

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 24 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870026

研究課題名(和文)非拘束脈波モニタリングに基づく生体疲労に着目した走行路面管理手法の開発

研究課題名(英文)Development of Road Surface Evaluation Method based on Physiological Fatigue by Unconstrained Pulse Wave Monitoring

研究代表者

富山 和也(Tomiya, Kazuya)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：70589580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：道路利用者は、常に路面由来の車両振動に曝露されるにも関わらず、道路交通環境下での生体疲労において、路面性状による影響は解明されていない。そこで、本研究では、非拘束脈波モニタリングに基づき、「受動疲労」と定義した、路面性状由来の生体疲労を考慮した平坦性の評価方法について検討した。その結果、脈波加速度より得られた、心拍変動の低周波成分(LF)と高周波成分(HF)の比であるLF/HFをモニタリングすることで、時間変化に依存した長期的なメンタルストレスを把握でき、受動疲労の評価につながるということがわかった。また、HFは、短期的なストレスと関係し、乗り心地などの快適性評価に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Although road users are exposed to vehicle vibrations induced by road roughness, the effect of surface characteristics to physiological fatigue of vehicle drivers is still unknown. This study examined a new evaluation method of surface roughness in terms of "passive fatigue" that is the fatigue caused by the roughness based on an unconstrained pulse wave monitoring. For this purpose we conducted a driving experiment to investigate the effect of passive fatigue on drivers by use of a driving simulator. The frequency analysis of heart rate variability from pulse waves was employed to monitor the behavior of high and low frequency components (HF and LF respectively) of the waves. According to the result the ratio of LF and HF (LF/HF) enables us to monitor the long term mental stress that correlates with the passive fatigue. On the other hand HF is effective in evaluating ride and comfort of a vehicle, which is comparatively occurred in short duration.

研究分野：道路工学，交通工学

キーワード：路面評価 心拍変動 脈波 生体疲労 平坦性 ドライビングシミュレータ 生体情報・計測 土木情報学

1. 研究開始当初の背景

社会基盤の根幹となる道路・交通環境の整備には、少子高齢化や環境問題への関心の高まりを背景に、車両走行時の安全性や快適性など質的満足度の向上を目的とした対策が求められている。しかし、道路交通と生体疲労に関する研究においては、以下の課題が残されている。

- (1) 道路管理を目的としたエンジニアリングデザインの視点：質的向上要素である快適性および最低限確保されなければならない安全性については考慮しているが、「生体疲労」という、初期状況では認知し難く潜在的な要素に関する研究は実施されていない。
- (2) 交通安全や運転行動評価を目的としヒューマンファクタの視点：睡眠時間や健康状態など、ライフスタイルに影響される生体疲労については検討されているが、乗員が常に走行路面性状由来の車両振動に曝露されるにも関わらず、道路環境に起因する生体疲労は考慮されていない。

そのため、自身のライフスタイルに影響を受ける生体疲労を「能動疲労」とすると、道路交通環境を原因とする「受動疲労」については道路管理と利用者評価の間にギャップが生じており、依然として十分な研究がなされていないものといえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、受動疲労を考慮した、生体脈波の非拘束モニタリングに基づく、新たな走行路面管理手法の開発である。利用者評価を得るためには、安全かつ効率的な環境での走行試験が必要不可欠であるため、路面評価型ドライビングシミュレータ（以下、DS）による仮想道路環境を構築し、以下について検討する。

- (1) 三次元測量に基づく路面損傷実態の把握と仮想道路空間の構築により、DSにおける走行路面性状を考慮した評価シナリオの設定。
- (2) 走行路面に対する利用者の心理負荷の定量化と、受動疲労の有効指標算定、および生体脈波による受動疲労の発生・蓄積メカニズムの解明。
- (3) 受動疲労の評価尺度および閾値の設定と、既存維持管理手法との比較による有効性・優位性の検証。

