

没食子酸水溶液による低粘着効果とフェノール性ヒドロキシ基の役割

Low adhesion effect of gallic acid solution and the role of phenolic hydroxyl groups

鉄道総研（正）*生駒 一樹 鉄道総研（非）佐藤 和志 鉄道総研（正）幸野 真治

Kazuki Ikoma*, Kazushi Sato*, Masaharu Kono*

*Railway Technical Research Institute

1. はじめに

鉄道車両は車輪／レール間の粘着力を利用して起動・加速・減速を行うため、粘着力制御は不可欠である。特に秋季の山間勾配線区では、鉄道車両の空転や滑走が起りやすいことが知られている。これは、レールの頭頂面（車輪との摩擦面）に落葉由来の黒色皮膜が形成され、粘着力の低下を引き起こすためである¹⁾。先行研究では、この黒色皮膜の形成に植物由来のポリフェノール成分であるタンニンが関与し¹⁾、さらに、加水分解性タンニンの一種であるタンニン酸が粘着力低下に寄与することを室内摩擦試験によって明らかにしている²⁾。また、タンニン酸の基本骨格である没食子酸（芳香族カルボン酸であると同時に、3つのフェノール性ヒドロキシ基を有するフェノール類にも分類される）も粘着低下に関与することが示されている³⁾。

本研究では、没食子酸による低粘着発現に対するフェノール性ヒドロキシ基の役割に着目し、二円筒転がりすべり摩擦試験を実施したので報告する。

2. 試験方法（二円筒転がりすべり摩擦試験機）

図1に示す二円筒転がりすべり摩擦試験機を用い、実物の50 kgN レール頭部から切り出したレール試験片（311 HV）と、車輪材料であるSSW-Q1Sのブロック材から切り出した車輪試験片（283 HV）の摩擦試験を実施した。両試験片の直径はともに30 mmであるが、片当たりを防止するため、摩擦面は車輪試験片が平面、レール試験片がR300 mmの円弧形状としている。試験条件を表1に示す。本試験機は、各試験片に直結されたモータにより、任意の回転速度 V およびすべり率 s （式（1））での試験が可能である。また、荷重を付与した状態で試験片を回転させると接触部に摩擦力が生じ、その力を試験片近傍に取り付けたロードセルによって計測できる。

$$s = \frac{V_{\text{wheel}} - V_{\text{rail}}}{V_{\text{wheel}}} \times 100 \quad (1)$$

車輪／レール間のトラクション係数（＝摩擦力／荷重）は、すべり率の増大につれて飽和し、その極大値が粘着係数と定義される⁴⁾。本試験では、介在溶液による粘着係

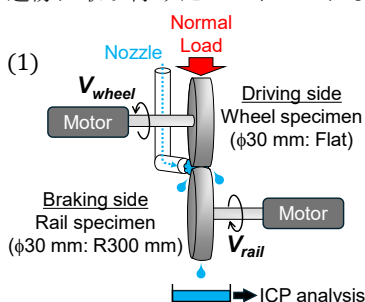


Fig.1 Twin-disk rolling sliding frictional tester.

Table 1 Friction test conditions.

Rotation speed	495 min ⁻¹ (Equivalent to 2.8 km/h)
Test time	30 min
Normal load	450 N (Equivalent to 1000 MPa)
Slip ratio	Increase in steps from 0 % to 3.0 % (Each slip ratio is held for 10 seconds)
Supplied solution	Distilled water with or without gallic acid
Supplied volume	About 1 mL/min
Specimen	Wheel (Driving side), Rail (Braking side)

