

## 摩擦熱を考慮したタイヤスモークのCG表現

玉川智也 石川知一  
東洋大学

## 1. はじめに

近年、3DCGによる映像表現のリアリティ化が著しく進んでいる。非現実的な現象の表現から物理シミュレーションにもとづいた表現まで様々な技術が開発され映像表現に使われてきた。本研究では物理シミュレーションに基づいたタイヤスモークの表現方法を提案する。

既存の表現では透過マッピングが主な手法として利用されてきた。様々な映像作品や3DCGゲームなどで表現されてきたタイヤスモークだが、現実のタイヤスモークは複雑な現象である。地面とタイヤの接地面からのみ煙が出ている映像が多いが、実際のタイヤスモークはタイヤ全体から出現し、かつ、タイヤ周りに発生する気流により煙が巻き込まれるような現象が見られる。そこで私はタイヤスモークをタイヤの温度や回転数の観点からより高精度に現象を再現することを考えた。

## 2. タイヤスモークについて

本節ではタイヤスモークの重要な要素の1つであるタイヤの温度変化について述べる。

## 2.1 タイヤスモークの発生原理

タイヤがスピンすると、タイヤとアスファルトの間の摩擦熱によってゴムが400℃以上に加熱される。これによりトレッドのゴムが溶け、中の化学物質やオイルが気化して、その分子が空気中に放出される。気化した分子はすぐに冷えて空気中で凝縮し、目に見える白い「煙」となる [1]。

## 2.2 タイヤから発生する煙の種類

タイヤから発生する煙は2種類に分けられる。

1つ目はタイヤを燃やしたときに発生する視覚的に黒い煙である。この煙はタイヤ内に多く存在する炭素によってタイヤに火がついてしまった場合酸素が十分でなく不完全燃焼となってしまう。よって黒い煙が発生するまた多くのタイヤが黒色である理由はタイヤゴムの強度強化のためカーボンブラックと呼ばれる黒い炭素の粒が含まれているためである [2]。

もう1つの煙はタイヤの温度が摩擦熱によって急激に上昇してタイヤ内の成分であるオイルや化学成分が気化して発生するものである。本稿では後者のタイヤスモークをシミュレーションするものとする。

## 2.3 タイヤスモークの干渉物

タイヤスモークが発生する際干渉する物体は、地面とタ

イヤハウスの2つである。タイヤハウスはタイヤスモークを再現するにあたってタイヤの温度変化の次に影響力の大きい要素である。

タイヤハウス周辺の気流の模式図を図1に示す。赤色の矢印はタイヤハウス内を循環する気流で、青色の矢印はタイヤハウスから漏れ後方に向かう気流である。本研究ではタイヤハウスを固定境界条件として設定し流体シミュレーションを行うことでタイヤハウス内の気流を再現した。

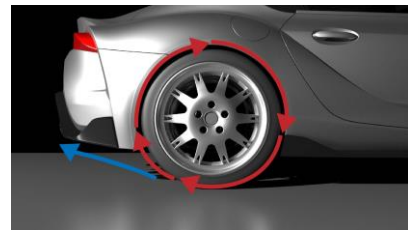


図1 タイヤハウス周辺の気流

## 3. 熱の時間発展式とタイヤスモークの発生量

フーリエの法則に基づいて、地面の温度 $T_g$ と、タイヤの温度 $T_t$ の時間発展式を以下のように考える。

$$T_g(t + \Delta t) = T_g(t) + \frac{W}{C_g} \Delta t - \frac{k_g}{C_g} (T_g - T_{air}) \Delta x \Delta t \quad (1)$$

$$T_t(t + \Delta t) = \begin{cases} T_t(t) + \frac{W}{C_t} \Delta t + \frac{k_t}{C_t} (T_g - T_t) \Delta x \Delta t & (\text{接地時}) \\ T_t(t) - \frac{k_t}{C_t} (T_t - T_{air}) \Delta x \Delta t & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $C_s$ は熱容量、 $k_s$ は熱伝導率で添え字は温度と同様の材質を表す。また動摩擦力による単位時間あたりの熱量 $W$ は、動摩擦力による仕事率と同じとみなし摩擦係数 $\mu$ 、垂直抗力 $N$ 、タイヤの回転速度 $V$ から $W = \mu N V$ で計算する。 $T_{air}$ は空気の温度である。 $\Delta x$ はタイヤの接地部分の水平方向の距離として、タイヤをこの幅で離散化する。本研究でモデルとして再現するタイヤを215/45ZR17のタイヤとして、実際のタイヤを測定した結果、地面と接地している面積は27,520mm<sup>2</sup>であった。この値から密度を算出し、タイヤの熱容量として用いる。地面はアスファルトの物理量を用いた。