図-1 に本研究の概要を示す。

3. 研究の方法

(1) 心拍変動に基づく路面評価

従来、道路利用者意識を対象とした路面評価研究では、体感試験を実施し、乗車感覚を表すアンケート調査による検討が行なわれていた。しかし、アンケートによる評価では、

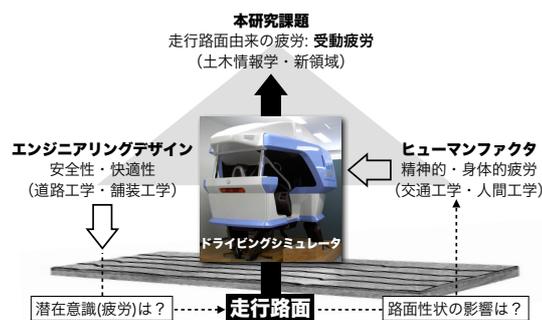


図-1 本研究の背景



(a) 指尖センサ (b) 耳朶センサ

図-2 脈波計測センサ

評価対象前後の路面状況によって利用者の評価尺度が変化することや（係留効果）、数秒にも満たない時間で経験する局所損傷が原因となる過渡振動の評価が課題となる。心拍変動は、脳波や生化学検査、血液検査などと異なり、非拘束かつ非侵襲に生体情報を得ることが可能である。そこで、本研究では、非拘束脈波計測を導入し、客観的かつ合理的な受動疲労評価が期待できる、心拍変動に着目した検討を行なう。

① 心拍変動の概要

心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激によるストレスなどによって、時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎであり、呼吸や体温、ストレスなどによって変化する、自律神経系の活動を表す重要な生体情報の一つである¹⁾。自律神経系は交感神経系および副交感神経系の異なる活動動態を持ち、心拍変動に影響を及ぼす。とりわけ、心拍変動を周波数領域でみた場合、高周波成分（HF: 0.15-0.4Hz）と低周波成分（LF: 0.04-0.15）にピークを持ち、HFは副交感神経系の、LFは副交感神経系と交感神経系の活動を反映することが知られている。

② 心拍変動の計測方法

脈波は、図-2に示す指尖もしくは耳朶センサによる計測が、非拘束かつ簡便なため有望である。本研究では、はじめに、ステアリングの操作性を考慮し、耳朶による計測を実施したが、路面平坦性に起因する車両振動によりノイズが混入し、事後処理が必要となった。一方、指尖計測では、耳朶に比べ、安定した脈波計測が可能であった。また、後述の通り、設定したDS試験シナリオが直線走行であるため、本研究では、指尖計測により脈波情報

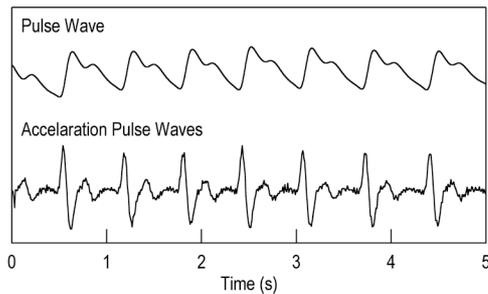


図-3 脈波および脈波加速度の例

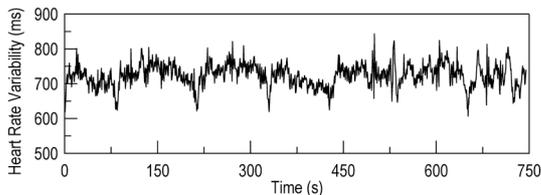


図-4 心拍変動の例

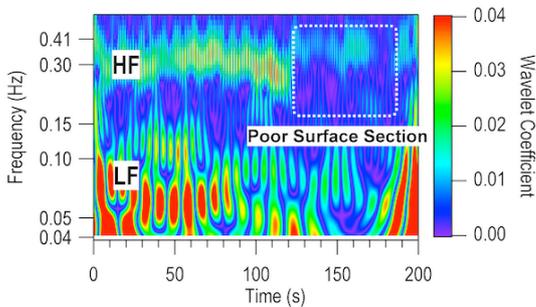


図-5 心拍変動連続ウェーブレット変換例

を得ることとした。

脈波計測による心拍変動は、脈波測定値の二階微分による脈波加速度を用いることで、心電図と同様に心拍変動に関する情報を得ることができる。脈波および脈波加速度の例を図-3に示す。心拍変動は、心電図のR-R間隔に相当する、ピーク間隔(a-a間隔)を計測したものである。図-4に心拍変動の例を示す。なお、本研究において、脈波計測は、株式会社TAOS研究所製のBACS Advanceを用いた。

