全日本クロスカンントリー選手権におけるオフロード二輪車の走行データ解析

品川 晃徳^{*1}, 野澤 久幸^{*1}, 内山 裕太郎^{*2}

Data analysis of off-road motorcycles in a cross-country race

Akinori SHINAGAWA ^{*1}, Hisayuki NOZAWA ^{*1} and Yutaro UCHIYAMA ^{*2}^{*1}YAMAHA MOTOR CO., LTD

2500 Shingai, Iwata-shi, Shizuoka 438-8501, Japan

^{*2}YAMAHA MOTOR ENGINEERING CO., LTD

2500 Shingai, Iwata-shi, Shizuoka 438-8501, Japan

Received: 28 February 2017; Revised: 26 April 2017; Accepted: 24 May 2017

Abstract

It is thought that the first step to understanding vehicle movement is to measure and analyze that movement in order to confirm that it falls within the range of the laws of physics. In the case of a four-wheeled vehicle, in general, the friction limit is defined within the circle of longitudinal acceleration and lateral acceleration through the use of a G-G diagram. Then measurements are taken to confirm that the driving state is within that range. Two-wheeled off-road vehicles are mainly ridden on slippery dirt roads that include steep slopes and rough, uneven surfaces. An analysis method for the driving state and the vehicle movement limits that would be suitable for analyzing the movement of such two-wheeled off-road vehicles under these conditions was examined. These movement limits were then formulated by taking into consideration the coefficient of friction and the road surface gradient in accordance with the basic laws of physics and also by focusing on the vehicle movement in the longitudinal direction. Measurements were also taken during actual off-road riding by top-class Japanese off-road motorcycle riders. It was confirmed that this measurement data was distributed within the range of the assumed vehicle movement limits. Consequently, it was confirmed that it is possible to use such measurements to accurately grasp the vehicle movement limits and the associated driving state for two-wheeled off-road vehicles.

Keywords : Motorcycle, Off-road, Acceleration, Tire force, Slope road, Measurement

1. 緒 言

車両運動を理解する上で、物理法則の範囲内での運動となっていることを確認することが、運動の計測・解析の第一歩だと考える。四輪車では、一般的に、G-G ダイアグラムにより摩擦限界を前後加速度・横加速度の円で定義、その範囲内での運転状況であることが、計測により確認されている(梅津他, 2010)。二輪車でも、オンロード車両では同様の手法が有効であると考えられる。しかし、オフロード車両に関しては、急斜面や凹凸を含むすべりやすいダート路面を走行するため、ジャンプ時の挙動解析(八木他, 2009)やレース中のエンジン挙動計測(中山, 2010)の例はあるものの、運動限界とその運転状況に関する計測・解析の報告例はない。そこで、従来のG-Gダイアグラムを参考に、前後方向の運動に的を絞り、摩擦係数と路面勾配を考慮した車両の運動限界の定式化を試みる。全日本トップクラス・ライダーによる実走データ計測を行い、運動限界の定式化の妥当性を検証する。

2. 全日本クロスカンントリー選手権・概要

全日本クロスカンントリー選手権は、図1や図2のように、急斜面や凸凹路面を含む、クローズドされた自然のフィールドをオフロード二輪車で走行し、決勝のみ3時間+1周で競うエンデューロ競技である。同時に100台以

No.17-00086 [DOI:10.1299/transjsme.17-00086], J-STAGE Advance Publication date : 5 June, 2017

本論文は、第25回交通・物流部門大会 講演論文集(2016), No.1126の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} ヤマハ発動機(株) (〒438-8501 静岡県磐田市新貝2500)^{*2} ヤマハモーターエンジニアリング(株)

E-mail of corresponding author: shinagawaa@yamaha-motor.co.jp

上が走行し、様々な排気量の車両・様々な運転技量のライダーが混走する。長丁場であるので、時々刻々と変わるコース状況への対応や、ペース配分も重要な要素となる。最上位である COMP-GP は、AA・A・B・R ランクが設定されている。本報告では、AA ランクおよび R ランクのライダーの計測を実施、それぞれライダーA、ライダーB として、計測データを分析する。

Fig.1 Course topography.

