

自転車走行路面の平坦性評価に向けた 自転車振動モデルに関する研究

渡辺 健太¹ 萩原 亨² 高橋 清³ 富山 和也⁴ 佐々木 優太⁵

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:kennnta007@eis.hokudai.ac.jp

²フェロー 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:hagiwara@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail:kiyoshi@mail.kitami-it.ac.jp

⁴正会員 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail:tomiya@mail.kitami-it.ac.jp

⁵学生会員 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail:m1752200136@std.kitami-it.ac.jp

北海道のサイクルツーリズム発展のために、自転車走行路面の平坦性評価が求められている。既存の路面平坦性評価指標であるIRIとサイクリストの乗り心地の相関を調査した結果、ある程度の相関が見られた。しかし、平均IRIとサイクリストの乗り心地評価で異なる路面もあったことから、サイクリストの乗り心地を示す新たな路面平坦性評価指標が必要であることが明らかになった。そこで、自転車振動モデル構築のために旧北見競馬場にて路面プロファイルと自転車上下方向加速度の計測を行った。その結果、サドル部の加速度の大きさはサイクリストの走行方法の変化によって変化するが、ハンドル部の加速度の大きさはあまり変化しないということが明らかになった。そして、計測データのスペクトル解析によって、1自由度減衰振動系の自転車振動モデルを構築した。

Key Words : *Roughness evaluation, Bicycle ride quality, Modeling*

1. はじめに

2016年3月、第8期北海道総合開発計画が閣議決定された。この計画では、今後10年間の取組の柱として北海道の世界水準の観光地化を目指すこととしている。既に、ニセコエリアでは冬期のスノーリゾートとして世界的に高い評価を得ている地域もあるが、より広域的な観光周遊ルートの形成を促進する必要がある。その中で、北海道の雄大な景観の中での移動そのものを楽しむサイクルツーリズムが挙げられている。北海道は、道路が広く交通量が少ないことに加え、夏でも冷涼な気候であるため世界有数のサイクリング環境を有しているといえる。しかし、サイクリングルートにおいて自転車走行環境の評価が求められているものの、自転車走行路面の平坦性評価に関する明確な指標は存在しない。

一方で、道路の整備において量よりも質が求められて

いる今日では、IRI (International Roughness Index : 国際ラフネス指数) と呼ばれる指標が路面平坦性の評価指標に多く用いられている。IRIは、図-1に示すクォーターカーモデル¹⁾ と呼ばれる自動車の振動モデルのシミュレーションによって自動車のサスペンションの変位が算出され自動車ドライバーの乗り心地や安心感と相関があることが知られている²⁾。

しかし、自動車は車両全体としてサスペンションを軸に車体と車輪 (バネ上とバネ下) に分離しているのに対し、自転車は車両全体が一つのフレームでつながっている。自動車と自転車の振動モデルは異なると考えられるため、IRIはサイクリストの乗り心地評価そして自転車走行路面の平坦性評価には適用できるかどうかは分からない。そこで本研究では、IRIの原理を参考にし、サイクリストの乗り心地を考慮した自転車走行路面の平坦性評価へ向けた自転車振動モデルを構築することを目的と

する。

2章でIRIと自転車の乗り心地の相関に関する調査結果を示す。3章で路面プロファイルと自転車上下方向加速度の計測実験について説明し、4章で自転車振動モデルを構築する。

2. IRIとサイクリストの乗り心地の関係

2.1. 調査実施方法

既存の路面平坦性評価指標であるIRIがサイクリストの乗り心地にどの程度相関があるのか調査した。2016年10月23日（日）に国道39号にてIRI計測とサイクリストの乗り心地評価を実施した。調査路面は、上り43.5～44.0kp区間、下り44.0～44.5kp区間、そして上り52.0～52.5kp区間の3路面（各500m）を選定した。なお、上り52.0～52.5kp区間の車道左側には、サイクリスト用に矢羽根型路面標示、自転車ピクトグラムの標示がされていた。