③ 心拍変動による路面評価

既往研究²⁾では、心電図計測による心拍変動の連続ウェーブレット変換により、周波数領域におけるHFに着目することで、走行路面に起因する潜在的なストレスの把握が可能であることを明らかにしている。図-5に、心拍変動の連続ウェーブレット変換例を示す。図中、スカログラムは、心拍変動の振幅と対応したウェーブレット係数の絶対値を表し、周波数は対数表示とした。ここで、120から180秒が路面平坦性の低下区間であるが、区間中、HFの減衰が確認できる。これは、外部刺激に起因するメンタルストレスにより、呼吸系の副交感神経成分が不活性化したためと考えられる。

一方、LFは、ストレスに対する緩やかな適応に関連し、ストレス状況下では著しく増大することが知られている。ここで、LFは交感



図-6 路面評価型DSによる走行試験状況

神経および副交感神経系両者の活動を反映することから、LFとHFの比(LF/HF)をとり、血管運動性の交感神経系活性化に関連したストレス指標として提案されている。そこで、本研究では、HFとLF/HFに着目し、受動疲労発現に関係するストレスの把握を試みる。

(2) 路面評価型DSを用いた走行試験

① 路面評価型DSの概要

DSを用いた走行試験は、実路試験に比べ、安全性の確保や実験条件の容易な設定、同一条件で繰り返し試験が行えるなど多くの利点を有する。そこで本研究では、路面平坦性に起因する車両振動以外のストレス要因を排除し、試験条件を単純化するため、路面性状に関する実データの利用および再現が可能な、路面評価型DSを用いて走行試験を実施した。路面評価型DSによる走行試験状況を図-6に示す。

従来、DS研究における路面データの利用は、道路線形と関係の深い数十メートル単位の長波長成分に限られていた。一方、路面評価型DSは、乗員の乗り心地や車両の操縦性・安定性に影響する、数センチメートル単位の路面波長まで、測量で得られた実測データを用いて再現することが可能である。

② 試験参加者

走行試験は、健康な20代の学生9名(男性9名、平均年齢21.3歳)の協力を得て実施した。試験参加者(以下、参加者)は、試験目的および条件に関し十分なインフォームドコンセントを受けた後、路面評価型DSに乗りし、脈波センサを装着、脈波の安定を確認してから試験走行を行った。

③ 試験シナリオ

走行試験における路面条件は、車両振動に基づく乗り心地と対応し、平坦性の国際標準指標であるIRI(International Roughness Index)が(a)0.9、(b)5.3および(c)10.5mm/mの3水準、評価延長150mとした。ここで、IRIは、二軸四輪車の一輪を取り出した、2自由度の車両運動モデルであるクォーターカーモデルを用