Fig.2 Steep uphill slope.

3. 車両の運動限界

従来の G-G ダイアグラムを参考に、オフロード二輪車の運動解析に適した車両の運動限界の定式化を試みる。急斜面や凹凸を含むすべりやすいダート路面での走行が主で、直進方向の走行が比較的多いこと、横方向の運動はライダーに起因する要素が大きいことより、まずは、前後方向の運動に的を絞って検討する。摩擦係数と路面勾配を考慮し、車両の前後方向の運動限界の定式化と、検証のための走行データ計測を試みる。

3・1 運動限界の定式化

図 3(a)のように、上り勾配を正とし、 $\theta[\text{rad}]$ 傾斜した路面を走行中の車両における前後方向の運動限界について述べる (Vittre Cossalter, 2006). タイヤ制駆動力に起因する加速度を $a_T[\text{m/s}^2]$, 路面勾配に起因する加速度を $a_R[\text{m/s}^2]$ としたとき、車両に生じる加速度 $a[\text{m/s}^2]$ は、空気抵抗とタイヤ転がり抵抗を無視すると、

$$a = a_T + a_R = a_T - g \sin \theta \quad (1)$$

である。静止摩擦の原理より、前後輪のタイヤが同時にすべらない最大の制駆動力により生じる加速度は、

$$a_{T \max/\min} = \pm \mu g \times \cos \theta \quad (2)$$

で表される。このとき、発生する車両の最大・最小加速度は、

$$a_{\max/\min} = g(\pm \mu \cos \theta - \sin \theta) \quad (3)$$

となる。摩擦係数 μ と路面勾配 θ で表され、これが斜面における車両の前後方向の運動限界となる。図 3(b)のように、平坦な路面では、式(2)(3)に $\theta=0^\circ$ を代入し、以下のようになる。

$$a_{\max/\min} = a_{T \max/\min} = \pm \mu g \quad (4)$$

Fig.3 Calculation of the limit acceleration (a) slope (b) flat area.

以降、摩擦係数 $\mu=0.8$ として取り扱う。路面勾配による最大・最小加速度の変化を確認する。式(3)より、 a_R と $a_{max} \cdot a_{min}$ の関係を図4(a)に示す。 a_R が正のときは下り斜面を表している。 a_R が大きくなるほど、 a_{min} は0に近づくため、下り斜面を走行中に強いブレーキをかけても、大きな減速度を発生できないことを意味する。式(2)より、 a_R と $a_{Tmax} \cdot a_{Tmin}$ の関係を図4(b)に示す。 a_R の絶対値が大きくなるほど、 $a_{Tmax} \cdot a_{Tmin}$ は減少する。今後、 a や a_T の計測値を図4に追記し、想定した運動限界内に分布するか否かで、本手法の妥当性を判定する。

Fig.4 Change in the maximum and minimum acceleration. A judgment will be made about the validity of this method based on whether or not they are distributed within the assumed movement limits.

3・2 運動限界および運転状況の計測

二輪車の前後方向の運動限界とその範囲内の運転状況を知るためには、式(1)～(3)より、進行方向の加速度 $a[m/s^2]$ および路面勾配 $\theta[rad]$ が必要である。これらをできるだけ正確に計測でき、かつ二輪車に車載可能であるという視点で、計測器を選択した。加速度の取得には、ジャイロセンサーにより加速度そのものを計測する方法と、得られた速度を微分する方法がある。本報告では、後者を選択した。図5のように、市販の小型GPSロガーをフロントフェンダーに搭載。得られるデータは、経度 $x[m]$ ・緯度 $y[m]$ ・高度 $h[m]$ ・速度 $v[m/s]$ である。サンプリング時間を $\Delta t[sec]$ とすると、加速度 $a[m/s^2]$ および路面勾配 $\theta[rad]$ を、

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \right) \quad (6)$$

により算出する。

Fig.5 GPS data logger.

