

PMSへの応用に向けた乗り心地のモデル化に関する研究*

Research on modeling of ride comfort for application to PMS *

桐生健志**・角川浩二***

By Takeshi KIRYU**・Koji TSUNOKAWA***

1. はじめに

わが国では現在、インフラの老朽化が進み、新規建設に対し維持・修繕の需要が高まってきている。現在の厳しい財政状況の中、これらの需要に対応するインフラ整備を行うためには、新規建設と維持・修繕を総合的に捉えたインフラ整備戦略とそのマネジメント手法の確立が必要不可欠である。道路舗装の分野においても、維持・修繕の総合マネジメントシステムの確立が急務であり、PMS(Pavement Management System : 舗装マネジメントシステム)の研究が盛んに行われてきており、実際に導入を目指している自治体も見られている。

また一方、道路舗装に対しての利用者のニーズも変化してきており、現在ではより質の高い舗装が要求されている。すなわち、より快適な走行性を確保することが舗装の重要な役割となってきていると言える。そこで、道路利用者の感じる走行性、すなわち乗り心地を舗装評価の一項目としてPMSに組み込むことができれば、より利用者側の意見にそった舗装維持管理が可能になると考えられる。そのためにはまず第一段階として乗り心地を定量化する必要がある。

そこで本研究では、被験者による乗り心地評価実験を基に、乗り心地をモデル化することを目的とする。またその手法として累積ロジスティック回帰を提案し、その有用性について検討を行う。累積ロジスティック回帰を用いた理由としては、乗り心地は人間の感覚という曖昧なものであり、一定の間隔尺度として捉えることはできず、順序尺度として扱うのが妥当、と考えるためである。また乗り心地を推定する際の基礎となる舗装状態を表す変数としては、主として車両の振動加速度とIRI(International Roughness Index)を考え、両者の乗り心地に対する説明力を比較する。

*キーワード：計画手法論、整備効果計測法、土木施設維持管理

**非会員、埼玉大学大学院理工学研究科 環境システム工学系専攻 (mail:s07me112@mail.saitama-u.ac.jp)

***フェロー会員、Ph. D.、埼玉大学大学院理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 (埼玉県さいたま市桜区下大久保255 TEL・FAX 048-858-3825)

2. 乗り心地評価実験

モデル化する際に必要となるデータを収集するため、被験者による乗り心地評価実験を行った。予め設定した評価区間を実際に走行し、被験者に乗り心地を評価させる、というものである。乗り心地を説明する指標として、IRI、振動加速度の他、走行速度、走行開始からの経過時間が予測されたため、これらを走行時に同時に測定した。また、被験者の属性による影響についても考慮するため、事前に被験者にアンケートを行い、これらもモデル化の際説明変数として組み込むこととした。以下、実験概要について示す。

(1) 諸条件

実験は2日間、両日とも9～16時の時間帯に行い、被験者は19～25歳の男女14名であった。実験車両はトヨタ製アリオン(1.5BEAMS 1NZ-FEVT-i)を使用し、運転者の他、助手席にIRI計測者、右後部座席に加速度計測者が同乗し、被験者は左後部座席に乗車することとした。走行路については、さいたま市、志木市において舗装状態の異なる評価区間を14本、事前に選定した。走行路の選定に際しては以下の点に留意することとした。

- ①信号等の影響がなく、区間内で速度を一定に保てる
- ②大きなカーブがなく、遠心力などの影響がない
- ③ハンプなど作為的につくられた路面の凹凸がない
- ④なるべく舗装状態に差がある道路を選択する

走行路の全長は約20 km、所要時間は50～60分であった。走行路の長さが100～300mの間では乗り心地に差が見られないとされている¹⁾ことから、本実験では1つの評価セクションの長さを100～200mとし、また評価セクション内では法定速度を基準に一定速度で走行した。また、便宜的に評価区間を4つの道路クラス(国道・幹線道路、準幹線道路、一般道(住宅街道路)、農道)に分類した。

(2) 乗り心地評価

被験者は、各評価区間に対し以下3点について評価する。

a) 乗り心地評価

乗り心地の評価は、図-1のようにスケール上にチェックする方法をとる。被験者に対しては、乗り心地の評価基準について明確に説明することはせず、被験者個々の基準に従って乗り心地を評価させた。チェックした点が含まれる箇所を乗り心地評価値（非常に悪い：1、悪い：2、・・・）とする。

