

乗り心地を考慮した車両評価システムの開発

神生 直敏, 飯田 憲一

Development Vehicle Evaluation System Adding Ride Feeling

Naotoshi KAMIO, Ken'ichi IIDA

抄 録

近年、一般乗用車だけでなくトラック等の産業用車両においても運転者の疲労軽減等の観点から、乗り心地向上は重要な課題である。こうした課題に応えるため、人的感覚が重要な設計要素になる車両部品等の機械的情報と人間による乗り心地官能評価情報から、波形処理手法や重要度分析・相関分析・両側T法を利用して、乗り心地の総合評価値を予測する推定式を算出した。得られた推定評価値と従来の官能評価結果とを比較した結果、良好な推定精度であることを確認した。

キーワード：乗り心地，評価，AHP法（階層分析法），相関分析，両側T法，独立成分分析

Abstract

Recent years, in terms of occupational safety, etc., improvement of ride feeling of the driver is an important issue in industrial vehicles such as trucks. In order to meet these issues, from sensory evaluation information and mechanical information of mechanical vehicle components, such as human sense is an important design element, we calculated the evaluation value equation to predict the overall rating of ride feeling using the importance of analysis and correlation analysis, both sides T (Taguchi) method and waveform processing technique. As a result of comparison between the estimated evaluation values and the conventional sensory evaluation, it was confirmed that a good estimation accuracy.

KEY-WORDS : Ride Feeling, Evaluation, AHP (Analytic Hierarchy Process), Correlation Analysis, both-sides T Method

1. はじめに

近年、産業用車両では、運転者の疲労軽減など労働安全の観点から、乗り心地の向上は重要な課題となっている。乗り心地評価は従来、官能評価のみで行うのが一般的である。しかし、車両を構成する機械システムが複雑化する中、路面状況など様々な使用環境を考慮しつつ、車両の機械情報などから乗り心地を総合的に捉えることができる評価方法が求められている。一般車両では乗り心地評価に係る各種の研究事例¹⁾²⁾はあるものの、産業用車両では十分に確立しているとは言い難い。道内企業からも、複雑な機械システムからなる車両に対して乗り心地といった人的観点から、定量的かつ総合的に評価できるシステムづくりの要望が寄せられている。

そこで本研究では、産業用車両の乗り心地を対象に、車両

を構成する機械装置・部品の計測データと評価者（テストドライバー）による乗り心地の官能評価データを統合し、総合評価する車両評価システム開発に取り組んだ。

2. 車両評価システムの開発

従来、官能評価データのみで算出していた乗り心地評価を、車両走行時の官能評価データと車体振動データの双方を使用して定量的な乗り心地評価値を算出する方法を検討した。

定量的な乗り心地評価値を得るためには、評価者の主観に左右される官能評価データの項目数をできるだけ少なくし、より多くの機械的な計測データを用いて評価値を算出する必要がある。

そこで、各種の分析・評価手法を検討した結果、複数の手

事業名：経常研究

課題名：乗り心地を考慮した車両評価システムの開発

法を用いて評価値を算出することとした。今回開発した車両評価システムにおける検討フローは次のとおりである（図1）。

- ①車両の走行試験時に、車体の機械的計測データと官能評価データを収集する。
- ②官能評価データについては重要度分析を行い乗り心地への影響が強い項目を絞り込む。
- ③機械的計測データは信号分離技術として独立成分分析を使って処理を行い、有効な信号を抽出する。代表的な機械的計測データとして、車体に起因する3方向の振動データを使用する。
- ④機械計測データと官能評価データの相関分析を行い、振動データとの相関が高い官能評価データを振動データと置き換えることで、さらに官能評価項目数の絞り込みを行う。
- ⑤項目数を絞りこんだ官能評価データ・定量的な振動データ・実験条件から、両側T法により総合評価推定式を導出する。



図2 走行試験車両と頸部振動センサ（左下）

今回、データ収集での走行数は16走行であった。加えて、車両のテストドライバー4名には、官能評価7項目に関して、乗り心地評価での重要性についてアンケート調査を実施した。アンケート調査の方法については、5. 原因分析技術の項で説明する。