4. 走行データ解析

4・1 コース特性分析

一般的なオンロードサーキットにおいては、直線の長さ、コーナーの曲率、各地点の高度などのコースレイアウトが公開されている。一方で、全日本クロスカン트리選手権では、コースレイアウトが固定ではなく、レース毎に決定されるため、上記のようなコース情報はない。そこで、コース特性の把握から着手する。図 6(a)に走行軌跡、図 6(b)に各距離における高度を示す。いずれも、路面勾配に起因する加速度 a_R でグラデーション表示した。上り斜面が赤、下り斜面が青である。1 周 5.5km, 標高 1250~1450m。全般的に、前半が上り、後半が下り。最大勾配は約 $\pm 0.5G = \pm 30^\circ$ で、ゴール付近は比較的平らなエリアである。まず、図 6 にて囲んだ路面勾配の緩やかな平面エリアと、下り斜面エリアの分析を行い、その後、コース全般での分析を行う。

Fig.6 Course Layout (a)Trajectory (b)Altitude. An uphill slope is shown in red, while a downhill slope is displayed in blue. One lap on this course is 5.5 km in length and the altitude is from 1250 to 1450 meters.

4・2 平坦な路面における運転状況分析

図6にて抽出した平面エリアでのライダー運転状況を分析する。ライダーAの計測データとして、車速 v ・加速度 a の時系列データ、走行軌跡、車速 v と加速度 a の散布図を図7(a)に示す。すべてのグラフは、加速度 a でグラデーション表示している。加速→減速→旋回の繰り返しで、走行中の加速度 a は約 $\pm 0.5G$ である。路面勾配 $\theta=0^\circ$ としたとき、最大・最小加速度は、式(4)より、 $a_{\max/\min}=\pm 0.8G$ である。走行中の加速度はこの範囲内となっていることが確認できた。また、走行軌跡上のグラデーション表示から、どこからどこまで、どの程度の加減速が行われているか、横運動とは連動しているか等、ライダーの運転状況が確認できる。

比較のために、ライダーBの運転状況を、図7(b)に示す。ライダーAの方が、車速が高く、加減速が大きい。そのため、グラデーションも赤色と青色が濃い表示となる。車速と加速度の散布図は、上下に広がり、かつ右側にシフトしており、加減速と車速が大きいことを表している。加減速の大きさが、タイム差の一要因として考えられる。

Fig.7 Data analysis when riding on flat areas (a)rider A (b)rider B. The repeated acceleration, deceleration, and turning actions resulted in an acceleration a during driving of approximately $\pm 0.5 G$. When the road surface gradient was $\theta = 0$ degrees, the maximum and minimum acceleration according to Equation (4) was $a_{\max/\min} = \pm 0.8 G$. Consequently, it was confirmed that the acceleration during driving was within this range.

4・3 下り斜面における運転状況分析

図6にて抽出した下り斜面エリアでのライダー運転状況を分析する。ライダーAの計測データとして、車速 v ・加速度 a の時系列データ、走行軌跡、車速 v と加速度 a の散布図を図8(a)に示す。すべてのグラフは、加速度 a でグラデーション表示している。下り斜面の直線エリアであるが、斜面形状に合わせて小刻みに加減速されると想定される。走行中の加速度は約 $\pm 0.1G$ である。平均路面勾配 $\theta=-20^\circ$ としたときの最大減速度は、式(3)より、 $-0.4G$ となる。走行中の加速度はこの範囲内となっていることが確認できた。

比較のために、ライダーBの運転状況を、図8(b)に示す。ライダーAの方が、車速が高く、平面ほどではないものの加速度が大きい。斜面においても、加速できる所は加速し、減速できる所は減速する、という運転状況は同じである。

Fig.8 Data analysis when riding on a sloped area (a)rider A (b)rider B. The acceleration during driving was approximately ± 0.1 G. When the average road surface gradient was set to be $\theta = -20$ degrees, then the maximum deceleration according to Equation (3) was -0.4 G. Consequently, it was confirmed that the acceleration during driving was within this range.

