ブレーキを半分かけても、曲がる力は半分にならない——摩擦は縦と横で一つの円を分け合う

— 摩擦係数 0.8 のタイヤで摩擦の半分をブレーキに使っても、横には **0.866025** が残り、9 割使うと **0.435890** しか残らない — 横の摩擦を使い切る限界に近づくと、この比は $\pi/2 = 1.570796$ に近づく —

— [論文593]

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

ブレーキを半分かければ、曲がる余裕も半分になる、と思われやすい。本稿が示すのは、タイヤの摩擦は縦と横で一つの円を分け合うので、少しのブレーキは曲がる力をほとんど減らさず、強いブレーキは大きく減らし、曲がりながら止まる距離は直線で止まる距離の $\sin^{-1} y/y$ 倍（y は横に使っている摩擦の割合）になることである。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、横に残る摩擦の割合は $\sqrt{1-b^2}$ である——摩擦の割合 b をブレーキに使うと、横に残るのは、$b = 0.5$ で **0.866025**（足し算で考えると 0.5）、$b = 0.9$ で **0.435890** である（第2節）。 第二に、最初のブレーキは、ほとんど横を減らさない——摩擦の 3 割をブレーキに使っても横の減りは **4.6061** パーセント、9 割使うと **56.4110** パーセントである（第2節）。 第三に、曲がれる最小の半径は、ブレーキの半分で **1.154701** 倍、9 割で **2.294157** 倍になる——時速 60 km・摩擦係数 0.8 で、35.4068 m が 40.8843 m と 81.2288 m になる（第3節）。 第四に、これが本稿の芯である。曲がりながら止まる距離は、直線で止まる距離の $\sin^{-1} y/y$ 倍である——半径 50 m のカーブを時速 60 km で走りながら、横に残った摩擦のすべてでブレーキをかけると **19.6714** m で止まり、直線の **17.7034** m の **1.111163** 倍になる。閉じた式と数値積分は一致する（第4節）。 第五に、限界に近づくと比は $\pi/2$ に近づく——横の使用率 y が 0.5・0.9・0.99 で比は **1.047198**・**1.244188**・**1.443694**、$y \to 1$ で $\pi/2 = 1.570796$ である。限界ちょうどでは横に摩擦を使い切っていて、ブレーキを始められない（第4節）。 第六に、分離子は、縦と横の摩擦を足し算で考えるか、向きを持つ量として考えるかである——摩擦の上限は、縦と横を合わせた向きの長さに掛かる（第5節）。 キーワード：摩擦円、タイヤ、ブレーキ、コーナリング、車両の力学。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——摩擦の円、カーブの向心加速度、止まる距離の式は、すべて標準的である。車を質点とし、摩擦の円は理想化である——実際のタイヤは縦と横で上限が違い（楕円）、滑る角度で変わる。ここでは円とした。摩擦係数 0.8 は乾いた路面の代表値である。荷重の移動（ブレーキで前輪に重さが移ること）、ロックを防ぐ仕組み、タイヤの弾性、路面の傾き（片勾配）は入れない。運転を指導しない——具体的な運転操作を勧めるものではない。既刊との関係：論文453 は、凍った道の片勾配のカーブを質点として扱い、安全な速さの帯を出した——そこで使ったのは横の摩擦だけである。本稿は同じ質点に縦の摩擦（ブレーキ）を足し、上限が縦と横を合わせた長さに掛かることを示す。論文300 は同根か別根かが判定できると示した——直線で止まる距離とカーブで止まる距離は同じ摩擦の円から出る同根で、分けるのは横の使用率 y だけである（$y \to 0$ で直線に戻る）。加えたのは、横に残る割合を足し算の思い込みと並べたこと、曲がりながら止まる距離の閉じた式 $(R/2)\sin^{-1}(v^2/(R\mu g))$ を出して数値積分と突き合わせたこと、比 $\sin^{-1} y/y$ が限界で $\pi/2$ に近づくことを示したこと、分離子を「足し算か、向きを持つ量か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：車を質点とし、路面に沿う加速度を縦（ブレーキ）a_x と横（曲がる向き）a_y に分ける。タイヤの摩擦が出せる加速度の上限は μg で、それは縦と横を合わせた長さに掛かる：

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \le \mu g.$$

摩擦の割合 $b = a_x/(\mu g)$ をブレーキに使うと、横に残るのは $\mu g\sqrt{1-b^2}$ である。

> **観察 1.1**
>
> ブレーキを半分かければ、曲がる余裕も半分になる、と思われやすい。摩擦という一つの財布から、縦と横に払い分けている、という見方である——財布の中身が足し算で減るのか、別の減り方をするのかは、別の問いである。