2.2 情報が混在した波形から有益な波形を分離する技術の検討

過去の乗り心地評価の研究では、路面性状に注目して乗り心地を評価している事例³⁾もあり、官能評価との相関性の点でからも、段差などの路面性状の影響を抽出するのが有効と考えられる。しかし、車両構造上、振動センサで測定したデータの場合、そのままでは複数の振動情報が混在している可能性がある。

本研究では、車両構造上から様々な情報が混在する振動データから段差情報のみの振動データを収集する方法として、独立成分分析（ICA; Independent Component Analysis）を検討した。独立成分分析は、多変量の信号を複数の独立した成分に分離するための計算手法であり、解析後の絶対値が異なるなどの利用条件もあるが、音声分離や画像処理、脳波解析の分野での適用が多い手法である。今回、車両評価システムの適用について検討するため、事前に簡易実験を実施した。

実験では、図3に示すように、4つの加速度センサを載せた台車に送風機を載せて、床面の段差乗り上げ時に計測した振動データから段差に起因する信号だけを分離できるか試みた。解析に使用した独立成分分析の手法はHyvärinen and Ojaが開発したFastICA⁴⁾である。FastICAは固有値数を算出できることで、有効な成分数を把握できる。

解析の結果、独立した成分が2種類と判定され、2つの波形成分（ICA1, ICA2）が抽出された（図4）。別途計測した段差のみの情報と波形形状を比較した結果、一方の成分とはほぼ一致した。収集した振動データから独立成分分析法で段差情報を分離・抽出できたと判断し、この結果を車両評価システムの中で、振動データの波形処理方法に利用することとした。

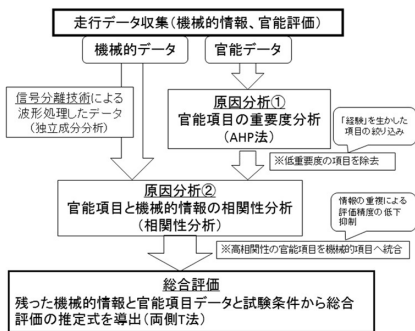


図1 本評価システムでの評価フロー

2.1 走行試験と各種データの収集

車両走行データは、株式会社ワークム北海道の協力を得て、段差のある車両テストコースを走行する大型貨物車から収集した。走行試験における測定内容は、表1のとおりである。官能評価項目は、協力企業から、乗り心地に関する官能

表1 走行試験での測定内容

種類	内容
官能評価項目(7)	サス感A,B,C,D,走行感A,B,ボディ剛性感
振動項目(3)	前後方向,左右方向,頸部上下方向
実験条件(2)	サスペンション有・無,車速3パターン

評価項目の調査を行い、代表的な7項目を抽出した後、それぞれ10点法にて測定した。車両の振動項目は、車両走行時の前後・左右・上下の3種類の振動波形を測定した。なお、上下振動については、協力企業での測定方法を考慮し、図2に示すように、評価者の頸部にセンサをつけて測定した。実験条件は、サスペンションの有無および車速3パターン（40, 60, 80km/h）である。

