

自動車交通に由来するブレーキ摩耗粒子とタイヤ摩耗粒子の大気環境への排出

Emissions of Brake and Tire Wear Particles from Vehicle Traffic into the Atmosphere

一財) 自動車研 (非) *萩野 浩之

Hiroyuki Hagino*

*Japan Automobile Research Institute

1. はじめに

自動車で使用されているブレーキやタイヤは、使用することで摩耗し、同時に摩耗粒子が発生し、大気へ排出される。ブレーキ摩耗粒子やタイヤ摩耗粒子の大気濃度は、PM_{2.5} (空気力学粒径 2.5 μm 以下の粒子状物質) でブレーキ摩耗粒子は 0.8 ng/m³、タイヤ摩耗粒子は 0.4 ng/m³ と推計され¹⁾、我が国では概ね環境基準が達成している PM_{2.5} 環境基準値 15 μg/m³ と比べると、ブレーキ摩耗粒子で 0.0053%，タイヤ摩耗粒子で 0.0027% と極わずかな寄与率となる。一方で、地球規模の海洋に流入するマイクロプラスチックの観点からは、タイヤ摩耗粒子は路面から海洋や河川へ輸送される 420 kt/year²⁾ (全体の 28%) のうち、大気へ排出されるわずかな摩耗粒子の 100 kt/year¹⁾ (タイヤ摩耗の 24%) が、海洋プラスチックへの重要な供給源となり得る (Fig. 1)³⁾。これらの結果は、都市部と比べて濃度が低い一般的な大気環境を対象とした推計結果である。一方、都市部においては、自動車由来の排出粒子に対してブレーキ摩耗粒子は 55%程度を占めることや⁴⁾、これら粒子状物質による健康影響が指摘されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

このような背景を受けて、世界で先行して欧州では、自動車の環境規制として⁸⁾、ブレーキについては大気へ排出される摩耗粒子の排出規制 (ブレーキ粒子規制)、タイヤについては摩耗量の規制 (タイヤ摩耗規制) が、それぞれ導入されることになっている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。このため本講演では、自動車交通に由来するブレーキ摩耗粒子やタイヤ摩耗粒子の測定研究に関する現状 (概略) と課題について情報を整理する。

2. ブレーキ摩耗粒子

欧州における自動車の環境規制である Euro 7において、大気へ排出されるブレーキ摩耗由来の粒子は、ブレーキ粒子と定義されている。乗用車と小型商用バンでは、2026 年 11 月末までに新車に対して施行され、2027 年 11 月末までのすべての小型車が対象として施行される予定である⁸⁾。大型車では、新たな計測法を 2026 年 3 月に提案し、欧州委員会 (EC, European Commission) により 2027 年 12 月に Euro 7 規制値が提案され、2030 年 1 月から施行される計画となっている⁹⁾。ブレーキ粒子の計測法は、欧州委員会における GRPE (Groupe de travail de la pollution et de l'énergie) 傘下にある PMP (Particle Measurement Programme Informal Working Group) において、世界技術規則第 24 号 (GTR24) を試験法が構築されている。

GTR24 は、乗用車・小型商用車に使用されるブレーキから排出されるブレーキ粒子質量 (Particle Mass) および粒子個数 (Particle Number)，それぞれの排出量 (以下、ブレーキエミッション) 測定に関する世界的に調和された手順である¹¹⁾¹²⁾。世界共通の走行サイクル WLTP-Brake Cycle (Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure-Brake Cycle)¹³⁾をブレーキダイナモータ試験で再現し、ブレーキエミッションを測定する (Fig. 2)。ブレーキ粒子の計測は、エンクロージャの風下側に接続してあるサンプリングトンネルから計測する。PM 測定 (PM₁₀ と PM_{2.5}) のためにはブレーキ粒子をフィルタで捕集し (Fig. 2 に示す、Before, PM_{2.5}, PM₁₀ ならびに、PM₁₀ それぞれの写真)，PN 測定 (SPN₁₀ (粒径 10 nm~2.5 μm の固体粒子の粒子個数) と TPN₁₀) (粒径 10 nm~2.5 μm の揮発性粒子を含む全粒子個数) のためには各種計測機器でブレーキ粒子を連続測定する。Euro7 で規制値が設定されている PM₁₀ は、試験前後で測定するブレーキの摩耗量と相関関係があり¹⁴⁾、ブレーキ摩耗量はブレーキパッドの材質 (摩擦材) に依存する¹⁴⁾。近年では、ディスク (相手材) の DLC (Diamond-Like Carbon) コーティング技術により、ブレーキエミッションの