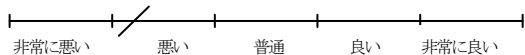


図-1 乗り心地評価記入例

b) 補修必要の有無

乗り心地評価後、その評価区間は補修の必要があると考えるかどうかの2択について回答する。

c) 補修必要の有無（道路クラスを考慮）

a), b)について回答後、被験者に道路クラスを伝え、道路クラスを考慮した上で補修必要の有無について再度回答する。

(3) 各物理量の測定

振動加速度の測定は、被験者の座席の背面、座面に加速度計（圧電式加速度ピックアップPV-62、RION製）を設置し行った。人体に作用する加速度を計測できるように、被験者には走行中2つの加速度計に接しているように指示し、また被験者の体格により加速度計の設置位置を調整した。計測方向については、背面、座面それぞれx、y、z 3方向、計6方向測定した。各計測方向を図-2のように定める。なお分析には加速度の値としてR. M. S. (root mean square) 値を用いた。R. M. S. 値の定義式は以下に示す。

$$R.M.S. = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$a(t)$: 加速度形計測値(m/s²)、 T : 計測時間(s)

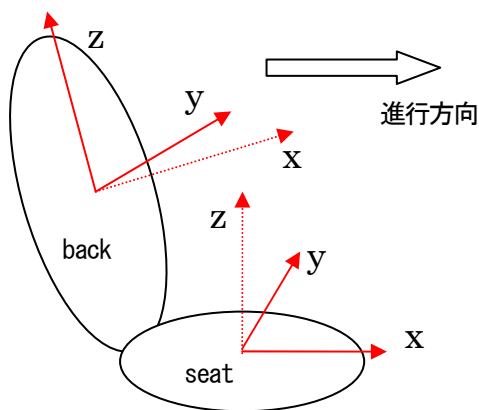


図-2 加速度の計測方向

また、走行時の瞬間的な衝撃を考慮するため、合成加速度に対し衝撃基準値を設定し、基準値を超えたものを衝撃と定義する。また、衝撃数を時間で除したものを衝撃頻度とし、分析に用いる。IRI及び走行速度の測定は、ROMDAS (Road Measurement and Data Acquisition System) により行った。

3. 乗り心地推定モデル

実験で得られたデータを基に乗り心地推定モデルを構築する。前述のように累積ロジスティック回帰を用い、モデルの精度については自由度調整済みNagelkerke-R²により考察する。また、各変数の乗り心地に対する説明力についてはパラメータのp値を基に考察する。p値は、パラメータ推定値を標準誤差で除した値（これをWald統計量と呼ぶ）が一定の仮定のもとでχ²分布に従うことから、Wald統計量を基に計算される。p値が小さいほど説明変数の有意性が大きい。

(1) 加速度の変数選択

加速度の計測は前述のように6方向について行ったが、この6方向の加速度は互いに独立な変数とは考えられず、そのため乗り心地推定モデルの説明変数として用いるにあたっては変数選択が必要となる。

そこで6方向すべての加速度を同時に説明変数として組み込みモデルを推定した。モデル推定結果を以下に示す。P₁ ~ P₅ は、各乗り心地評価値の選択確率式である。選択確率が最も大きいものを個人は選択する、と仮定する。また、表-1はこのモデルにおける各方向加速度のp値である。

$$P_i = \frac{1}{1 + \exp(Z - \theta_i)} - \sum_{k=1}^{i-1} P_k \quad (i = 1, \dots, 4)$$

$$\theta_1 = 14.563, \theta_2 = 17.805, \theta_3 = 20.845, \theta_4 = 23.971$$

$$Z = 9.099backX - 3.564backY + 2.039backZ$$

$$+ 0.712seatX + 12.357seatY - 12.059seatZ$$

$$P_5 = 1 - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)$$

表-1 各方向加速度のp値

説明変数	p
back-x	0.097
back-y	0.002
back-z	0.238
seat-x	0.719
seat-y	0.014
seat-z	0.001

背面左右方向加速度(back-y)と座面上下方向加速度(seat-z)のp値が小さく、変数として有意性が大きいと考えられる。そこでこの2方向の加速度を説明変数として再度モデルを推定したところ、p値はそれぞれ、back-y : 0.050、seat-z : 0.001となり、両者の有意性が保たれている。すなわち両者は独立な変数であると考えられるため、以後分析にはこの2方向の加速度を用いることとする。