2.2. 計測方法

IRIは、モバイルプロフィロメータ³⁾（Mobile Profilometer：MPM）を用いて計測した。MPMは、任意の車両に2つの加速度計を取り付け、車両応答に基づき計測した路面プロファイルからIRIを算出する装置である。本計測は100mごとにIRIを計測し、500m分のデータから各調査路面の平均IRIを算出した。サイクリストの乗り心地については、クロスバイクによる自転車走行を行い、主観評価を行った。各調査路面の路肩と車道左側を1回ずつ走行し、1回走り終わるごとに「とても良い」、「やや良い」、「普通」、「やや悪い」、「とても悪い」の5段階評価を行った。

2.3. 調査結果

平均IRIを横軸に、サイクリストの乗り心地主観評価において最も悪い評価（とても悪い）を1点、最も良い評価（とても良い）を5点として平均を取ったものを縦軸にしてIRIと乗り心地評価の関係をまとめた結果を図-2に示す。IRIとサイクリストの乗り心地の決定係数は0.87となった。

一方、平均IRIとサイクリストの乗り心地評価で異なる路面もあった。平均IRIは、下り44.0～44.5kp区間の車道左側を走行したとき最も低くなった。それに対しサイクリストの乗り心地評価は、下り44.0～44.5kp区間の車道左側よりも上り52.0～52.5kp区間の路肩または車道左側を走行したときのほうが良かった。サイクリストの乗り心地を示す新たな路面平坦性評価指標が必要であると述べた。

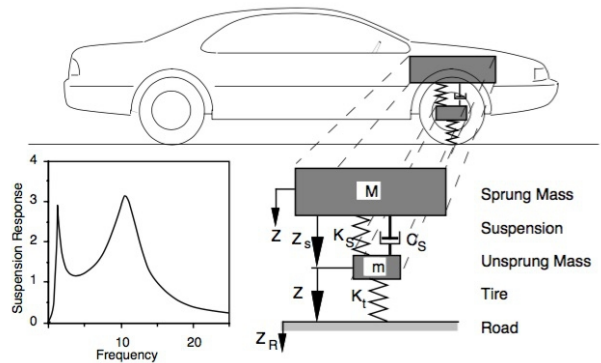


図-1 クォーターカーモデル¹⁾

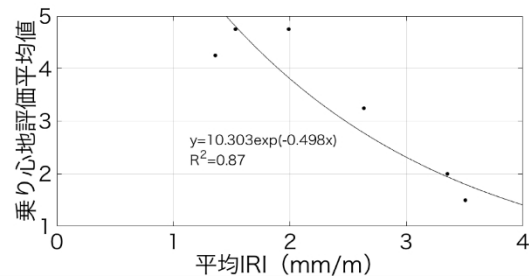


図-2 IRIと乗り心地評価の関係

3. 路面プロファイルと自転車上下方向加速度の計測実験

3.1. 実験実施方法

本実験は自転車振動モデル構築への路面入力データおよび自転車上下方向加速度出力データの取得を目的とし、2017年6月16日から2017年6月17日に路面プロファイルと自転車上下方向加速度の計測を実施した。実験路面は、旧北見競馬場にて粗さが異なる2路面（各100m）を選定した。滑らかな方の路面をA路面、粗い方の路面をB路面とする。自転車はサスペンションがない一般的なクロスバイクを用いた。タイヤの空気圧は8.0気圧とした。自転車走行は、20代から50代の男女7名で行った。以下、サイクリストA～サイクリストGと呼ぶこととする。

3.2. 計測方法

路面プロファイルは、手押し式の路面プロファイラにより1cm間隔で計測した。自転車上下方向加速度は、サンプリング間隔1msの加速度計を自転車のハンドル中央部とサドル下部（以下、ハンドル部、サドル部と記述する。）に取り付けて計測した。サイクリストの走行方法は、サイクルコンピュータにより3種類の一定速度（10km/h、15km/h、20km/h）でハンドルを軽く握る着席走行と前傾姿勢の立ち漕ぎ走行の2種類の乗り方を試した。各サイクリストは、1回の走行が終わるごとに、振動の強さについての5段階主観評価（「かなり感じる」、「少し感じる」、「普通」、「あまり感じない」、「感