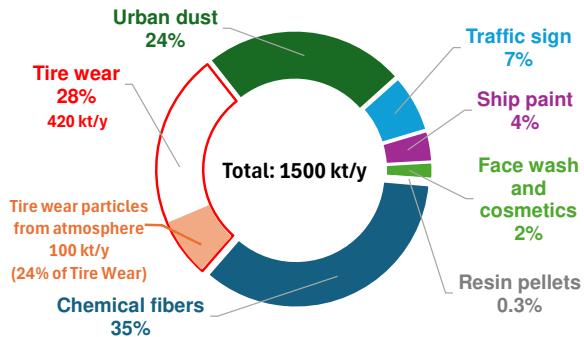


Fig. 1 Sources and Components of Microplastics in the Ocean^{1) 2)}

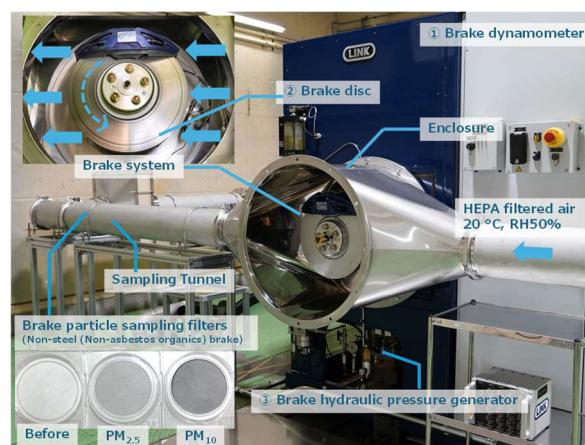


Fig. 2 Example of test facility for brake emission measurement (with enclosure open)¹⁴⁾

低減が検討されている¹⁵⁾。コーティング技術は、コーティング材質と摩擦材の組み合わせによりブレーキエミッションが増加する場合がある¹⁵⁾¹⁶⁾。例えば、Fig. 3 は硬度が異なる 2 種類の鉄ディスク (GCI (FC170) と GCI (FC200)), 軟窒化炭素処理 (NC), 超硬質セラミックコーティング (SCC: Superhard Ceramic-Coating) それぞれのディスクに対し、NS (NAO) (Non-Steel (Non-Asbestos Organics)) と LS (ECE) (Low-Steel (ECE Regulation 90 complacence)) それぞれから排出されるブレーキ粒子を評価した結果である¹⁵⁾。NS (NAO) パッドに対し、ディスク材を、GCI (FC170), GCI (FC200), NC, SCC の順に硬度が高くすることで、耐摩耗性が向上し、PM の排出が減少していることを示している。一方、LS (ECE) では、NC ディスクの PM の排出が増加している。LS (ECE) パッドと NC ディスクの組み合わせでは、ディスク表面にピット (数 10 μm の小さなへこみや溝), 摩耗片粒子の堆積, 接触プラトー (contact plateau, 表面の突起部) の形成が確認された。一方で、SCC ディスクでは表面上に上に大きな凹状のピットや摩耗片粒子の堆積が存在しなかった。このため、試験時にディスク摩耗面の粗さが大きく変化したことによるものと考えられている¹⁵⁾。このように、ブレーキ粒子に寄与する複雑な摩耗メカニズム解明は研究課題となっている。

3. タイヤ摩耗粒子

タイヤ摩耗粒子は、路面摩耗粒子との分離が容易ではないことから、Euro7 では計測の安定性を考慮してタイヤ摩耗量で規制・管理される。規制値の定義は、乗用車用タイヤ (C1 クラス) は 2025 年 9 月、小型貨物用タイヤ (C2 クラス) は 2027 年 9 月、中・大型のバス・貨物車用タイヤ (C3 クラス) は 2029 年 9 月に設定される予定である¹⁰⁾。試験方法は、欧州委員会の傘下にある GRBP (Groupe de travail du bruit et des pneumatiques) により、タイヤ摩耗を測定する手順を開発し、タイヤの型式承認に関する国連規則第 117 号の改正案が作成される予定である¹⁰⁾。開発される試験法は、実車走行を模擬した設備を用いる室内試験法 (Fig. 4)¹⁷⁾¹⁸⁾と道路走行による実車試験法の 2 種類となっている¹⁹⁾。