問い：ブレーキに摩擦を使うと、曲がる力はどれだけ減るのか。そして曲がりながら止まるには、どれだけの距離が要るのか。

2. 円と足し算

計算 2.1：ブレーキに使う割合 b と、横に残る割合である。

b	円 $\sqrt{1-b^2}$	横の減り	足し算の思い込み $1-b$
0.10	0.994987	0.5013 パーセント	0.900000
0.30	0.953939	**4.6061** パーセント	0.700000
0.50	**0.866025**	13.3975 パーセント	0.500000
0.70	0.714143	28.5857 パーセント	0.300000
0.90	**0.435890**	**56.4110** パーセント	0.100000
0.99	0.141067	85.8933 パーセント	0.010000

> **観察 2.2**
>
> 最初のブレーキは、ほとんど横を減らさない。円の頂上では、横に残る割合は b の二乗でしか減らない。摩擦の 3 割をブレーキに使っても、横は 4.6061 パーセントしか減らない——最後の 1 割が最も高くつく。9 割使うと横の半分以上が消える。

3. 曲がれる半径

計算 3.1：時速 60 km、摩擦係数 0.8 で曲がれる最小の半径 $v^2/(\mu g\sqrt{1-b^2})$ は、ブレーキなしで 35.4068 m、摩擦の半分をブレーキに使うと 40.8843 m（**1.154701** 倍）、9 割使うと 81.2288 m（**2.294157** 倍）である。

> **観察 3.2**
>
> 半分のブレーキで曲がれる半径は 15 パーセントしか広がらない。足し算で考えれば半径は 2 倍になるはずだが、円では 1.154701 倍である——そのかわり 9 割のブレーキでは 2.294157 倍、曲がる余裕はほとんど残らない。

4. 曲がりながら止まる

計算 4.1：半径 R のカーブを速さ v_0 で走りながら、横に残った摩擦のすべてでブレーキをかける。速さ v のとき横に要るのは v^2/R、使える減速は $\sqrt{(\mu g)^2 - v^4/R^2}$ で、速さが落ちるほど減速が大きくなる。止まるまでの距離は

$$s = \int_0^{v_0} \frac{v\,dv}{\sqrt{(\mu g)^2 - v^4/R^2}} = \frac{R}{2}\sin^{-1}\frac{v_0^2}{R\mu g}, \qquad \frac{s}{v_0^2/(2\mu g)} = \frac{\sin^{-1} y}{y}, \quad y = \frac{v_0^2}{R\mu g}$$

で、y は横に使っている摩擦の割合である。

横の使用率 y	時速	直線で止まる距離	カーブで止まる距離	比 $\sin^{-1}y/y$
0.5	50.4171 km	12.5000 m	13.0900 m	**1.047198**
0.708136	60 km	**17.7034** m	**19.6714** m	**1.111163**
0.9	67.6416 km	22.5000 m	27.9942 m	**1.244188**
0.99	70.9431 km	24.7500 m	35.7314 m	**1.443694**

半径は 50 m。数値積分と閉じた式の相対差は、四つとも 5.0×10^{-12} 以下である。

> **観察 4.2**
>
> これが本稿の芯である。時速 60 km で半径 50 m のカーブを曲がりながら止まると、直線より 1.111163 倍長い 19.6714 m が要る——曲がるのに摩擦の 0.708136 を横に使っているので、ブレーキに回せるのは初め $\sqrt{1-y^2} = 0.706076$ しかない。速さが落ちると横の必要が減り、ブレーキに回せる分が増えていく。

> **観察 4.3**
>
> 限界に近づくと、比は $\pi/2$ に近づく。曲がれる限界の速さ $\sqrt{R\mu g}$ は時速 71.3005 km で、直線なら 25.0000 m で止まるが、カーブでは極限で $\pi R/4 = 39.2699$ m、比 $\pi/2 = 1.570796$ になる——ただし限界ちょうどでは、横に摩擦を使い切っていてブレーキを始められない。$\pi/2$ は、限界の手前から近づいたときの比の行き先である。

5. 分離子

> **観察 5.1**
>
> 分離子は、縦と横の摩擦を足し算で考えるか、向きを持つ量として考えるかである。摩擦の上限は縦と横を合わせた向きの長さに掛かるので、横に残る割合は $1-b$ ではなく $\sqrt{1-b^2}$ になる——少しのブレーキは安く、強いブレーキは高い。曲がりながら止まる距離が $\sin^{-1} y / y$ 倍になるのも、同じ円の形から出る。

