

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 6 年 5 月 2 0 日現在

機関番号：8 2 7 2 3

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：2 0 K 0 4 3 5 7

研究課題名（和文）計装車両の走行中データ取得による地面の力学的特性の推定

研究課題名（英文）Estimation of mechanical properties of the ground by acquiring data while driving

研究代表者

山川 淳也（Yamakawa, Junya）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・教授

研究者番号：1 0 5 4 6 1 3 8

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：タイヤとの相互作用による地面の特性を明らかにするために計装車両で走行中に取得したデータの処理方法を検討した。検討にあたって、アスファルト舗装路、砂利路面、草地、舗装路上に堆積した火山灰路面を走行したデータの処理を行なった。舗装路、砂利路面、草地のデータでは基本的な処理方法を検討し、火山灰路面でのデータからは、降灰厚さや粒径と転がり抵抗との関係、タイヤスリップ率と制駆動力の関係、ならびにタイヤ横すべり角と横力の関係を明らかにした。特に、タイヤ横力の発生の予測については、ガウス過程を用いて任意のタイヤ横すべり角、キャンバー角、接地荷重における横力の推定を可能とする手法を用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国土は様々な災害に見舞われるが、迅速な被災地の支援や復旧には車両の運用が不可欠である。車両走行に困難が予測される地域において、計装車両が先行して活動地域の地面の力学的特性を得ることができれば、活動計画の立案に寄与し、災害活動に有効である。計装車両は現地を走行して容易にデータを収集できるので、これを活用して地面の力学的特性を簡便で迅速に得られる。異なる条件で多くのデータが蓄積されるため、変数間の非線形的な相関を効率良く探索することが鍵となる。ガウス過程を用いた回帰モデルは、純粋に必要な変数に対する予測値を与えるが、その値の精度まで同時に得られる確率モデルであり、有効な活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A method of processing data acquired while driving in an instrumented vehicle to characterize the properties of the ground as interaction with the tires was investigated.

In this study, data from asphalt pavement, gravel, grass, and volcanic ash deposited on pavement were processed. The data obtained from the paved road, gravel road, and grassy area were processed in a basic manner. The data obtained from the volcanic ash road clarified the relationships between ash thickness and particle size or rolling resistance, tire slip ratio and driving force, and tire sideslip angle and side force. In particular, the generation of tire side force was predicted using a Gaussian process, which can estimate the side force at any tire slip angle, camber angle, and vertical load.

研究分野：テラメカニクス

キーワード：路外走行 火山灰 ガウス過程 タイヤ 横力特性 転がり抵抗

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 車両は地面と車輪（タイヤ）の接触による相互作用によって受ける力（摩擦力）が駆動力、制動力、横力となり、所望の走行が可能となる。相互作用による力の発生は、舗装されていない地面においては、土の組成、降雨などの状態が車両走行に大きく影響を及ぼすため、特に重要である。しかしながら、地面の力学的な特性は非線形的な要素を含み、その組成ならびに外的な要因により、その性質が大きく異なるので、その特性を明確に示すには困難を伴う。

(2) 地面の力学的特性を明らかにするには、その状態において直接取得したデータを用いるのが有効である。しかしながら、車両走行で収集するデータは大量となるため、非線形的に相関関係を有するパラメータを効率良く捜して有意な形で情報を取り出すための手法を検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、計装車両で様々な地面を走行して車輪に掛かる力ならびに車両と地面の状態を計測して地面の力学的特性を得るための方法を検討する。ある車両が走行するのに十分な駆動力を発揮できるか、地面が車両重量を支持するのに十分な強度か、操縦性がどこまで保障されるかなど、車両走行性や作業性の判断に資する情報を得ることを考える。計装車両の現地走行で取得するデータは比較的大きいため、有意な情報を得るための効率的なデータ処理の方法を検討して開発する。

