転がり抵抗は摩擦ではない——完全弾性ならゼロになり、速度にも依らない

— 1 t を 1 km 転がすのに要る仕事は、鉄輪とレールで 14.7100 kJ、自動車のタイヤと舗装で 117.6798 kJ で、差は 102.9698 kJ、比はちょうど 8 である — 分離子は、弾性か粘弾性かである — [論文667]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

転がるものが止まるのは摩擦のせいだと考えるのは自然である。だが転がり抵抗はすべり摩擦ではなく、変形して戻るときに返ってこない分である。だから完全に弾性なら 0 になり、速度にも依らない。それを数で示す。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、同じ荷物・同じ距離で、八倍の差がつく——1 t を 1 km 転がすのに、鉄輪とレールは 14.7100 kJ、自動車のタイヤと舗装は 117.6798 kJ で、比はちょうど 8、差は 102.9698 kJ だった（第2節）。 第二に、これが本稿の芯である。正体は、垂直力の作用線が前へずれることである——同じ係数を長さに直すと、鉄輪（半径 0.46 m）で 0.690000 mm、タイヤ（0.32 m）で 3.840000 mm、自転車（0.35 m）で 1.400000 mm のずれになる（第3節）。 第三に、完全弾性なら 0 になる——戻る割合を変えて置くと、失う分に比例して係数が動き、戻る割合が 1（完全弾性）のとき係数はちょうど 0 になった（第3節）。 第四に、速度に依らないことが指紋である——自動車（1500 kg）の転がり抵抗 176.5197 N はどの速度でも同じで、空気抵抗がこれに並ぶのは 73.046099 km/h だった（第4節）。 第五に、低い速度では、ほとんど転がり抵抗だけである——20 km/h での空気抵抗は転がり抵抗の 0.074966 倍、50 km/h で 0.468539 倍、100 km/h でようやく 1.874157 倍になる（第4節）。 第六に、分離子は、弾性か粘弾性かである——面の粗さでも、接触面積でもない。戻るときに返ってこない分があるかどうかである（第4節）。 キーワード：転がり抵抗、転がり抵抗係数、ヒステリシス損失、粘弾性、走行抵抗、鉄道。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——転がり抵抗係数、垂直力の作用線のずれとしての表し方、ヒステリシス損失に由来することは、いずれも既知である（ウォン 2008、ギレスピー 1992）。代表値を使う——転がり抵抗係数、車輪半径、空気抵抗係数と前面投影面積、車両重量は代表値であり、特定の車両の測定値ではない。タイヤの構造を扱わない——ゴムの配合、空気圧、温度、摩耗の効きは主題ではない。粘弾性の模型を解かない——戻る割合を前提として置き、完全弾性の端だけを確かめる。周波数依存や温度依存は扱わない。走行の総合を論じない——登坂、加速、駆動系の損失は入れない。平地の定常だけを見る。既刊との関係：論文449 は「速度を決めるのは出力であってギアではない」ことを示し、射程注記で転がり抵抗 0.005 を代表値として置くと明記した——そこでは係数は入力の一つだった——本稿はその係数の側に入り、それがどこから来るか、なぜ速度に依らないかを数える。加えたのは、1 t·km あたりの仕事で鉄輪とタイヤを並べたこと、係数を垂直力の作用線のずれとして長さに直したこと、戻る割合が 1 のとき係数が 0 になる端を置いたこと、空気抵抗と並ぶ速度を出したこと、分離子を「弾性か粘弾性か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：質量 m の荷を、転がり抵抗係数 C_{rr} の車輪で距離 D だけ転がす。要る仕事と、車輪に働く力は次で書ける。

$$E = C_{rr}\, m\, g\, D, \qquad F = C_{rr}\, m\, g = \frac{e}{R}\, m\, g$$

e は、接地面で垂直力の作用線が前へずれる量、R は車輪の半径である。この書き方には速度が入っていない。

問い：転がるものを止めているのは、面の摩擦か、それとも戻ってこない変形か。

2. 同じ荷物で、八倍の差

計算 2.1：1 t を 1 km 転がすのに要る仕事を、三つの組合せで出した。

組合せ	C_{rr}	1 t を 1 km
鉄輪とレール	0.0015	14.7100 kJ
自転車のタイヤ（高圧）	0.004	39.2266 kJ
自動車のタイヤと舗装	0.012	117.6798 kJ

鉄輪はタイヤのちょうど 8 分の 1 で、差は 1 t·km あたり 102.9698 kJ である。

> **観察 2.2**
>
> この差は、材料の硬さの差ではなく、返ってこない分の差である。鋼の車輪と鋼のレールはほとんど変形せず、変形した分もほぼ戻る。ゴムのタイヤは大きく変形し、戻るときに一部が熱になる——運ぶのに要る仕事の差は、そこで生じている。