大気経由で環境への影響を評価するために、タイヤ摩耗粒子を計測するための研究や国際基準法が提案されている。タイヤ摩耗粒子は、路上粉塵との混合物として生成するため、タイヤ摩耗粒子の寄与分を評価するためには、走行により生じた粒子中に含まれるタイヤトレッドの量を評価するための分析技術が必要である。さらに、タイヤ摩耗粒子が発生するのは、タイヤに摩擦力が掛かる瞬間的な事象によるものであるため、通常はタイヤ摩耗粒子を連続的かつ安定的に発生させるのは困難である。このため、タイヤ摩耗粒子の秤量や分析を精度良く行うために、タイヤ摩耗粒子を再現良く発生させることが可能な試験方法を検討している段階にある。Fig. 4 は、室内試験法によりタイヤ粒子の計測する設備の例を示している。タイヤの力学評価を用いるためのインナードラム試験機のドラム内面に実際のアスファルト路面を施工することで、実路と同等の試験が実施できるものと期待している (ISO/TS22638¹⁸⁾によるタイヤ摩耗粉塵発生方法を参考としている)。しかし、タイヤ摩耗粒子の排出量は、実路の 1/10 程度と非常に少なく大きな乖離が見られており、タイヤの摩耗量 (試験前後のタイヤ重量変化) も実路と大きく異なる。この室内と実路の差異は、路面の粗さが、タイヤ摩耗量に影響を与える大きな要因となっている¹⁷⁾。また、タイヤ摩耗粒子に含まれるブラックカーボン粒子 (BC) を指標とすると、タイヤの種類 (タイヤ摩耗粒子 (BC) の排出多さ: スタッドレスタイヤ > エコタイヤ > コンフォートタイヤ) (Fig. 5²⁰⁾) や、タイヤ 1 輪あたりに係る荷重 (貨物車のリア・ダブルタイヤは荷重が 1/2 となるため、タイヤ 1 輪あたりのタイヤ摩耗粒子の排出濃度が低くなる) による影響も指摘されている²⁰⁾。

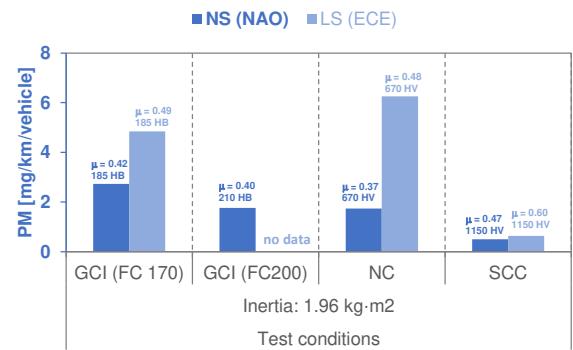


Fig. 3 Comparison of PM emissions from different combinations of disc (GCI: Gray Cast Iron, NC: Nitro-Carburing, SCC: Superhard Ceramic-Coating) and friction materials (NS: Non-Steel, NAO: Non-Asbestos Organics, LS: Low-Steel, ECE: ECE Regulation 90 complacence) (figure by author from Jeong et al. reported values¹⁵⁾)

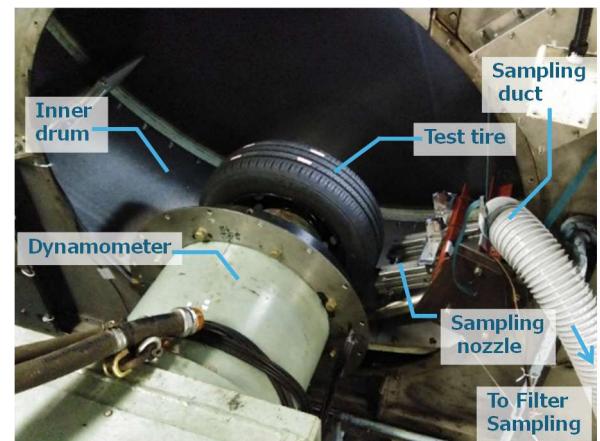


Fig. 4 Example of test facility for tire emission measurement¹⁷⁾



Fig. 5 Comparison of black carbon concentration in tire wear particles with tire positions and types (Passenger car, straight road, 0.3G)²⁰⁾

4. おわりに

自動車交通に由来するブレーキ摩耗粒子とタイヤ摩耗粒子の研究に対し、その現状と課題について情報を整理した。ブレーキ摩耗粒子とタイヤ摩耗粒子の排出は、そのシステム（物理的な機構）だけでなく、材質（摩擦材と相手材）との組み合わせ（化学的な要素）も寄与する。さらに、それら粒子の排出は、走行条件にも大きく依存することから、円滑な交通流を導く道路構造（都市工学）、運転者の心がけ（人間工学）にも起因する。したがって、自動車交通に由来する摩耗粒子の低減に関する技術的な解決には、幅広く横断的な協調が必要である。当日の講演では、各摩耗粒子の生成と排出に関して、文献などに基づいてより詳細なメカニズムと今後の課題について講じる予定である。本講演が、持続可能なより良い未来の環境を築くために、関係者にとって技術的な解決の一助となれば幸いである。