4・4 コース全般における運転状況分析

平面・斜面エリアを抽出し、ライダーの運転状況を分析、想定した限界内での車両運動となっていることを部分的に確認できた。さらに、様々なセクションを含む1周分の運転状況を分析する。まず、車両の加速度について検討する。図 9(a)に、走行軌跡を車両の加速度 a でグラデーション表示したものを示す。図 6(a)の路面勾配を表した図と比較すると、平面部分やコーナー前後は大きな加減速があるものの、斜面においては、加速度が小さくなっている。図 9(b)に、路面勾配による加速度 a_R と車両の加速度 a の散布図を示す。式(3)より算出した最大加速度 $a_{max/min}$ を黒線で併記すると、概ねこの範囲内にデータが分布されることが確認できる。路面勾配が小さい部分は大きな加速度、路面勾配が大きい部分は小さな加速度となっている。

次に、タイヤ制駆動力に起因する加速度 a_T [G]について分析する。図 10(a)に、走行軌跡を式(1)より推定した a_T [G]でグラデーション表示したものを示す。図 6(a)と比較すると、平面部分やコーナー前後は大きな加減速があり、さらに上り斜面では駆動を表す青色、下り斜面では制動を表す赤色となっている。駆動はアクセル操作量、制動はブレーキ操作量と相関があるので、よりライダーが操作した感覚に近いグラフとなっている。図 10(b)に、路面勾配による加速度 a_R とタイヤ制駆動力による加速度 a_T の散布図を示す。式(2)より算出した最大加速度 $a_{Tmax/min}$ を黒線で併記すると、概ねこの範囲内にデータが分布されることが確認できる。上り斜面では大きな駆動、下り斜面では大きな制動となっている。

以上より、計測した車両の加速度、推定したタイヤ制駆動力による加速度が、いずれも想定した車両の運動限界の範囲内に概ね分布していることを確認、運動限界・定式化の可能性を示すことができた。

Fig.9 Vehicle acceleration over the whole course (rider A). When the black lines indicating the maximum acceleration calculated from Equation (3), $a_{max/min}$, are also added to this diagram, it can be confirmed that the data points largely fall within this range. The results and evidence presented above confirmed that the measured vehicle acceleration was largely distributed within the range of the assumed vehicle movement limits.

Fig.10 Tire force acceleration over the whole course (rider A). When the black lines indicating the maximum acceleration calculated from Equation (2), $a_{Tmax/min}$, are also added to this diagram, it can be confirmed that the data points largely fall within this range. The graph shows that the drive is large on the uphill sloped portions of the course and the braking is large on the downhill sloped portions of the course.

5. 結 言

急斜面や凹凸を含むすべりやすいダート路面での走行が主である，オフロード二輪車の運動解析に適した車両の運動限界とその運転状況の解析手法を検討した．車両の前後方向の運動に的を絞り，基本的な物理法則により，摩擦係数と路面勾配を考慮した運動限界を定式化した．全日本トップクラス・ライダーによる実走データ計測を行い，想定した運動限界の範囲内にデータが分布していることを確認できた．これにより，オフロード二輪車においても，車両の運動限界とその運転状況を，計測により把握できる可能性を示すことができた．

文 献

- 中山洋一, 全日本モトクロスレースにおけるデータ計測について, Motor Ring, No.30 (2010).
梅津大輔, 岡本隆秀, 八木淳, 虫谷泰典, 齋藤茂樹, 新型プレマシー ダイナミックフィールの統一感, マツダ技報, No.28 (2010), pp.13-18.
Vittre Cossalter, MOTORCYCLE DYNAMICS, LuLu (2006), p.73.
八木栄一, 久保田哲也, 坂本守行, 横山真一郎, 二輪車・人間系の加速とジャンプ運動解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.715 (2009), pp.134-140.

References

- Nakayama, Y., Data measurement in motocross race, Motor Ring, No.30 (2010) (in Japanese).
Umetsu, D., Okamoto, T., Yagi, A., Mushitani, Y. and Saito, S., Development of harmonized dynamic feel of new premacy, Mazda technical report, No.28 (2010), pp.13-18 (in Japanese).
Vittre Cossalter, Motorcycle dynamics, LuLu (2006), p.73.
Yagi, E., Kubota, T., Sakamoto, M. and Yokoyama, S., Accelerating and jumping motion simulations on a motorcycle-rider system, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.72, No.715 (2009), pp.134-140 (in Japanese).