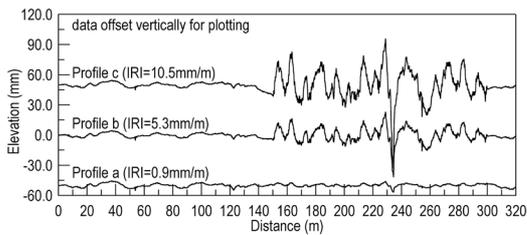


図-7 試験コースの路面プロファイル

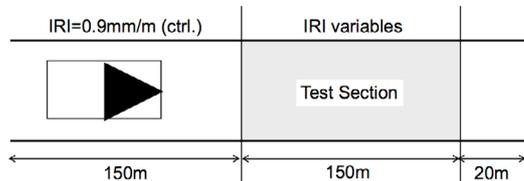


図-8 走行試験シナリオの概要

い、80km/h で走行した際のサスペンションストローク累積値を、走行延長で正規化した値である。図-7 に試験コースの路面プロファイルを示す。IRI に基づく平坦性水準は、路面(a)が「高速道路」、路面(b)が「供用後の舗装」、路面(c)が「損傷を受けた舗装」相当³⁾である。各路面プロファイルは、図-8 に示す通り、前後にコントロール区間を設けて配置し、1 試行あたり各路面水準をランダムに 9 回体験するよう試験コースを設計し、試行回数は 5 回とした。参加者は、計 135 回の平坦性区間を走行し、試験時間は 1 人当たり約 1 時間である。なお、コントロール区間の IRI は 0.9mm/m であり、路面(a)と同様の路面プロファイルを設定した。

4. 研究成果

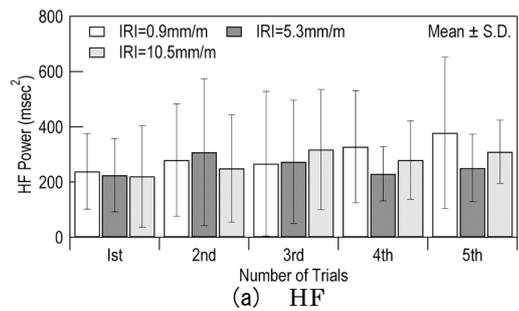
(1) 心拍変動解析の概要

上述の通り、心拍変動は、周波数領域において、自律神経系の活動を反映するため、その解析は、周波数領域で行なう必要がある。そこで、はじめに、パワースペクトル密度を、解析時間 10 秒とし、1 秒毎にスライドさせながら計算した。続いて、得られたパワースペクトル密度を、区間 0.04-0.15Hz (LF) および 0.15-0.4Hz (HF) でそれぞれ積分し、LF および HF のパワーを計算した。なお、本研究では、試行回数の増加による影響に着目し、評価対象路面上で、各参加者の 1 回の試行から得られた各心拍変動指標を、路面条件ごとに平均したデータを用いる。

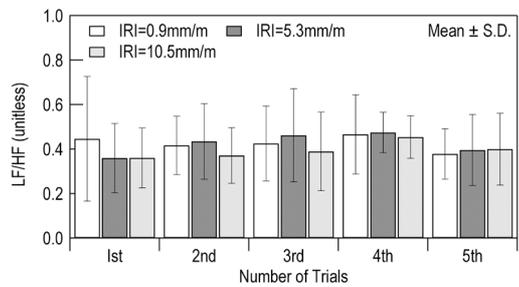
(2) 試行回数と IRI が

心拍変動指標に及ぼす影響

試行回数および IRI が、各心拍変動指標に及ぼす影響を調べるため、有意水準 5% で対応のある二元配置分散分析を行なった。また、分散分析において、主効果が有意となった場合には、事後にテューキーの HSD 法により多重比較検定を行なった。なお、統計解析には、MathWorks 社の MATLAB Statistical Toolbox Ver 9.0 (R2014a)⁴⁾を用いた。図-9 に、



(a) HF



(b) LF/HF

図-9 試行回数および IRI と心拍変動指標の関係

試行回数および IRI に対する各心拍変動指標の計測結果を示す。ここで、HF は、値が小さくなる程、LF/HF は値が大きくなる程ストレス状態となる。表-1 および表-2 に各心拍変動指標に関する分散分析表を、以下に得られた知見を示す。

① HF

表-1 より、HF では、交互作用はみられず試行回数の主効果のみが有意となった。試行回数について、多重比較検定を行なったところ、試行を重ねるにつれ HF は増加し、1 試行目と 5 試行目の差が有意となった。これは、試行回数の増加に伴い、参加者のストレスが弱くなったことを表している。既往研究⁵⁾では、試行を重ねるにつれ、参加者は車両振動に順応し、HF におけるストレスの影響がみられなくなる場合があることを示唆している。本研究で得られた知見は、それと矛盾していない。また、図-9(a)より、IRI 値が高い方が、HF が小さく、ストレスが強くなる傾向がみられた。