謝辞

本講演は、JSPS 科研費 JP22K03895、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20225003) により文献調査の一部を実施した。

文献

- 1) Evangelou et al.: Atmospheric Transport is a Major Pathway of Microplastics to Remote Regions, *Sci. Report*, 11 (2020) 3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>
- 2) Boucher, J. and Feriot, D.: Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources, IUCN, Global Marine and Polar Programme, (2017). <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf>
- 3) 萩野浩之: 自動車交通に由来するブレーキ摩耗粒子、タイヤ摩耗粒子、道路摩耗粒子の大気中マイクロプラスチック研究の現状と課題、エアロゾル研究, 38, 3 (2023) 160–172. <https://doi.org/10.11203/jar.38.160>
- 4) Grigoratos and Martini: Brake Wear Particle Emissions: A Review, *Environ Sci Pollut Res Int.*, 17, 22 (2014) 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- 5) Daellenbach et al.: Sources of Particulate-Matter Air Pollution and Its Oxidative Potential in Europe. *Nature*, 587 (2020) 414–419. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>
- 6) O'Sharkey et al.: Associations between Brake and Tire Wear-Related PM_{2.5} Metal Components, Particulate Oxidative Stress Potential, and Autism Spectrum Disorder in Southern California, *Environ. Int.*, 185 (2024) 108573. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108573>
- 7) Miguel et al.: Latex Allergens in Tire Dust And Airborne Particles. *Environ. Health Perspect.* 104 (1996) 1180–1186. <https://doi.org/10.1289/ehp.961041180>
- 8) United Nations: Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council. Document 32024R1257 (2024). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj/eng>
- 9) Grigoratos et al.: Task force on HD Brake Particle Emissions, JRC's Proposal on Way Forward, Particle Measurement Programme Informal Working, <https://wiki.unece.org/download/attachments/273678359/TF%20Proposed%20Way%20Forward.pdf?api=v2>
- 10) Task Force on Tyre Abrasion on Behalf of GRBP and GRPE: Status Report to 80th GRBP (2024). <https://wiki.unece.org/download/attachments/258703472/TA-26-2v1%20GRBP-80-x%20-%20status%20report%20TF%20TA.pptx?api=v2>
- 11) United Nations: Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles, Addendum 24: UN Global Technical Regulation No. 24, ECE/TRANS/180/Add.24 (2023). <https://unece.org/transport/documents/2023/07/standards/un-gtr-no24-laboratory-measurement-brake-emissions-light-duty>
- 12) 萩野浩之: 世界技術規則第 24 号に基づいた室内試験による 乗用車・小型商用車のブレーキエミッション計測, *JARI Research Journal* (2024) JRJ20241102. <https://doi.org/10.60458/jarijr.JRJ20241102>
- 13) Mathissen, et al.: A Novel Real-World Braking Cycle for Studying Brake Wear Particle Emissions. *Wear*, 414-415, (2018) 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.020>
- 14) Hagino, H.: Brake Wear and Airborne Particle Mass Emissions from Passenger Car Brakes in Dynamometer Experiments Based on the Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure Brake Cycle. *Lubricants*, 12, 206 (2024), <https://doi.org/10.3390/lubricants12060206>
- 15) Jeong et al.: Dynamometric Investigation on Airborne Particulate Matter from Automobile Brake: Impact of Disc Materials on Brake Emission Factor. *Lubricants*, 11 (2023) 526. <https://doi.org/10.3390/lubricants11120526>
- 16) Lyu et al.: Tribology and Airborne Particle Emissions from Grey Cast Iron and WC Reinforced Laser Cladded Brake Discs. *Wear*, 556–557 (2024) 205512. <https://doi.org/10.3390/coatings14101259>
- 17) 利根川ら: タイヤ摩耗粉塵計測法の開発と全国排出量分布の作成に向けた取り組み, 第 64 回大気環境学会年会要旨集 (2023) 1B1610-2.
- 18) International Standard: Rubber — Generation and Collection Of Tyre and Road Wear Particles (TRWP) — Road Simulator Laboratory Method, ISO 22638:2024 (2024). <https://www.iso.org/standard/84313.html>
- 19) Economic Commission for Europe: World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, ECE/TRANS/WP.29/1164 (2024). <https://unece.org/sites/default/files/2024-11/ECE-TRANS-WP.29-1179e.pdf>
- 20) 利根川ら: タイヤ摩耗粉塵を含む非排気由来の粒子排出実態に関する研究乗用車および貨物車から排出されるタイヤ摩耗粉塵の計測, 第 65 回大気環境学会年会要旨集 (2024) P-83.