(2) これまで、地面の力学的特性を収集するには、専用の装置を用いて様々な条件を変えて測定を行う必要があり、データの収集と整理に時間を要していた。計装車両は現地を走行して容易にデータを収集できるので、これを活用して地面の力学的特性を簡便で迅速に得られないかと考えた。計装車両は、舗装路面でタイヤに作用する力などの測定を通して車両運動の解析に用いられており、これまで地面側の力学特性を取得する発想はなかった。計装車両は専用装置による室内実験などと異なり、現地走行で運動学的変数を制御できず、異なる条件でのデータが多く蓄積されるため、変数間の非線形的な相関を効率良く探索して、ベイズ推定などの手法を用いて確度を向上させることが鍵となる。

### 3. 研究の方法

(1) 車輪に力覚センサーなどを内蔵した計装車両を用いて走行中に収集したデータを処理した。転がり抵抗については、車輪転動時の負荷を測定し、駆動力発生における特性については、直進走行での急加速と急停止により測定される駆動力とタイヤのすべり率の関係を明らかにした。転がり抵抗や駆動力（制動力を含む）については、接地荷重にほぼ比例するため、データの整理は容易である。

(2) 横力特性においては、その発生において旋回による接地荷重の移動、車体のロール、懸架機構の変形などによるキャンバー角が同時に発生するために、純粋にタイヤ横すべり角と横力の関係を明らかにするには、データの処理方法に工夫が必要となる。そのため、この研究においては、ガウス過程に着目し、タイヤに発生する横力とタイヤ横すべり角、キャンバー角、接地荷重の変化の3変数との関係を明らかにする。この方法は、爾後のデータの蓄積によって確度を高めることができるベイズ推定法を内在する機械学習の一つであり、有用性が高い。

### 4. 研究成果

#### (1) 転がり抵抗

例として、図1に粗粒火山灰が堆積したアスファルト路面を走行したときの転がり抵抗係数を示す。走行実験では、アスファルト路面上に粗粒の火山灰を1 cm, 5 cm, 10 cmの厚さで敷いた路面を時速10 km ~ 40 kmで走行したときの縦方向の力を垂直荷重で割った転がり抵抗係数（縦軸）で示したものである。走行速度によらず火山灰の堆積厚さが増すに連れてタイヤの沈下が増加し、転がり抵抗係数が増加することが分かる。なお、火山灰のないアスファルト路面における転がり抵抗係数は0.015であった。

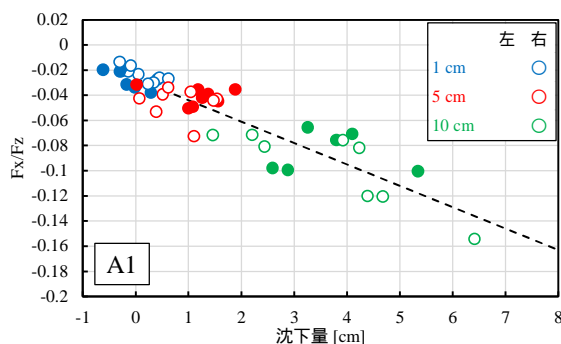


図1 粗粒火山灰における転がり抵抗と沈下量の関係

## (2) すべり率と駆動力

図 2 は、タイヤ周速度とタイヤ回転角速度から求めたすべり率を横軸として、測定した前後力を接地荷重で除した値を縦軸に示している。上と同様に粗粒火山灰でのデータを例としている。測定される前後力はタイヤの駆動力から走行抵抗を差し引いたけん引力と呼ばれる実質的なタイヤを前進させる力であり、制動時（負の前後力）においては、ブレーキ力に走行抵抗を加えた値となっている。この値は摩擦係数に相当しており、アスファルト路面では最大で 1 程度、アスファルト路面上の火山灰が厚くなることですべり率 0 付近での摩擦係数の傾きが小さくなり、タイヤはより滑りやすいことが示されている。10 cm 厚さの火山灰においては、摩擦係数に相当する値は駆動時に 0.2、制動時に 0.6 程度となっているが、制動時には火山灰が抵抗となり見かけ上の摩擦係数が高くなっている。制動時には摩擦係数の飽和までの値が取得できているが、駆動時にはエンジンの出力不足により火山灰厚 10 cm を除いて必ずしも飽和する値までの取得はできていない。