式(1)、(2)を用いて空転(車は移動せずタイヤだけ回転)の場合と、通常走行の場合について数値シミュレーションを行った結果を図2、3に示す。それぞれ縦軸は温度(℃)、横軸は時間(秒)である。空転の場合はアスファルトとの熱伝導によりタイヤの温度が上昇し、やがて収束すること、通常走行の場合は高温にならないことが再現できている。

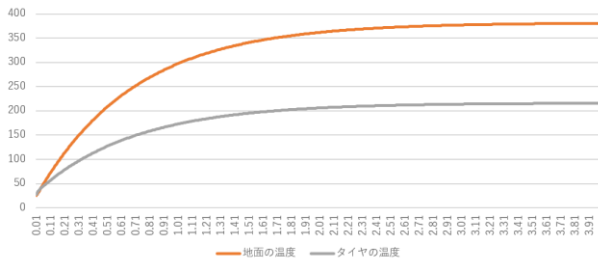


図 2 空転させたときのタイヤの熱伝導方程式によるシミュレーション結果

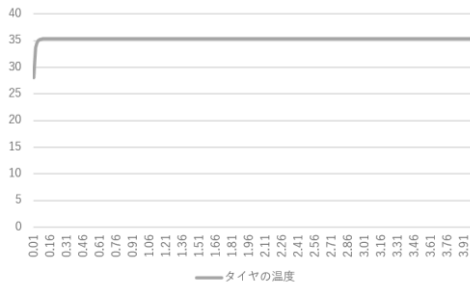


図 3 通常走行を想定した場合のタイヤの熱伝導方程式によるシミュレーション結果

煙の発生量は、以下のマクスウェル・ボルツマン分布に従い、閾値を超える運動エネルギーを持つ分子の比率から決定した。

$$\frac{dN}{N} = 4\pi v^2 \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} dv \quad (3)$$

ここで、 $v$ は気体分子の速度、 $m$ は質量、 $k_B$ はボルツマン定数である。発生した煙の振る舞いは、既存の流体シミュレーションを用いて計算する[3]。

#### 4. 実験結果

CPU: AMD Ryzen 7 2700 @3.2GHz、RAM: 48GB の PC を使用し、Houdini で流体シミュレーションからレンダリングを行った。レンダリング解像度を 1280×720 として、計算時間は 1 フレームあたり 7 分であった。

図 4 はタイヤを空転させて 1.0 秒後の画像である。タイヤスモークが発生し始めている。このときのタイヤと地面の温度はそれぞれ 172.4°C、296.4°C である。図 5 はタイヤを空転させて 2.5 秒後である。このときのタイヤと地面の温度はそれぞれ 361.7°C、205.9°C である。シミュレーション範囲を



図 4 タイヤを空転させて 1.0 秒後



図 5 タイヤを空転させて 2.5 秒後

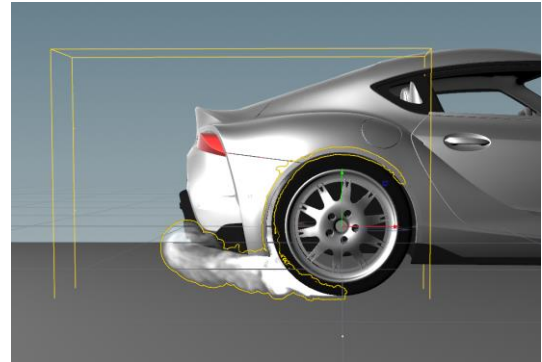


図 6 タイヤスモークが発生する範囲

黄色の境界線で示した別視点の様子を図 6 に示す。

実験結果から、現実世界と同様に空転するとき、タイヤの速度が一定以上になってからタイヤスモークが発生すること、タイヤ後方に煙が流れていく様子を再現することができることを確認できた。

#### 5. おわりに

本稿では、タイヤの熱伝導方程式にもとづいてタイヤの温度変化をシミュレーションし、映像化を行った。シミュレーションによって、タイヤスモークの様子を現実世界と同様に再現することができることを示した。

今後の課題として、実際のタイヤの温度を計測し、数値シミュレーションとの誤差を評価することが挙げられる。さらに処理を軽量化することによってリアルタイムレンダリングを実現し、ゲームでも使用できるようにする予定である。

#### 参考文献

- [1] Darren Cassey. “If You Think Tyres Produce Smoke During A Burnout, You’re Wrong”.CarThrottle <https://www.carthrottle.com/post/if-you-think-tyres-produce-smoke-during-a-burnout-youre-wrong/>,(参照 2022-01-05)
- [2] “タイヤのキホン タイヤが黒い理由”.ブリヂストン [https://www.bridgestone.co.jp/corporate/technology/basics/tire\\_color/index.html](https://www.bridgestone.co.jp/corporate/technology/basics/tire_color/index.html) , (参照 2022-01-05)
- [3] Ronald Fedkiw Jos Stamy Henrik Wann Jensenz(2001). Visual Simulation of Smoke