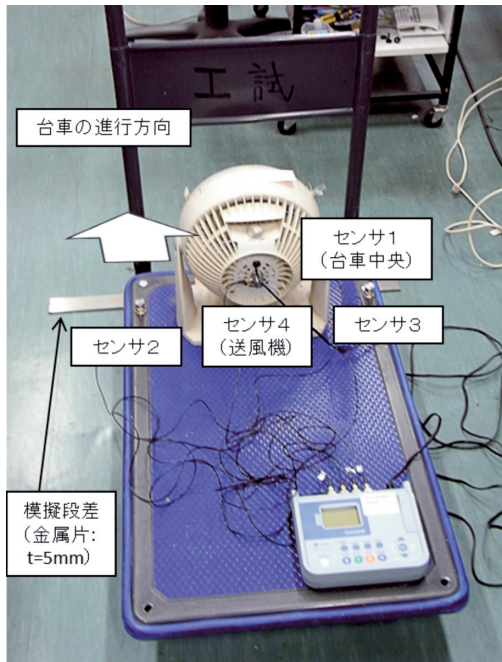


図3 独立成分分析の簡易実験装置

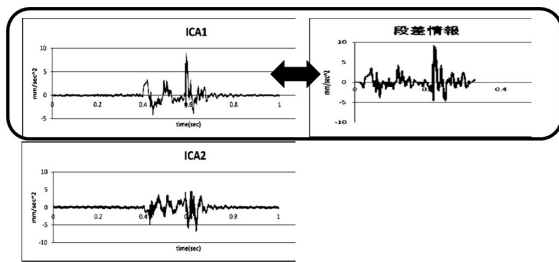


図4 独立成分分析結果の2成分波形（左側）と段差情報の波形（右側）の比較

2.3 原因分析手法の検討

定量的な乗り心地評価値を得るためには、評価者の主観に左右される官能評価データの項目数を少なくし、より多くの振動データを用いて乗り心地評価値を算出する必要がある。そこで、本研究では原因分析手法として、2種類の分析法を用いて、乗り心地に重要な官能評価項目の抽出と振動データへの置換が可能な項目の分析を行うこととした。

2.3.1 AHP法による重要度分析

官能評価7項目に対して評価項目数を絞り込むために、テストドライバーの協力を得ながら、AHP法による重要度分析を行った。

AHP法はSaatyが提唱した問題解決型意思決定法⁵⁾であり、評価項目の重要度と選択肢（代替案）を、一対比較法によるアンケート調査と相対的なウェイト（重み）計算により、決定する手法である。一対比較法は、複数の項目から2つを取り出し、どちらの項目がより重要か、程度も踏まえて調査票に印をつけて回答する方法である。10点法などの直接評価法

に比べ、項目数が多いと、設問数が増大する欠点（項目数nの場合、設問数は $n(n-1)/2$ となる）はあるが、評価の判定ブレが少なく、評価者の訓練もほぼ必要ないという利点も多いのが特徴である。今回使用した調査票を図5に示す。今回の評価項目は7項目であり、設問数は21である。評価はテストドライバー4名で行い、設問順の影響を除外するために、実際の調査票では、設問の順番はランダム順とした。AHP法の特徴として、調査票の重要度項目には左の主要項目から9, 7, 5, 3, 1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9と尺度がつけられており、この数値を使って重要度を算出する。

重要度分析の結果を図6に示す。分析にはAHPtools⁶⁾を利用した。重要度は相対値のため、4名分のデータについては、算術平均ではなく、幾何平均により分析した。分析結果は、サスペンション感（以後、サス感）Bが一番重要度が高く、以下サス感A, サス感C…となっている。ただし、ボディ剛性感のみが重要度が0.1を下回っていることから、乗り心地に対しての重要性は他の項目に比べ低いと判断し、総合評価での項目から除外することとした。

	左の項目が圧倒的によい	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	
サス感A					○													サス感B
サス感A								○										サス感C
サス感A									○									サス感D
サス感A										○								走行感A
サス感A											○							走行感B
サス感A									○									ボディ剛性感
サス感B													○					サス感C
サス感B																		サス感D

図5 乗り心地官能評価項目の重要度調査票（一部）

AHP法による乗り心地評価項目の重要度分析結果(4名幾何平均)

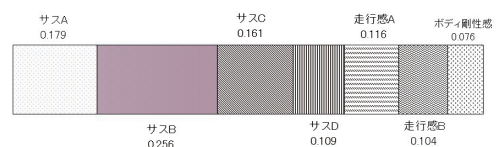


図6 乗り心地官能評価項目の重要度分析結果

2.3.2 相関分析による官能評価項目の機械的項目への置換

重要度分析で官能評価項目が7項目から6項目になったが、これらに機械的データとしての振動項目を加える場合、振動項目と相関性の高い情報があると、次項で説明する総合評価で影響が加重され、適切な結果が得られない。そこで、前項の分析結果から6項目に絞られた官能評価項目の中で、振動項目と置換可能な項目があるかどうかを見極めるために、乗

り心地評価の上位データに内在する共通性を考慮し、乗り心地の官能評価が上位にあるデータ群による相関分析を行った。使用した走行データ数は10である。振動データには、独立成分分析後の波形ピーク値を使用している。

相関分析の結果を表2に示す。分析にはMicrosoft Excel 2013を使用した。分析の結果、「前後振動－サス感A」と「上下振動－走行感B」の間に相関係数（絶対値）が0.9以上と高い相関性が見られた。また、左右振動は全般的に官能項目と相関係数（絶対値）が0.5以上と一定の相関性がみられることを考慮し、官能2項目（サス感A、走行感B）を振動3項目（上下・左右・前後）に置き換えることとした。