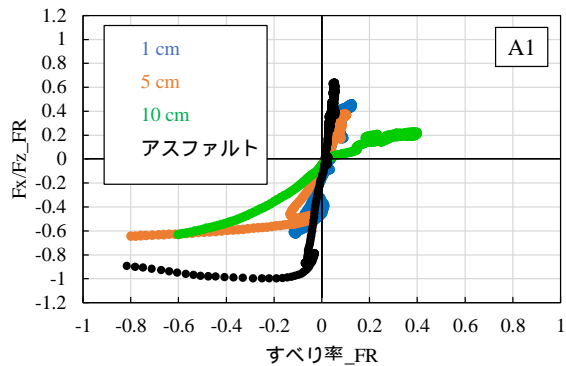


図 2 粗粒火山灰におけるすべり率とけん引力量の関係

## (3) タイヤ横すべり角と横力

タイヤ横すべり角が発生するとタイヤ横方向に力が発生して車両を旋回させる。図 3 は、3 cm 厚の火山灰アスファルト上において旋回走行時に得られたタイヤ横すべり角と横力の関係を示している。半径 30 m の曲線路で右旋回と左旋回のを合わせて示している。同じ横すべり角において横力の大きさが異なるのは、接地荷重ならびにキャンバー角が異なる条件での値のためである。これらの異なる条件下で測定した横力に関して、タイヤ横すべり角だけでなく、接地荷重とキャンバー角の影響を明らかにするための手法が必要であった。

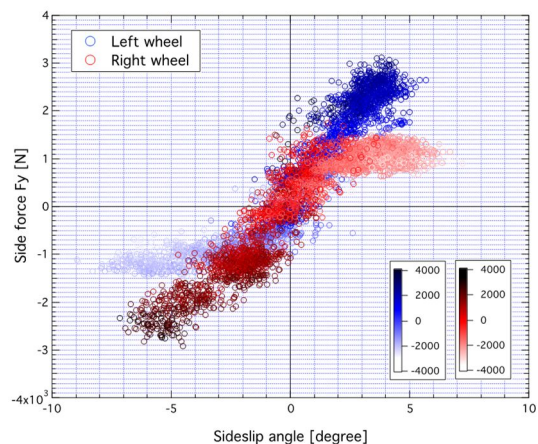


図 3 細粒火山灰におけるタイヤ横すべり角と横力の関係

## (4) ガウス過程回帰による手法

タイヤ横すべり角による横力の発生を接地荷重ならびにキャンバー角の影響を含めて整理するために、ガウス過程による回帰を行なった。任意のタイヤ横すべり角、接地荷重、キャンバー角の 3 つの変数から横力を推定する回帰モデルを構築したが、2 次形式の指数に関連度自動決定(ARD) を組み込んだオリジナルのカーネル関数を用いた。実験値に対する回帰モデルの尤度関数が最大となるようにカーネル関数に含まれる 7 つの超パラメタを決定した。ARD の考え方から、超パラメタの大小によりそれぞれの変数がどれだけ予測に影響を及ぼしているかが自動的に判定される。初年度の研究において、アスファルト路面上での走行データの整理で、同様のガウス過程の手法を用いたが、勾配法による探索が困難であったために、モンテカルロ法的一种であるメトロポリス・ヘイスティング法により超パラメタを段階的に求めることとした。モンテカルロ法では超パラメタの決定において時間を節約したが、アスファルト路面上の走行データでは、勾配法で探索した超パラメタによる尤度の方がより高いことが確認できた。そのため、ここでは勾配法による超パラメタの探索で得られた結果を示す。モデルは、タイヤ横すべり角、接地荷重、キャンバー角 3 つの変数の任意の値において横力の予測値を得ることができる。図 4 はガウス過程による回帰で作成したモデルで予測したタイヤ横すべり角における横力の推定値である。いずれもキャンバー角 0 において、接地荷重が標準状態のときと 2350 N 増加もしくは減少したときの横力を表している。実線は予測値の平均値を表しており、波線は平均値に標準偏差を加減したものであり、波線間の間隔が狭いほど予測値が確からしいことを示している。なお、比較のためにアスファルト路面における予測値を太い点線で示している。