(2) IRI、加速度のモデル比較

IRIと加速度は共に直接、または間接的に舗装状態を表す変数であるため、相関が高く、両者は独立な変数ではないと考えられる。そのため、両者を共に説明変数としてモデルに組み込むことは有意ではなく、どちらか一方、より説明力の高い変数を用いるべきであると考えられる。

そこで、IRI、加速度両者によるモデルの精度を比較する。説明変数として、IRI、加速度の他、走行速度、経過時間、衝撃頻度、個人の属性を組み込み、IRI、加速度両者のモデルを比較した。Nagelkerke-R²の比較では、IRIによるモデル : 0.414、加速度によるモデル : 0.426となり、加速度によるモデルの方がより精度の高いものとなった。しかし、Nagelkerke-R²に大きな差はなく、IRIと加速度の説明力に大きな差はないと考えられる。

また、両モデルにおける各説明変数の有意性については、以下表-2、表-3にそれぞれIRIによるモデル、加速度によるモデルの各説明変数のp値を示す。

表-2 各説明変数のp値 (IRIによるモデル)

説明変数	p
IRI	0.000
走行速度	0.055
経過時間	0.261
衝撃頻度	0.777

表-3 各説明変数のp値 (加速度によるモデル)

説明変数	p
back-y	0.032
seat-z	0.000
走行速度	0.246
経過時間	0.001
衝撃頻度	0.136

p値から、IRI、加速度は有意性が大きいことがわかる。また、走行速度はIRIによるモデルでは有意性が大きい、加速度によるモデルにおいては有意性は小さい。逆に経過時間、衝撃頻度は加速度によるモデルで

は有意性が大きい、IRIによるモデルでは有意性が小さい。これはIRI、加速度の変数の特性を表していると推測できる。例えば、IRIは走行速度にあまり依存しないが、加速度は走行速度に多少影響されると考えられる。また衝撃頻度については、IRIは瞬間的な衝撃の影響を表現するが、加速度は本研究のようにR.M.S.値を用いた場合には別途瞬間的な衝撃に対する考慮が必要であると考えられる。また経過時間については検討が難しいが、被験者の疲労や振動に対する慣れなどが乗り心地に影響を与えていると考えられる。

実験前には、加速度は人体に作用する影響を直接表すものであるため、IRIに比べ乗り心地を良く説明すると予測された。実際にモデルの推定結果からも加速度によるモデルはIRIによるモデルに比べやや良好な適合度を得たが、その差は大きなものではなく、IRIを用いてもほぼ同程度乗り心地を推定できることがわかった。また、加速度の計測には被験者が必要であるのに対し、IRIの測定は被験者が必要なく簡便である点、またIRIは瞬間的な衝撃をある程度表現すると考えられる点から、乗り心地を推定する指標としてはIRIの方がより実用的であるものと考えられる。

そこで、IRIによるモデル推定結果を以下に示す。P₁ ~ P₅ は、各乗り心地評価値の選択確率式である。

$$P_i = \frac{1}{1 + \exp(Z - \theta_i)} - \sum_{k=1}^{i-1} P_k \quad (i=1, \dots, 4)$$

$$\theta_1 = -8.486, \theta_2 = -5.429, \theta_3 = -2.796, \theta_4 = -0.00114$$

$$Z = -1.002IRI - 0.0141speed$$

$$P_5 = 1 - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)$$

4. 乗り心地許容値

前章において、IRIや加速度により人間が感じる乗り心地をある程度推定できることが分かったが、それに加えて道路利用者がどの程度乗り心地が悪く感じたときに補修が必要だと感じるかを知ることができれば、より維持管理に役立つのではないかと考えられる。そこで補修必要の有無についての被験者の回答を基に、道路利用者が補修を必要だと感じる際の乗り心地、すなわち乗り心地許容値を推定する。乗り心地許容値は、「補修必要あり」の選択確率を基に推定する。選択確率の推定には二項ロジットモデルを用い、説明変数に乗り心地を用いた。二項ロジットモデルにおいて、選択確率は以下の式により表される。

$$P = \frac{1}{1 + e^V}, \quad V = \beta_0 + \beta_1 \times (\text{乗り心地評価値})$$

二項ロジットモデルにより推定された各乗り心地における「補修必要あり」の選択確率から、乗り心地許容値を推定する。また、道路クラスを考慮した場合と考慮に入れない場合において、乗り心地許容値に差が生じるかについて考察する。図-3は道路クラスを考慮した場合の4つの道路クラス、また道路クラスを考慮に入れない場合の計5パターンにおける、各乗り心地評価値での「補修必要あり」の選択確率を表したグラフである。