じない) と乗り心地についての5段階主観評価 (「とても良い」, 「やや良い」, 「普通」, 「やや悪い」, 「とても悪い」) を行った。

3.3. 計測結果

(1) 路面プロファイル

A路面, B路面それぞれの路面プロファイルを図-3に示す。なお, 路面プロファイルの25m以上の波長成分は振動には関係しない勾配と考え, その成分は路面解析ソフトウェアProVALを用いハイパスバターワースフィルタをかけて取り除いている。また, 同様にProVALにて解析した結果, A路面のIRIは2.85(m/km), B路面のIRIは11.66(m/km)であった。

(2) 自転車上下方向加速度

自転車上下方向加速度計測結果について, B路面におけるサイクリストGの10km/h着席走行時の計測結果を図-4に示す。なお, 実験路面100m区間のデータを抽出には, 実験路面のスタートとゴールの位置に設置したトリガーを乗り越えるときの加速度の絶対値が最大となったところを切り出した。

図-4から, ハンドル部とサドル部の加速度の大きさが異なることが読み取れる。この違いを検証するために, 加速度の絶対値の平均値と分散を算出した。B路面における自転車上下方向加速度の平均値と分散算出結果を表-1に示す。なお, データが取れた6名のサイクリストの平均を取った。

ハンドル部の加速度の平均値は, どの走行速度においても着席走行時と立ち漕ぎ走行時でほとんど変化しなかった。一方で, 立ち漕ぎ走行時のサドル部の加速度は, どの走行速度においても着席走行時と比べて平均値が高くなった。また, A路面においても同様の結果が得られた。したがって, サイクリストの走行方法の変化によってサドル部の加速度の大きさは変化するが, ハンドル部の加速度の大きさはあまり変化しないと言えた。

3.4. 主観評価結果

振動の強さと乗り心地の主観評価において最も悪い評価 (かなり感じる, とても悪い) を1点, 最も良い評価 (感じない, とても良い) を5点として全サイクリストの平均を取った結果を図-5に示す。

A路面においてもB路面においても立ち漕ぎ走行時は着席走行時よりも振動を感じにくいという結果になった。立ち漕ぎ走行時は, サドル部からの振動を感じていないためであると考えられる。一方で乗り心地は, A路面においては着席走行時のほうが良く, B路面においては立ち漕ぎ走行時のほうが良かった。