3. 正体は、作用線のずれである

計算 3.1：係数を、垂直力の作用線が前へずれる量 $e = C_{rr} R$ に直した。

組合せ	車輪半径	ずれ e
鉄輪とレール	**0.46** m	**0.690000** mm
自動車のタイヤと舗装	**0.32** m	**3.840000** mm
自転車のタイヤ（高圧）	**0.35** m	**1.400000** mm

接地面の前半分では変形が進み、後ろ半分では戻る。戻りきらなければ、前半分のほうが強く押し返す。その不つり合いが、作用線を前へずらす。

計算 3.2：戻る割合に比例する模型を置き、自動車の値（戻る割合 **0.90** で **0.012**）に合わせると、戻る割合 **0.95** で **0.006000**、**0.99** で **0.001200**、**1**（完全弾性）でちょうど **0** になった。

> **観察 3.3**
>
> これが本稿の芯である。完全弾性なら **0** になる。すべり摩擦なら、面を押しつける限り力は残る。転がり抵抗は、戻るときに返ってこない分だけで立っている——だから「返ってこない分」を **0** にすると、接触も荷重もそのままで、抵抗だけが消える。

4. 分離子

計算 4.1：自動車（**1500** kg・$C_{rr} = 0.012$・前面の抵抗の係数と面積の積 **0.70** m^2）について、転がり抵抗と空気抵抗を速度ごとに出した。

速度	転がり抵抗	空気抵抗	空気 ÷ 転がり
20 km/h	**176.5197** N	**13.2330** N	**0.074966**
50 km/h	**176.5197** N	**82.7064** N	**0.468539**
100 km/h	**176.5197** N	**330.8256** N	**1.874157**

二つが並ぶのは **73.046099 km/h** である。転がり抵抗の欄は三行とも同じ値で、速度が入っていない。

> **観察 4.2**
>
> 分離子は、弾性か粘弾性かである。すべり摩擦でもなく、面の粗さでもない。同じ荷重・同じ接触で、戻る割合だけを変えると抵抗が動く——そして速度に依らないことが、その指紋である。粘性の抵抗なら速度に比例し、空気抵抗なら二乗で増える。

> **観察 4.3**
>
> 論文449 と並べる。449 は走行の釣り合いを出力から解き、転がり抵抗 **0.005** を代表値として置いた。そこでは係数は与えられる入力だった——本稿はその中身に入り、**0.0015** と **0.012** の八倍の差が何の差なのかを数えた。

> **観察 4.4**
>
> 言わないこと。タイヤの配合も空気圧も温度も扱わず、粘弾性の模型も解いていない。戻る割合は前提として置いた——示したのは、抵抗が返ってこない分だけで立っていること、その端（完全弾性）で **0** になること、そして速度に依らないことである。

5. 点呼と結び

1. 鉄輪 **14.7100 kJ**（計算 2.1）：**1 t·1 km**。
2. タイヤ **117.6798 kJ**（計算 2.1）：ちょうど **8** 倍。
3. 差は **102.9698 kJ**（計算 2.1）：**1 t·km** あたり。
4. ずれ **0.690000 mm**（計算 3.1）：鉄輪の作用線。

5. タイヤは **3.840000 mm**（計算 3.1）：同じ係数の別の顔。
6. 完全弾性で **0**（計算 3.2）：本稿の芯。
7. **176.5197 N** は速度に依らない（計算 4.1）：三行とも同じ。
8. 並ぶのは **73.046099 km/h**（計算 4.1）：空気抵抗との交点。
9. **20 km/h** では **0.074966** 倍（計算 4.1）：低速ではほぼ転がりだけ。
10. 弾性か粘弾性か（観察 4.2）：分離子・論文449。

結び：転がるものを止めているのは、面のすべりではない。**1 t** を **1 km** 転がすのに、鉄輪は **14.7100 kJ**、タイヤは **117.6798 kJ** で、ちょうど **8** 倍の差がある。この係数は、垂直力の作用線が前へずれる量（鉄輪 **0.690000 mm**、タイヤ **3.840000 mm**）として長さに直せて、戻る割合を **1** にすればちょうど **0** になった——転がり抵抗は、変形が戻るときに返ってこない分だけで立っている。そして速度に依らないことが指紋である——自動車では **176.5197 N** がどの速度でも同じで、空気抵抗が並ぶのは **73.046099 km/h** だった。分離子は、弾性か粘弾性かである。既刊との位置——論文449 が代表値として置いた係数の中身を数えた。正直に言えば——戻る割合は前提として置いた模型であり、タイヤの構造も温度も扱っていない。

参考文献

1. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.
2. Wong, J. Y. (2008). *Theory of Ground Vehicles*. Wiley.
3. 山岸勇輝 (2026). 『速度を決めるのは出力であって、ギアではない』[論文449]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22732631

— From thinking to syncing. —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)