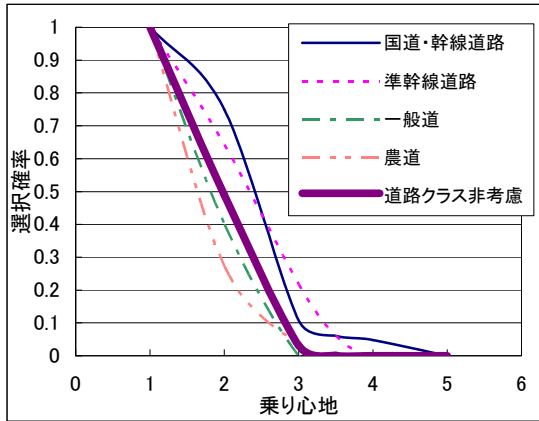


図-3 乗り心地と補修必要ありの選択確率

グラフから、道路クラスを考慮することにより「補修必要あり」の選択確率に変化が生じることがわかる。また国道・幹線道路と準幹線道路については、グラフが交差していることから大きな差がないと考えられる。よってこの2つのクラスについては「幹線道路」とし、同一のクラスとみなす。

このような「補修必要あり」の選択確率を基に乗り心地許容値を推定するが、その際どの程度の選択確率、すなわち何割の道路利用者が補修すべきと感じた乗り心地を許容値とするかにより、値は変わる。そこで例として許容値を示す選択確率を0.2、0.3、0.5とした場合における、各道路クラスの乗り心地許容値を表-4に示す。

表-4 各道路クラスの乗り心地許容値

	「補修必要あり」の選択確率		
	0.2	0.3	0.5
幹線道路	2.9	2.6	2.3
一般道(住宅街)	2.4	2.1	1.8
農道	2.1	1.8	1.5

さらに、求められた乗り心地許容値を、前章において示した乗り心地推定モデルによりIRI許容値に変換する。IRIによる乗り心地推定モデルでは走行速度も有意な変数であるため、乗り心地許容値からIRIを推定する際には速度を与える必要がある。そこで、幹線道路は50km/h、一般道は40km/h、農道は30km/h、と速度を仮定しIRI許容値を推定する。推定結果を表-5に示す。

表-5 各道路クラスのIRI許容値

	「補修必要あり」の選択確率		
	0.2	0.3	0.5
幹線道路	4.2	5.0	5.8
一般道(住宅街)	5.7	6.6	7.5
農道	6.5	7.3	8.2

結果から、幹線道路においてはIRIの許容値が大きく逆に農道ではIRIの許容値が小さいという傾向が見られる。このことから、道路クラス、すなわち道路の規模や重要性などは利用者が感じる補修の必要性を左右する大きな要因であると考えられる。

5. おわりに

乗り心地推定モデルについては、加速度によるモデル、IRIによるモデルとも同程度の精度のモデルを推定することができた。これらの累積ロジスティック回帰によるモデルの適合度については、R²がいくつ以上なら良い、といったような明確な基準がないため判断しにくい、乗り心地という人間の感覚に左右される曖昧なものを被説明変数としているモデルとしては、ある程度高い適合度を得られたのではないかと考えられる。よって、乗り心地を推定するモデルとして累積ロジスティック回帰は有用な手段であるのではないかと考えられる。

一方問題点としては、本研究で得られた結果はすべて実験に用いた車両トヨタアリオンの場合である、ということがあげられる。車種によってIRIと走行時に乗員に作用する振動との関係は異なるため、他の車種では結果が異なるものと考えられる。

また、本研究では被験者の属性について乗り心地への明確な影響を特定することができなかった。これについては被験者数を増やすことでより良い結果を得ることができるのではないかと考えられる。被験者の属性による影響を特定することで、より精度の高い乗り心地推定モデルを構築できるのではないかと考える。

参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：平成14年度路面管理基準に関する調査検討報告書，2003。
- 2) 佐々木邦明，藤井聡，山本俊行：交通行動の分析とモデリング，技報堂出版，2002。
- 3) 石村貞夫：社会調査・経済分析のためのSPSSによる統計処理，東京図書，2005。
- 4) 羽生田康雄：路面評価への応用を目指した車両振動計測に基づく走行快適性評価法に関する研究，埼玉大学大学院修士論文，2005。