AHP法と相関分析により、当初の「官能7項目」から「官能4項目」へと評価項目を絞り込むことができた。

表2 官能評価項目と振動3項目の相関分析結果

機械\官能	サス感A	サス感B	サス感C	サス感D	走行感A	走行感B
上下(G)	0.43	-0.15	-0.15	-0.15	0.12	-0.91
左右(G)	0.76	0.53	0.53	0.53	0.66	-0.80
前後(G)	-0.98	-0.73	-0.73	-0.73	-0.88	0.63

2.4 両側T法による車両評価システムの開発

前項までの結果をもとに、車両の総合評価システムに使用する手法を検討した。協力企業担当者へのヒアリングから、必要な要件としては、

- ・従来の官能評価による総合評価と同等の評価精度
- ・新たな走行データによる総合評価予測が可能
- ・評価項目の総合評価に与える影響度が見える

が挙げられ、各種の予測手法を検討した結果、評価システムの構築には、両側T法を使用することとした。両側T法で使用する数式を図7に示す。

両側T法は、田口玄一氏により体系化された品質工学の手法であり、同様の手法である重回帰分析と比べて、

- ・品質工学で安定性の指標である「SN比」を利用して線形の総合評価値の推定式を導出可能
- ・推定式を使って、新たなデータによる評価値予測が可能
- ・項目数（変数）に比べて、データ数が少ない場合でも、分析が可能

という特徴がある。そこで、両側T法により総合評価値推定式の導出を行うこととした。

推定式算出のために使用した走行データ数は16で、評価項目は、官能4項目+振動3項目に加え、3.項で示した実験条件2種類（サスペンション有・無、車速3パターン）も加えている。分析にはExcel上で動作するT法分析ツール⁷⁾を利用した。分析の結果、評価システムを表す推定式は、図8に示すように、最終的には9つの項からなる線形式となった。なお、各項目の係数値Aiの具体的な数値は、秘匿情報も含まれるため、省略する。

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_l^2 \tag{1}$$

$$\beta_j = \frac{M_1 X_{1j} + M_2 X_{2j} + \dots + M_l X_{lj}}{r} \tag{2}$$

$$S_{Tj} = X_{1j}^2 + X_{2j}^2 + \dots + X_{lj}^2 \tag{3}$$

$$S_{\beta j} = r \cdot \beta_j^2 \tag{4}$$

$$V_{ej} = \frac{S_{Tj} - S_{\beta j}}{l - 1}$$

$$\eta_j = \begin{cases} \frac{1}{l} \frac{(S_{\beta j} - V_{ej})}{V_{ej}} & (S_{\beta j} > V_{ej}) \\ 0 & (S_{\beta j} \leq V_{ej}) \end{cases} \tag{5}$$

$$Y_i = \frac{\eta_1 \times \frac{X_{i1}}{\beta_1} + \eta_2 \times \frac{X_{i2}}{\beta_2} + \dots + \eta_k \times \frac{X_{ik}}{\beta_k}}{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_k} \tag{6}$$

i: 評価項目 (1~k)
 j: サンプル番号 (1~l)
 r: 有効除数
 Mi: 値数値 (真の総合評価値)
 βj: 比例定数
 S_{Tj}: 全変動
 S_{βj}: 比例項変動
 V_{ej}: 誤差分散
 ηj: SN比
 Yi: 総合評価予測値
 X^{*ij}: サンプルjの評価項目iにおける、規格化(生データ-標準データ平均値) データ

図7 両側T法で使用する数式

総合評価推定値＝

$$A_1 \times \langle \text{サス感B} \rangle + A_2 \times \langle \text{サス感C} \rangle + A_3 \times \langle \text{サス感D} \rangle + A_4 \times \langle \text{走行感A} \rangle + A_5 \times \langle \text{振動X} \rangle + A_6 \times \langle \text{振動Y} \rangle + A_7 \times \langle \text{振動Z} \rangle + A_8 \times \text{実験条件(サスペンション)} + A_9 \times \text{実験条件(車速)}$$