② LF/HF

表-2 より、LF/HF では、交互作用と主要因のいずれにも有意差はみられなかった。ここで、交互作用は有意とならなかったが、図-9(b)より、試行の初期段階においては、IRI の増加に反比例して LF/HF が減少する傾向が窺える。図-10 に、LF/HF の IRI と試行回数の関係を示す。図より、LF/HF は、1 から 4 試行目では IRI の増加に反比例し減少する傾向にあるが、5 試行目では IRI に比例して増加する結果となった。そこで、試行回数ごとに IRI と LF/HF を直線回帰し、得られた回帰係数と試行回数の関係について検討した。図-11 に試行回数と回帰係数の関係を示す。図より、試行回数と回帰係数の間に強い正の相関がみられ、5 試行目には、回帰係数が正の値となっている。これは、試行回数の増加

表-1 HFに関する分散分析表

Index: HF					*p<0.05
Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Ratio	Prob. >F
Subject	3319666.3	8	414958.3	39.99	0.0496 *
Num. of Trials	102008.9	4	25502.2	2.46	0.1654
IRI	37954.8	2	18977.4	1.83	0.2373
Num. of Trials * IRI	110182.0	8	13772.8	2.33	
Error	1162185.8	112	10376.7		
Total	4731997.8	134			

表-2 LF/HFに関する分散分析表

Index: LF/HF					
Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Ratio	Prob. >F
Subject	1.63877	8	0.20485	14.75	
Num. of Trials	0.10558	4	0.02640	1.90	0.1153
IRI	0.02896	2	0.01448	1.04	0.3560
Num. of Trials * IRI	0.06259	8	0.00782	0.56	0.8059
Error	1.55552	112	0.01389		
Total	3.39143	134			

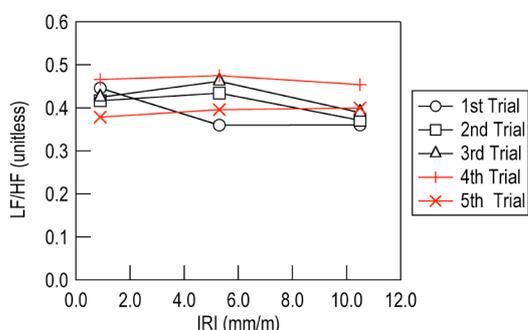


図-10 試行回数ごとのLF/HFとIRIの関係

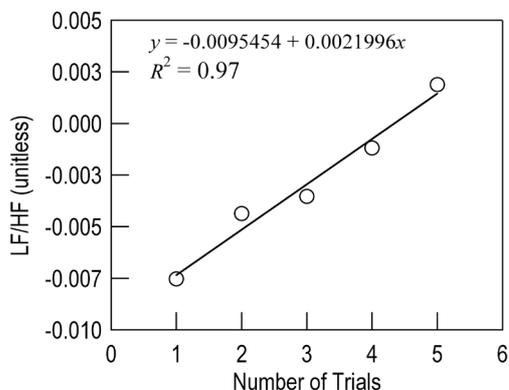


図-10 LF/HFとIRIの直線回帰から得られた回帰係数と試行回数の関係

に従い、交感神経系が活性化し、路面に対するストレスが増加したものといえる。

(3) 心拍変動による受動疲労評価

前節までに、DSによる走行試験を行ない、試行回数およびIRIが、非拘束脈波計測から得られた心拍変動指標のHFとLF/HFに及ぼす影響について検討してきた。以上の結果をもとに、受動疲労評価の観点から、各心拍変動指標についてまとめると以下ようになる。

① HF

参加者は、路面性状を原因とし、一時的にストレス状態となるが、走行体験を重ねるにつれ、次第に車両振動へ順応し、HFは高くなり、ストレスが弱くなる。すなわち、HFから得られる情報は、路面に対する短期的なストレスと関わりがあるものといえる。

つれ、次第に車両振動へ順応し、HFは高くなり、ストレスが弱くなる。すなわち、HFから得られる情報は、路面に対する短期的なストレスと関わりがあるものといえる。

② LF/HF

参加者は、走行体験を重ねるにつれ、路面性状を原因とした車両振動によりストレス状態となる。すなわち、LF/HFから得られる情報は、時間変化に依存した長期的なストレスと関係し、受動疲労の発現と関わりがあるものといえる。