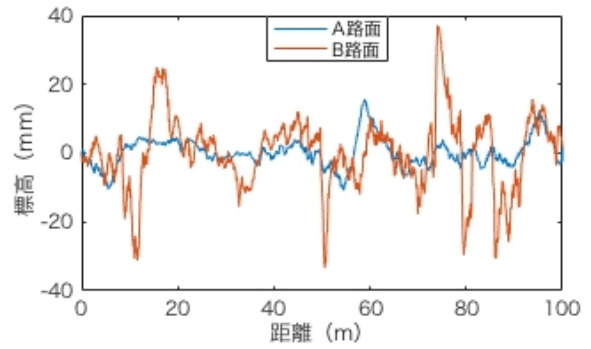


図-3 路面プロファイル計測結果

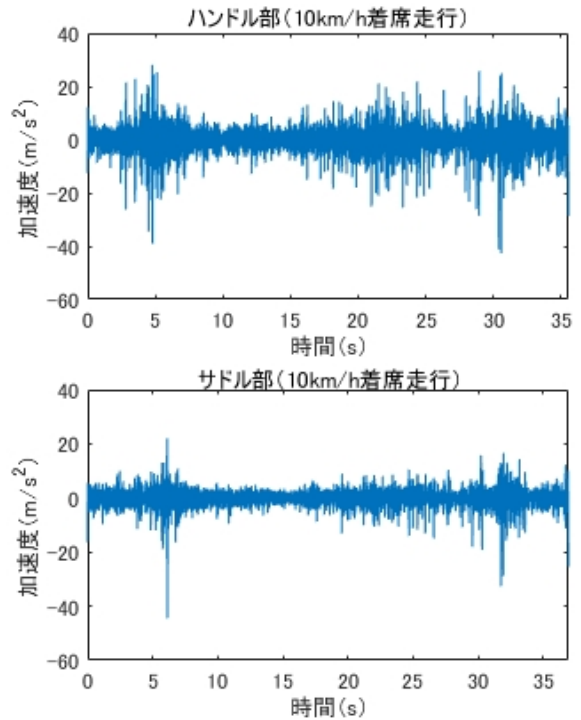


図-4 自転車上下方向加速度計測結果 (B路面)

表-1 自転車上下方向加速度の平均値と分散 (B路面)

(A) 着席走行

時速	10(km/h)		15(km/h)		20(km/h)	
	ハン ドル	サド ル	ハン ドル	サド ル	ハン ドル	サド ル
平均値 (m/s^2)	2.8	1.7	5.4	3.1	7.8	5.3
分散 (m/s^2) ²	8.2	3.2	28.8	12.5	57.1	34.4

(B) 立ち漕ぎ走行

時速	10(km/h)		15(km/h)		20(km/h)	
	ハン ドル	サド ル	ハン ドル	サド ル	ハン ドル	サド ル
平均値 (m/s^2)	3	3.9	5.1	6.6	8.1	10.1
分散 (m/s^2) ²	9.1	15.3	24.9	39.2	56.8	86.5

4. 自転車振動モデル構築

最初に計測した路面プロファイルデータと自転車上下方向加速度データのスペクトル解析を行った。次に、自転車振動モデルを1自由度減衰振動と仮定し、バネ定数と減衰係数を推定した。最後に、自転車振動モデルを利用し、実験路面を入力したときの自転車上下方向加速度のシミュレーションを行い、実測値の振動挙動と比較した。

4.1. 運動方程式

本研究では、自転車は車両全体が一つのフレームでつながっていることから、自転車の振動は1自由度減衰振動系によってモデル化できると仮定する。1自由度減衰振動モデルを図-6に示す。また、運動方程式を式(1)に示す。

$$\dots (1)$$

ここで、 m : 質量[kg]、 a : 自転車上下方向加速度[m/s²]、 x : バネ定数[N/m]、 y : 路面上下方向変位[m]、 z : 自転車上下方向変位[m]、 c : 減衰係数[N・s/m]、 v : 路面上下方向速度[m/s]、 w : 自転車上下方向速度[m/s]

4.2. スペクトル解析

自転車振動モデル作成のためには、バネ定数と減衰係数の二つのパラメータを求める必要がある。バネ定数と減衰係数は、路面プロファイルデータと自転車上下方向加速度データのスペクトル解析から得られる周波数応答関数の振幅特性から推定する。

自転車上下方向加速度PSD (Power Spectral Density : パワースペクトル密度) をFFT (Fast Fourier Transform : 高速フーリエ変換) により算出した。なお、解析にはMathWorks社のMatlabを用い、FFTのデータ点数は1024点、オーバーラップ数は512点、窓関数はハミング窓関数とした。

路面プロファイルデータについて同様にスペクトル解析を行い、路面プロファイルPSDを入力し、自転車上下方向加速度PSDを出力としたときの周波数応答関数の振幅特性を算出した。路面プロファイルのサンプリング周波数は10km/h走行時で0.0036Hz、15km/h走行時で0.0024Hz、20km/h走行時で0.0018Hzであるのに対し、自転車上下方向加速度のサンプリング周波数は0.0010Hzであるので、Matlabのresample関数を用いて自転車上下方向加速度のサンプリング周波数をダウンサンプリングし、路面プロファイルのサンプリング周波数に合わせた。