※Ai: 各項目の係数(SN比の関数)、⟨ ⟩は生データを規格化後の値

図8 総合評価推定式

3. 評価システムの検証

前項で得られた総合評価推定式により、実際に新たに収集した走行データ3種（乗り心地の上位、中位、下位）について、走行条件（サスペンション、車速）は同一とし、従来行われている「官能評価7項目」による総合評価値と、本研究で開発した評価システムである「官能評価4項目+振動3項目」による総合評価推定値を比較した。その結果を図9に示す。

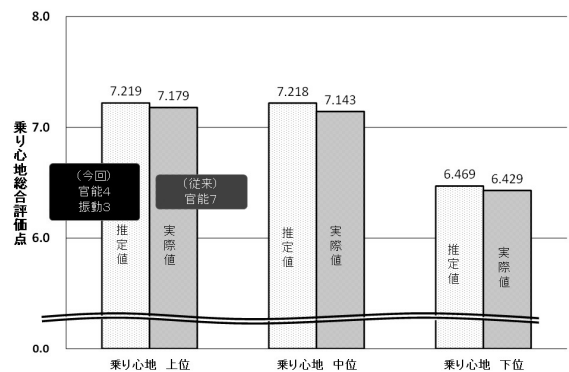


図9 乗り心地評価推定値の検証

推定値は従来の官能のみの評価方法による評価値（実際値）より若干高めに出ているものの、点数差は0.1点未満であり、導出した推定式の有効性が確認できた。このことは、従来の官能評価のみで評価していたものを、一部を客観的な測定値で代替できることを意味しており、テストドライバーの負担を軽減でき、残った官能評価項目に注力できる。なお、総合評価の推定値に与える影響が強い項目は、総合評価推定式の係数値を見ることで判断することができる。

今回開発した評価システムでの推定式により、走行データにないような実験条件や振動データ、官能評価値のパターンで乗り心地の総合評価の予測にも利用できることから、例えば、総合評価推定値を特定の値に設定した場合に振動値がどの程度の値に収まれば良いか、実験条件となる機械部品の種類を複数用意した場合などに、乗り心地予測値から最適な選定を行うなどの利用が可能である。また、評価システム構築に使用した分析は、Excel上でほぼ実行できるため、導入も比較的平易と考えられる。

開発した評価システムの現時点での課題としては、下記の点が挙げられる。

- ・官能評価項目の変更があった場合には、改めてAHPによる重要度分析が必要となる。
- ・官能評価項目を増やす必要がある場合、そのままでは対比較法での組み合わせが膨大なものになるため、現実的ではない。評価項目を何らかのグループ化した上で、組み合わせを少なくする対策が必要になる（多重でのAHP法の活用）。
- ・官能評価項目から置換できる機械的情報をすべて見つけることができれば、理論的には、官能評価情報を不要にした形での総合評価も可能である。

今後は、推定値の精度向上等とともに、上記の課題にも対応することで、システムの実用度を高める予定である。

4. まとめ

本研究により、乗り心地の官能評価データと代表的な機械情報である振動データを統合した総合評価が可能となる車両評価システムを開発した。特に振動データと相関性の高い官能評価項目をいくつかの振動データに代替できたことで、官能評価項目数を減らして、評価者の負担も減らすことができた。

この研究成果については、協力企業への技術指導に活用するほか、官能評価を実施している食品製造業や農畜産業界など他の分野での活用を目指す。

謝辞

本研究を進めるに当たり、走行データ等の収集に協力を頂いた株式会社ワークム北海道、分析方法について助言を頂いた、専修大学商学部 高萩栄一郎教授および和歌山大学システム工学部 鈴木新講師に、記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 内田他：T法による自動車乗心地の定量化，品質工学会第16回品質工学研究発表大会論文集，pp.254-257，（2008）
- 2) 小泉他：人体動特性を考慮した乗り心地評価，日本機械学会 Dynamics and Design Conference2000，（2000）
- 3) 諸橋他：路面性状測定車による乗り心地評価の精度検証，測量調査技術，日本測量調査技術協会，pp.106-112，（2002）
- 4) 村田昇：【入門】独立成分分析，東京電機大学出版局，246PP.，（2005）
- 5) 木下栄蔵：入門AHP，日科技連，160PP.，（2000）
- 6) 高萩栄一郎，中島伸之：Excelで学ぶAHP入門，オーム社，162PP.，（2005）
- 7) 鈴木真人：試して究める！品質工学MTシステム解析法入門，日刊工業新聞社，206PP.，（2012）