数の違いを評価するため、試験中に制動側の回転速度を制御し、すべり率を0%から3.0%まで連続的（10秒ごとに約0.02%ずつ増加）に変化させた。車輪試験片を駆動側（回転速度一定）に、レール試験片を制動側（回転速度を連続的に低下させる）に取り付けた。また、摩擦面には、試験片後方に設置したノズルと定量ポンプを用いて、溶液を約1 mL/minの流量で試験開始から終了まで連続的に供給した。供給した各溶液は、表2に示す、異なる数のフェノール性ヒドロキシ基を有する3種類のフェノール系有機酸を、蒸留水に添加・溶解して調整したものである。供給された溶液は、摩擦面介在後に、摩耗粉を含んで試験片の下部に滴下する。この溶液を回収し、高周波誘導結合プラズマ（ICP）発光分光分析により、溶液中の鉄分濃度 c (ppm)を分析した。また、式（2）、（3）より比摩耗量 k (mm³/m・N)を算出した。

$$W = \frac{c \cdot q \cdot t}{1000 \cdot \rho} \quad (2)$$

$$k = \frac{W}{W \cdot \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \left(\frac{s(t)}{100} V_{\text{wheel}} L \right) dt} \quad (3)$$

ここで、 q ：溶液供給量 (mL/min)、 t ：試験時間(min)、 ρ ：密度 7.85 (mg/mm³)、 $L = 2\pi r$ ：試験片周長 (m)、 r ：試験片半径(m)、 W ：荷重(N)

Table 2 Phenolic organic acids used in friction tests.

Additives for distilled water	Gallic acid (GA, MW: 170.12)	3,4-Dihydroxybenzoic acid (3,4-DA, MW: 154.12)	4-Hydroxybenzoic acid (4-HA, MW: 138.12)
Concentration, mol/L	0.00059, 0.00294, 0.00588	0.00065, 0.00324, 0.00649	0.00072, 0.00362, 0.00724

3. 試験結果・考察

3.1 粘着特性

最大濃度の各フェノール系有機酸溶液を供給した際のトラクション係数 μ の変化を図2に示す。前述のとおり、すべり率の増加にともない、トラクション係数は飽和傾向を示している。試験終了時点での比較では、蒸留水および4-HAに比べてGAおよび3,4-DAの方がトラクション係数は低く、GA（濃度 0.00724 mol/L）供給条件では $\mu=0.1$ である。

本研究では、すべり率 2.5~3.0%の範囲におけるトラクション係数の平均値を粘着係数 μ_{ad} として算出した。粘着係数 μ_{ad} とフェノール系有機酸添加濃度との関係を図3に示す。4-HAでは濃度にかかわらず μ_{ad} が一定であるのに対し、GAや3,4-DAは添加濃度の増大につれて μ_{ad} は低下している。その低下幅は3,4-DAに比べてGAの方が大きい。

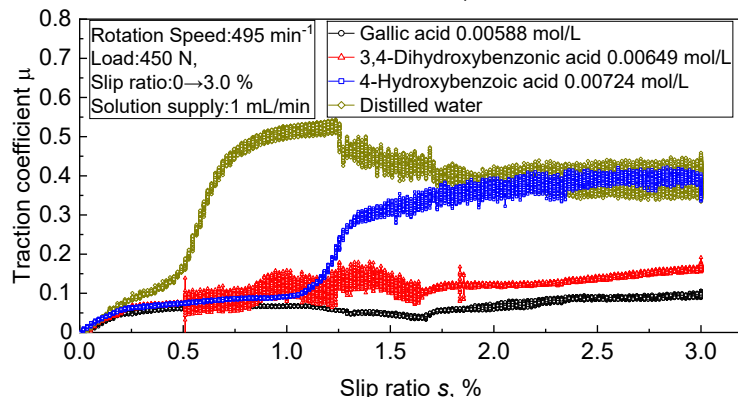


Fig.2 Relationship between slip ratio s and traction coefficient μ for each supply solution condition. The slip ratio s is continuously changed during the test.

3.2 摩耗特性

比摩耗量 k とフェノール系有機酸添加濃度との関係を図4に示す。いずれの溶液でも添加濃度の増加に伴い、比摩耗量は蒸留水供給条件に比べて増加する傾向である。また、4-HAと比較してGAおよび3,4-DAの方がその増加幅は大きい。

3.3 レール試験片摩擦面のラマン分析

図2に示した試験終了後の各レール試験片摩擦面について顕微ラマン分光法によって分析した。ラマン分析結果を図5に示す。

GAおよび3,4-DAを供給した条件では、鉄との錯体皮膜の形成を示す特徴的なピーク（1470 cm^{-1} 付近）が認められる。一方、4HA供給条件でも同様のピークがわずかに認められるが、蒸留水供給条件の摩擦面に認められた酸化鉄の存在を示すピーク（650 cm^{-1} および 1300 cm^{-1} 付近）も同時に認められる。