以上より、生体疲労をメンタルストレスの持続時間に依存した蓄積と考え、脈波計測に基づき心拍変動のLF/HFをモニタリングすることで、路面性状由来の疲労である受動疲労の状態を非拘束・非侵襲に把握できるものと考えられる。一方、HFは、走行初期段階での路面性状に対するストレスを検知できることから、乗り心地などの快適性評価に有効であるといえる。

<引用文献>

- 1) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 354-381, 1996.
- 2) 富山和也, 川村 彰, 高橋 清, 石田 樹: 生体情報を利用した路面乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリング, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, Vol.67, No.2, pp.I 125-I 132, 2011.
- 3) 土木学会 舗装工学委員会 路面性状小委員会: 舗装工学ライブラリー1 路面のプロファイリング入門 -安全で快適な路面をめざして-, 丸善, 2003.
- 4) The MathWorks, Inc.: *Statistical Toolbox User's Guide R2014a*, 2014.

- 5) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹, 秋田谷勇輝: ドライビングシミュレータおよび生体情報を用いた路面乗り心地評価システムの構築, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.68, No.2, pp.I_135-I_141, 2012.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) 富山和也, 川村 彰, 岩本惇志: 生体脈波計測による路面性状由来の運転時疲労評価, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.71, E-28. 2015 年 1 月.
- (2) 富山和也, 川村 彰, 大廣智則: モバイルプロファイロメータを利用した高速道路における絶対プロファイルの推定, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3, pp.I_41-I_48, 2014 年 12 月. 【査読あり】
- (3) Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Tomonori OHIRO: Automatic Detection of Surface Distress due to Frost Heaving on Expressways by Use of an Accelerometer-Based Profilometer, Journal of JSCE, Vol.2, No.1, pp.323-330, Dec. 2014. 【査読あり】
DOI: 10.2208/journalofjsce.2.1_323
- (4) 富山 和也, 川村 彰, 藤田 旬, 石田 樹: 地方自治体の舗装維持管理実態を考慮した市街地道路の効果的な路面点検手法の開発, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.69, No.2, pp.I_54-I_62, 2014 年 3 月. 【査読あり】
- (5) Kazuya Tomiyama, Akira Kawamura, Ohiro Tomonori: Lifting Wavelet Transform for Distress Identification Using Response Type Profilometers, Proceedings of Transportation Research Board, Vol.93, No.14-3520, Jan. 2014. 【査読あり】
- (6) 富山和也, 川村 彰, 大廣智則: 加速度計を用いた平坦性測定装置による凍上を受けた高速道路の路面損傷箇所の特定, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3, pp.I_17-I_24, 2013 年 12 月. 【査読あり】
- (7) Kazuya Tomiyama, Akira Kawamura, and Tateki, Ishida: Automatic Detection Method of Localized Pavement Roughness Using Quarter Car Model by Lifting Wavelet Filters, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.6, No.5, pp. 627-632, Sep. 2013. 【査読あり】

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 富山和也, 川村 彰, 岩本惇志: 非拘束脈波計測に基づく生体疲労に着目した路面平坦性評価, 土木学会土木情報学委員会, 東京・四谷, 2014 年 9 月.
- (2) 富山和也, 川村 彰: モバイルプロファイロ

メータを用いたリフティングウェーブレットによる路面損傷の検出, 土木学会, 千葉県船橋市, 2013 年 9 月.

- (3) Kazuya Tomiyama, Akira Kawamura, and Tateki Ishida: Automatic Detection Method of Localized Pavement Roughness Using Quarter Car Model by Lifting Wavelet Filters, 8th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, Taipei, Taiwan, Jul. 2013.

[その他]

WEB サイト: 北見工業大学社会環境工学科交通工学[モビリティマネジメント分野]
<http://cee.civil.kitami-it.ac.jp/study/traffic/#tomiyama>

6. 研究組織

研究代表者

富山 和也 (TOMIYAMA, Kazuya)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号: 70589580