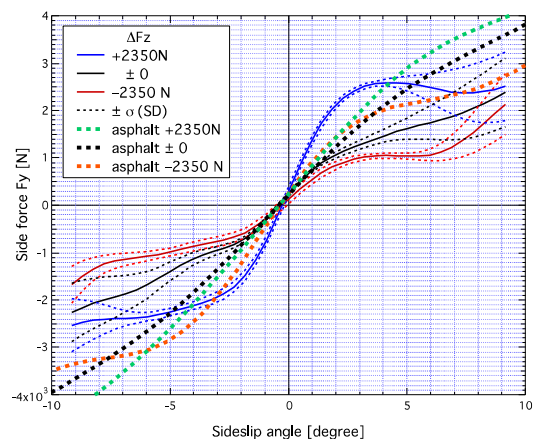


図 4 細粒火山灰における横力発生 の予測



#### (5) ニューラルネットワークによる手法

ガウス過程による回帰手法に加えて、ニューラルネットワーク(NN)によるモデルの構築を行なった。超パラメタの探索に時間を要するために代替の手法として、NNによる予測モデルの構築を行なった。NNモデルでは、重みとバイアスの初期値により異なるモデルが生成されるため、無作為に設定した初期値で40~100個のモデルを生成し、その平均値ならびに標準偏差を求めた。NNでは、40個ほどの計算によりガウス過程と同様の確率的な予測が可能である。しかしながら、一つの重みとバイアスの組み合わせで得られた横力の予測値の確かしは知ることができない。図5はNNによる横力の予測モデルであり、実線は予測値の平均値、波線は平均値に標準偏差を加減したものである。ガウス過程では、一度超パラメタを求めると、確率モデルが生成されるため、その予測値の確かしさが同時に得られる点で、ガウス過程による手法の方がより洗練されていると言える。

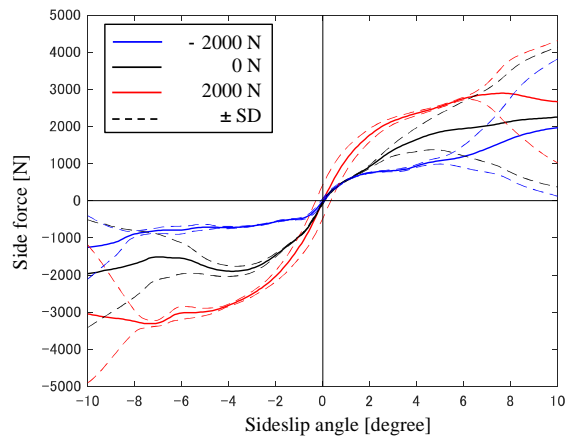


図5 細粒火山灰におけるNNによる横力発生予測

#### (6) ガウス過程回帰における超パラメタ探索の手法

ガウス過程による回帰において、超パラメタの探索が必要であるが、勾配法は一次探索であるためかなりの時間を要する。時間を要するものの、確実に尤度関数の最大点に到達することができる。より早く探索するために共役勾配法が提案されているが、我々の計算において単純な勾配法と所要時間は変わらなかった。計算所要時間を短縮するため、二次探索であるニュートン・ラプソン法を活用した。勾配法における尤度関数の勾配は解析的に求めることができたが、二次勾配は解析的な算出が難しく、数値的に求めることとした。ニュートン・ラプソン法では、初期値により収束または発散が左右されるために、ある程度勾配法で探索した後の超パラメタの値をニュートン・ラプソン法の初期値とすることで劇的に計算時間の短縮が可能となった。計算の条件にもよるが、10倍から550倍の速さで計算が可能であった。