次に式(2)により周波数応答関数の振幅特性を算出した。

$$\dots (2)$$

ここで、 A : 周波数応答関数の振幅特[m/s²/mm]、

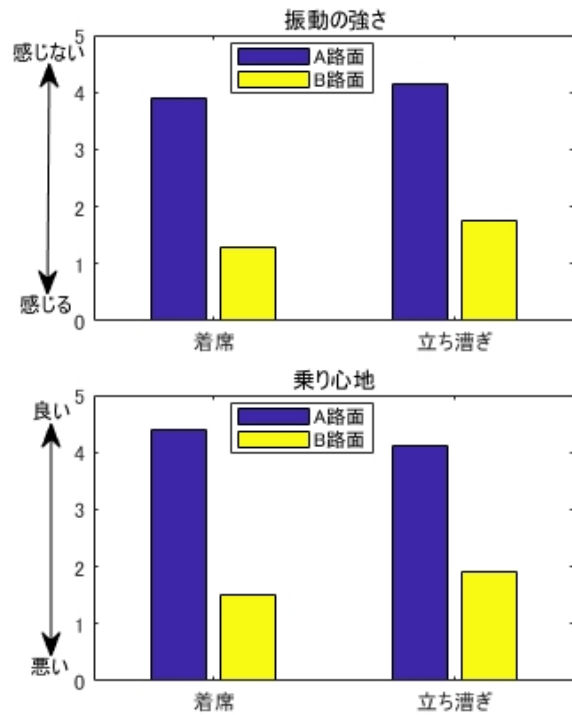


図-5 主観評価結果

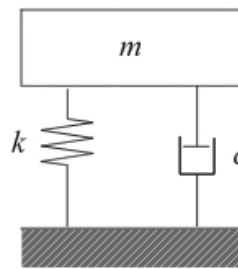


図-6 1自由度減衰振動モデル

a : 自転車上下方向加速度PSD[(m/s²)²/Hz]、 y : 自転車上下方向加速度PSD[(m/s²)²/Hz]、 z : 路面プロファイルPSD[(mm)²/Hz]

サイクリストAの15km/h走行時の振幅特性を図-7に示す。振幅特性は、路面が変化しても違いはほとんど見られなかった。ハンドル部の振幅特性は、着席走行時と立ち漕ぎ走行時でほとんど違いが見られず、20~30Hzの振幅が大きかった。一方、サドル部の振幅特性は、着席走行時と立ち漕ぎ走行時で大きな違いが見られた。着席走行時はハンドル部と同様の共振傾向が見られたのに対し、立ち漕ぎ走行時は、20~30Hz付近に加え、100Hz付近と150~200Hzの振幅も大きかった。

4.3. バネ定数と減衰係数の推定

バネ定数と減衰係数を推定するうえで、減衰比を求める必要がある。減衰比は対数減衰率から求める方法と半値幅法によって求める方法が挙げられる。しかし、半値幅法によって減衰比を求められるのは減衰比の値が0.1以下の小さい場合に限られる。減衰比が0.1以下になる

とは言い切れないので、本研究では対数減衰率から減衰比を求める。

時刻における番目の振幅を、同様に、 \dots 、番目の振幅を、 \dots 、とすると、対数減衰率は式(3)で定義され、その対数減衰率から式(4)により減衰比を求めることができる。

$$\dots (3)$$

$$\dots (4)$$

本研究では、厚さ2cm程度の段差を設置し、一定速度かつ自由な体勢で段差を乗り越えるときの自転車の振動から対数減衰率を求めた。その対数減衰率から求めた減衰比から式(5)～式(7)によりバネ定数と減衰定数が推定できる。

$$\dots (5)$$

$$\dots (6)$$

$$\dots (7)$$

ここで、 k : バネ定数[N/m]、 m : 質量[kg]、 A : 振幅のピーク周波数[Hz]、 c : 減衰係数[N・s/m]、 c_c : 臨界減衰係数[N・s/m]