以上より、フェノール系有機酸に含まれるフェノール性ヒドロキシ基の数が多いほど摩擦面における錯体形成能力が高いと考えられる。また、その数が多いほど粘着係数が低下しやすいことから、錯体形成能力の高さが粘着低減に寄与していると推察される。ただし、粘着低減にともなう摩耗増大は、今後の検討課題である。

文献

- 1) 生駒・鈴木・深貝・幸野・辻江：落葉による車輪空転のメカニズム, RRR, 81, 5 (2024) 28-33.
- 2) T. Ido, K. Ikoma & et.al.: The removal effect of citric acid on black leaf layer on rail surface caused by fallen leaves", 12 th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2022), (2022).
- 3) 生駒・幸野：没食子酸による車輪/レール間のトラクション低減効果, 日本機械学会年次大会講演論文集, (2025) J111-11.
- 4) 陳：走る基本-粘着とは何か-, RRR, 65, 7 (2008) 2-5.
- 5) A. Espina, M. V. Cañamares, Z. Jurašková & S. Sanchez-Cortes: Analysis of Iron Complexes of Tannic Acid and Other Related Polyphenols as Revealed by Spectroscopic Techniques: Implications in the Identification and Characterization of Iron Gall Inks in Historical Manuscripts", ACS Omega, 7, 32 (2022), 27937-27949.

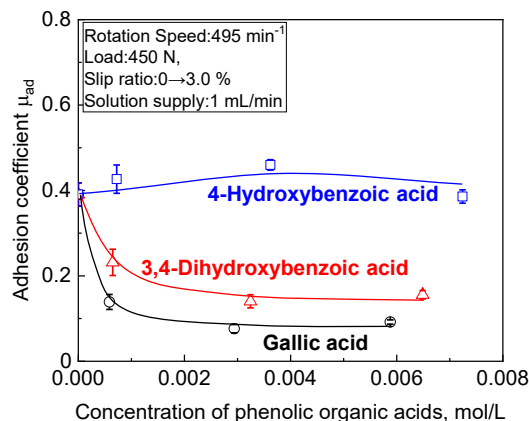


Fig.3 Relationship between the concentration of phenolic organic acids and the adhesion coefficient. Error bars indicate the standard deviation of the adhesion coefficient.

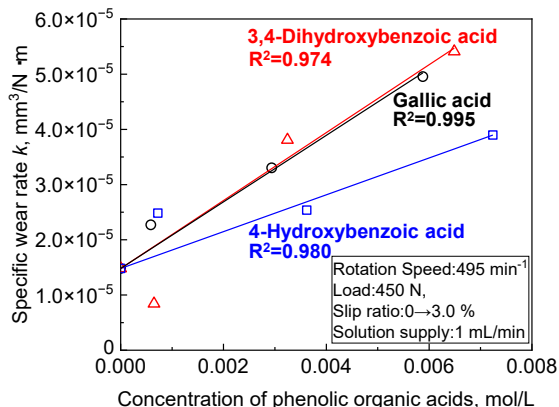


Fig.4 Relationship between the concentration of phenolic organic acids and specific wear volume.

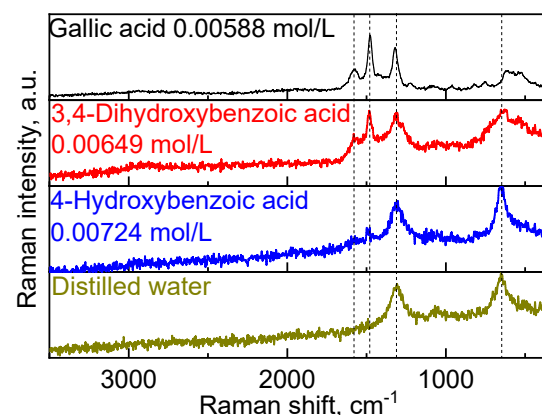


Fig.5 Raman analysis results for the friction surfaces of each rail specimen after the test shown in Fig. 2.