> **観察 5.2**
>
> 論文453 と並べる。あちらは、凍った道の片勾配のカーブを質点として扱い、横の摩擦だけで安全な速さの帯を出した——本稿は同じ質点に縦の摩擦を足した。横の摩擦を使っているあいだは、止まる力もその分だけ少ない。

> **観察 5.3**
>
> 論文300 の基準では同根である。直線で止まる距離とカーブで止まる距離は、同じ摩擦の円から出る——二つを分けているのは横の使用率 y だけで、$y \to 0$ で比は 1 に戻る。

> **観察 5.4**
>
> 言わないこと。運転を指導しない。実際のタイヤは縦と横で上限が違い、荷重も移り、ロックを防ぐ仕組みもあるが、入れていない——示したのは、摩擦の上限が向きを持つ量に掛かるという形と、そこから出る閉じた式である。

6. 点呼と結び

1. 半分のブレーキで横に **0.866025** が残る（計算 2.1）：足し算なら 0.5。
2. 9 割のブレーキで横は **0.435890**（計算 2.1）：横の **56.4110** パーセントが消える。
3. 3 割のブレーキで横の減りは **4.6061** パーセント（観察 2.2）：最初のブレーキは安い。
4. 曲がれる半径は **1.154701** 倍と **2.294157** 倍（計算 3.1）：半分と 9 割。

5. 曲がりながら止まる距離は $(R/2)\sin^{-1}(v^2/(R\mu g))$（計算 4.1）：閉じた式。
6. 時速 $60\ \mathrm{km}$・半径 $50\ \mathrm{m}$ で $\mathbf{19.6714\ m}$（観察 4.2）：直線の $\mathbf{1.111163}$ 倍。本稿の芯。
7. 比は $\sin^{-1} y/y$（計算 4.1）：$\mathbf{1.047198}$・$\mathbf{1.244188}$・$\mathbf{1.443694}$。
8. 限界に近づくと $\pi/2 = \mathbf{1.570796}$（観察 4.3）：限界ちょうどではブレーキを始められない。
9. 数値積分と閉じた式の差は 5.0×10^{-12} 以下（計算 4.1）：二つの道。
10. 分離子は足し算か、向きを持つ量か（観察 5.1）：上限は合わせた長さに掛かる。

結び：ブレーキを半分かければ、曲がる余裕も半分になる、と思われやすい。タイヤの摩擦は縦と横で一つの円を分け合う——摩擦の半分をブレーキに使っても横には $\mathbf{0.866025}$ が残り、3 割なら横の減りは $\mathbf{4.6061}$ パーセントにすぎない。そのかわり 9 割使うと $\mathbf{0.435890}$ しか残らない。時速 $60\ \mathrm{km}$・摩擦係数 0.8 で曲がれる最小の半径は、半分のブレーキで $\mathbf{1.154701}$ 倍、9 割で $\mathbf{2.294157}$ 倍になる。曲がりながら止まる距離は、直線で止まる距離の $\sin^{-1} y/y$ 倍である——半径 $50\ \mathrm{m}$ のカーブを時速 $60\ \mathrm{km}$ で走りながら止まると $\mathbf{19.6714\ m}$ で、直線の $\mathbf{17.7034\ m}$ の $\mathbf{1.111163}$ 倍になる。横に使っている割合 y が限界の 1 に近づくと、比は $\pi/2 = \mathbf{1.570796}$ に近づく。ただし限界ちょうどでは横に摩擦を使い切っていて、ブレーキを始められない。分離子は、縦と横の摩擦を足し算で考えるか、向きを持つ量として考えるかである——上限は合わせた長さに掛かる。論文300 の基準で、直線とカーブの止まる距離は同じ円から出る同根である。既刊との位置——論文453 は横の摩擦だけで安全な速さの帯を出した。本稿は同じ質点に縦の摩擦を足した。正直に言えば——車を質点とし、摩擦の円を理想化し、荷重の移動、ロックを防ぐ仕組み、タイヤの弾性、片勾配は入れていない。摩擦係数は代表値で、運転を指導するものではない。

参考文献

1. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers.
2. Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International.
3. Pacejka, H. B. (2012). *Tire and Vehicle Dynamics* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
4. 山岸勇輝 (2026).『三百本目の点呼 —— 同根か別根かは、判定できる』[論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
5. 山岸勇輝 (2026).『凍った道でゆっくり走ると、速く走るより危ないことがある』[論文453]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22732924

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

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