から噴射量を推定する方法を検討した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 本センサーは、連続噴射だけでなく間欠噴射においても増粘着材の噴射状態を適切に検出できる。

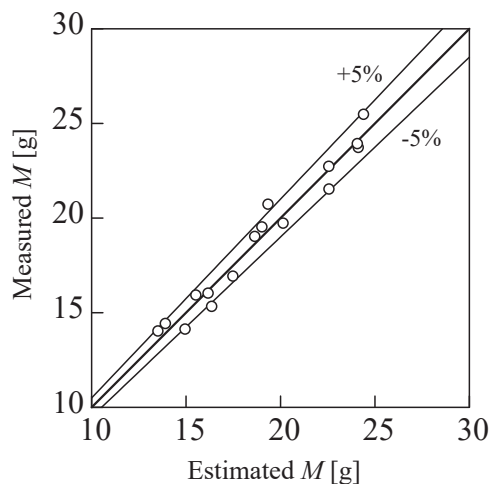


Fig. 12 Measured and estimated jetted particle mass

- (2) 間欠噴射は、連続噴射に比べて増粘着材の噴射量を増加させて空気消費量を低減できるので効率的な方法といえる。また、空気消費量の低減により、エアコンプレッサーの起動回数および稼働時間を減らせるので省エネルギー化も図れる。
- (3) センサーから得られた電圧の時間積分値に換算係数を乗じることによって増粘着材の噴射量を推定できる。

[謝辞] 本研究を遂行するにあたって、研究に関する有益なご助言をいただいた山下道寛氏（公益財団法人 鉄道総合技術研究所）ならびに試験装置に関する専門的な知識

を提供していただいた坂本 博氏（一般社団法人 日本鉄道車両機械技術協会）に深く感謝いたします。

Nomenclature

M	: mass of jetted particles	[g]	T_c	: solenoid valve closing time for intermittent jetting	[s]
M/Q	: ratio of jetted particle mass to air consumption	[g/L]	T_o	: solenoid valve opening time for intermittent jetting	[s]
Q	: air consumption	[L]	t	: operation time	[s]
R	: physical quantity ratio of intermittent to continuous jetting	[-]	V	: sensor's voltage output	[s]

References

- [1] F. Marcus, S. Ferenc, F. Matteo, J. Steffen, Impact of slip at low adhesion conditions caused by various contaminants, Europe's Braking Technology Conference & Exhibition (2019) EB2019-IBC-021.
- [2] H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact, *Wear* 253 (2002) 75–81.
- [3] N. Kumagai, I. Hasegawa, K. Kawaguchi, A Study on mechanisms of wheel flat occurrence and wheel skid, *Q. Rep. RTRI* 34 (1993) 103–110.
- [4] T. X. Mei, J. H. Yu, D. A. Wilson, A mechatronic approach for anti-slip control in railway traction, *Proceedings of the 17th World Congress (IFAC'08)* (2008) 8275–8280.
- [5] H. Yamazaki, M. Nagai, T. Kamada, A study of adhesion force model for wheel slide protection control, *JSME Int. J., Ser. C* 47 (2004) 496–501.
- [6] J. J. Choi, S. H. Park, J. S. Kim, Dynamic adhesion model and adaptive sliding mode brake control system for the railway rolling stocks, *Proc. IMechE, Part F* 221 (2007) 313–320.
- [7] M. A. Cimen, O. Ararat, A new adaptive slip-slide control system for railway vehicles, *Mech. Syst. Signal Process.* 111 (2018) 265–284.
- [8] K. Ohno, T. Ban, K. Gushima, S. Ohe, K. Honda, Application of adhesion improvement material jetting to prevent wheel skidding and slipping, *Railway Research Review* 59 (2002) 10–13.
- [9] H. Masuda, S. Matsusaka, S. Akiba, H. Shimomura, Electrification of fine particles in gas-solids pipe flow, *KONA Powder Part. J.* 16 (1998) 216–222.
- [10] D. I. Armour-Ch'elu, S. R. Woodhead, Comparison of the electric charging properties of particulate materials in gas-solids flows in pipelines, *J. Electrostat.* 56 (2002) 87–101.
- [11] S. Matsusaka, H. Masuda, Electrostatics of particles, *Adv. Powder Technol.* 14 (2003) 143–166.
- [12] K. Gushima, H. Sakamoto, K. Ohno, M. Tokita, K. Saito, H. Masuda, Measurement of mass flow rate of particles in gas-solid suspension flowing in pipe, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 42 (2005) 708–714.
- [13] K. Gushima, T. Tomioka, H. Sakamoto, M. Tokita, K. Watanabe, S. Matsusaka, S. Hasebe, Application of particle flow-rate sensor based on the electrostatic measurement method to railway vehicle, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C* 74 (2008) 1374–1380.
- [14] K. Gushima, H. Sakamoto, M. Tokita, K. Watanabe, S. Matsusaka, S. Hasebe, Wheel slide detection and control system using ceramic-particle jetting, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C* 76 (2010) 1406–1412.
- [15] K. Gushima, S. Matsusaka, S. Hasebe, A Study on durability and reliability of particle flow-rate sensor using static electricity, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A* 77 (2011) 1540–1553.
- [16] K. Gushima, H. Sakamoto, S. Matsusaka, Discriminating flow state of ceramic particles to prevent wheel sliding in railway vehicles, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 59 (2022) 556–562.