#### (7) 車両走行に必要な地面の力学的特性

本研究では、計装車両により走行中に収集したデータを処理して、車両走行に必要な地面の力学的特性を明らかにすることであった。研究期間の初期において、アスファルト路面、砂利路面、草地で収集したデータについて処理方法を検討した。その知見を活かして、火山災害における車両走行への影響を明らかにするため、アスファルト舗装路に火山灰を敷いた路面にて計装車両を走行させた際のデータの処理を行う手法として検証した。ガウス過程回帰による予測モデルは、予測値の精度まで得られる確率モデルであり、データの蓄積により精度の向上が図れる有用な手法である。火山灰のみならず、他の地面における走行においても同様の手法によってその特性を明らかにできる有効な手段であると言える。

#### <引用文献>

- Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Chapter 6, pp. 306-311. Springer.
- MacKay, D. J. C. (1994). Bayesian methods for backprop networks. In E. Domany, J. L. van Hemmen, and K. Schulten (Eds.), Models of Neural Networks, III, Chapter 6, pp. 211-254. Springer.
- Neal, R. M. (1996). Bayesian Learning for Neural Networks. Springer. Lecture Notes in Statistics 118.
- 小西貞則, 越智義道, 大森裕造(2008). 計算統計学の方法-ブーストラップ・EM アルゴリズム・MCMC, pp. 159-186. 朝倉書店
- Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Chapter 5, p. 270. Springer.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 クレルバータルニャム、山川淳也、江藤亮輔	4. 巻 43
2. 論文標題 アスファルト路面に堆積した火山灰上における車両走行性について	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 テラメカニックス	6. 最初と最後の頁 67-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 一門靖浩、山川淳也、江藤亮輔	4. 巻 42
2. 論文標題 砂質土で走行性が向上するタイヤトレッドに関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 テラメカニックス	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青田勝義、山川淳也、江藤亮輔	4. 巻 41
2. 論文標題 ガウス過程回帰による実路面でのタイヤに作用する力の推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 テラメカニックス	6. 最初と最後の頁 45-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Junya Yamakawa, Ryosuke Eto	
2. 発表標題 Analysis of Tire Characteristics on Road Surface with Volcanic Ash Fall	
3. 学会等名 16th European-African Regional Conference of the ISTVS（国際学会）	
4. 発表年 2023年	

1. 発表者名	Junya Yamakawa, Ryosuke Eto, Yasuhiro Ichikado, Mitsuhiro Yoshimoto, Tatsuji Nishizawa, Tomohiro Kubo, Hiroyuki Yamada
2. 発表標題	Research on vehicle running performance on paved road covered with falling volcanic ash
3. 学会等名	International Society for Terrain-Vehicle Systems (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	クレルバータル・ニヤム、江藤亮輔、山川淳也
2. 発表標題	アスファルト路面に堆積した火山灰上における車両走行性について
3. 学会等名	テラメカニックス研究会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	クレルバータル・ニヤム、江藤亮輔、山川淳也
2. 発表標題	火山灰に覆われたアスファルト路面における車両走行性について
3. 学会等名	日本機械学会交通・物流部門大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Junya Yamakawa, Katsuyoshi Aota, Ryosuke Eto
2. 発表標題	Acquisition of Interaction Characteristics between Tire and Ground by Gaussian Process Regression
3. 学会等名	The International Society for Terrain Vehicle Systems (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 一門靖浩, 山川淳也, 江藤亮輔
2. 発表標題 砂質土で走行性が向上するタイヤトレッドに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第30回交通・物流部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青田勝義、山川淳也、江藤亮輔
2. 発表標題 カウス過程回帰による実路面での車両タイヤに作用する力の推定
3. 学会等名 第41回テラメカニックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青田勝義、山川淳也、江藤亮輔
2. 発表標題 実走行データ取得による車両のタイヤに作用する力の推定
3. 学会等名 日本機械学会 第29回交通・物流部門大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	吉田 秀久	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授	削除:2022年3月15日
	(Yoshida Hidehisa)		
	(00332635)	(82723)	

6．研究組織（つづき）

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究 分 担 者	江藤 亮輔  (Eto Ryosuke)  (20761480)	防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・講師     (82723)	

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------