B路面におけるサイクリストAの15km/h走行時のハンドル部の計測結果から対数減衰率を求め、バネ定数と減衰係数を推定した結果を表-2に示す。なお、本研究では質量は前輪と後輪に均等にかかると考え、自転車とサイクリストの合計重量の半分とした。また、振幅のピーク周波数は20Hzとした。

4.4 自転車上下方向加速度シミュレーション

以上で自転車振動モデルの構築は完了となる。構築した自転車振動モデルが実際にどのような振動挙動をするのかを確認する。そこで、計測した路面プロファイルデータをもとに運動方程式を解くことによって自転車上下方向加速度のシミュレーションを行い、実測値と比較した。運動方程式の解法にはMathWorks社のSimulinkを用い、Runge-Kutta法により計算した。B路面におけるサイクリストGの15km/h着席走行時のハンドル部の実測値について、シミュレーションと比較した結果を図-8に示す。振動挙動はある程度一致しているものの、加速度の大きさが実測値よりも2倍程度大きく出た。

5. まとめ

既存の路面平坦性評価指標であるIRIがサイクリストの乗り心地にどの程度相関があるのか調査した。決定係数は0.87となったことから、IRIとサイクリストの乗り心地にはある程度の相関があることが明らかになった。一方、平均IRIとサイクリストの乗り心地評価で異なる

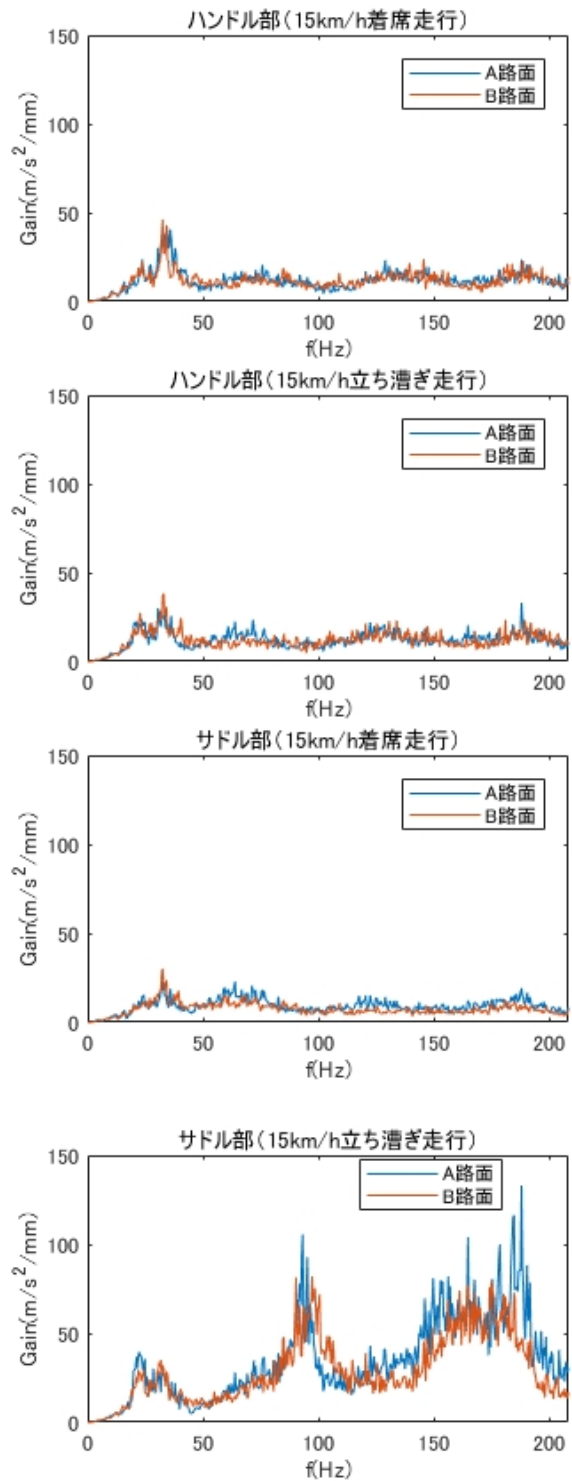


図-7 周波数応答関数の振幅特性

表-2 バネ定数と減衰係数の推定結果

0.08	584281	707
------	--------	-----

路面もあったことから、サイクリストの乗り心地を示す新たな路面平坦性評価指標が必要であることが明らかになった。

次に、自転車振動モデル構築への路面プロファイルと自転車上下方向加速度データを旧北見競馬場にて計測し

た。ハンドル部とサドル部の加速度の平均値を着席走行時と立ち漕ぎ走行時で比較した結果、サドル部の加速度の大きさはサイクリストの走行方法の変化によって変化するが、ハンドル部の加速度の大きさはあまり変化しないということが明らかになった。今後、主観評価の結果と組み合わせることにより、加速度の大きさと振動の感じ方、また、加速度の大きさと乗り心地についての相関を調べて定量的な解析を行いたい。

そして、計測データのスペクトル解析によってバネ定数と減衰係数を推定し、自転車振動モデルを構築した。構築した自転車振動モデルを利用し、実験路面の路面プロファイルを入力として自転車上下方向加速度のシミュレーションを行った。加速度の大きさが実測値よりも大きくなり、再現性の低い結果となった。今後、自転車振動モデルを複雑なものにすることが必要なのか、計測要因の影響であるのかなどを検討し、自転車走行路面の平坦性評価に利用可能な自転車振動モデルを構築していく必要がある。

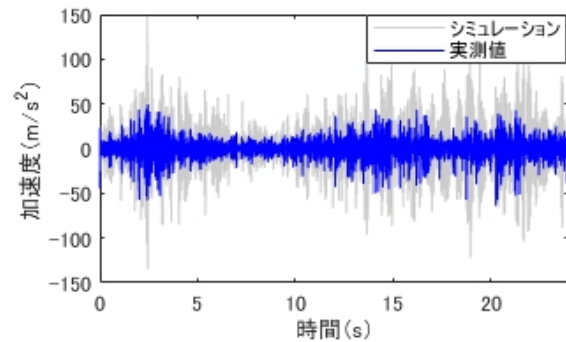


図-8 自転車上下方向加速度シミュレーション結果

参考文献

- 1) Sayers, M. W. and Karamihas, S. M. The Little Book of Profiling, - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, The University of Michigan, 1998
- 2) 石田樹, 岳本秀人, 川村彰, 白川龍生: ドライビングシミュレータによる舗装路面の乗り心地・安心感評価, 舗装工学論文集, 第9巻, pp.49-56, 2004
- 3) 藤田旬, 富山和也, Nueraihemaitijang ABLIZ, 川村彰: 簡易平坦性測定およびGISに基づく市街地道路の路面モニタリング, 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol.69, No.2, pp.I_90-I_97, 2013
- 4) 佐々木優太, 渡辺健太, 高橋清, 萩原亨, 富山和也: 路面平坦性に着目した自転車走行環境の評価に関する研究, 第72回年次学術講演会講演集, 2017

A Study on Roughness Evaluation of Road Surface for Cyclists

Kenta WATANABE, Toru HAGIWARA, Kiyoshi TAKAHASHI,
Kazuya TOMIYAMA, Yuta SASAKI

Cycle Tourism is promoted around Hokkaido in the Hokkaido Comprehensive Development Plan, so it is necessary to evaluate road roughness. First of all, we investigated the relationship between bicycle ride quality and International Roughness Index. In the result, bicycle ride quality was different from that of car, so we realize it is necessary to model bicycle vibration. Next, We get road profile and bicycle acceleration in Kitami Race Course. In the result, we see the acceleration of saddle will be changed according to how to ride bicycle, but that of handle will not be changed. In addition, bicycle ride quality did not necessarily have a relationship with the magnitude of acceleration. Finally, We modeled bicycle vibration by spectral analysis of the road profile data and bicycle acceleration data.