

車両の操縦安定性を支配する因子の統計的同定手法

Statistical Method for Identifying Factors Governing Vehicle Handling and Stability

日 下 馨¹

Kaoru KUSAKA

要 旨

車両の操縦安定性評価に用いられている13項目の定量評価指標に対して因子分析を適用し、評価指標間に存在する構造の把握を試みた。その結果、操縦安定性は、車両運動特性に関する3因子とステアフィールに関する2因子から構成される5因子モデルにより76%が決定づけられていることが累積寄与率から明らかとなった。この5因子モデルを用いることで、測定された評価指標と因子負荷量から操縦安定性の総合スコアを評価することが可能となる。また、本モデルでは各因子の重みを車両コンセプトや評価目的に応じて柔軟に設定可能であるため、重視する特性に応じた定量的な操縦安定性評価を実現できる。本手法は、評価指標間の関係を体系的に把握するものであり、操縦安定性の評価を理解するための基礎的知見として活用できる可能性がある。

ABSTRACT

This research applied factor analysis to 13 quantitative evaluation indices used to evaluate vehicle handling and stability in an attempt to identify the structure existing among those indices. According to the results, the cumulative explained variance shows that 76% of the variance in the handling and stability indices is explained by a five-factor model comprising three factors related to vehicle driving characteristics and two factors related to steering feel. Using this five-factor model makes it possible to evaluate a comprehensive score for handling and stability from the measured evaluation indices and factor loadings. Furthermore, since this model allows for flexible adjustment of the weight of each factor based on the vehicle concept and evaluation objectives, it enables a quantitative evaluation of handling and stability tailored to the characteristics to be prioritized. This method systematically identifies the relationships among evaluation indices and has the potential to serve as a foundation for understanding the evaluation of handling and stability.

1. まえがき

Hondaは、創業者である本田宗一郎の理念に基づき、技術を人の幸福に資する手段として位置づけてきた。移動体験の質に直結する操縦安定性、乗り心地、振動騒音性能といった分野でも、ドライバーの感覚や走る楽しさを重視した開発が継続的におこなわれており、お客様価値や本質を重視するという姿勢はHondaの研究開発の基礎となっている⁽¹⁾。

お客様が感じる喜びを研究し、これを商品として具現化していくために、ドライバーの主観である官能評価を客観的にとらえる新たな調査法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾や分析手法⁽⁵⁾を取り入れる施策に加え、ドライバーが感じる操縦安定性を客観的な指標に置き換える試みが進められてきた。

このような背景のもと、Hondaでは2000年代初頭より、操縦安定性や乗り心地に関する官能評価を定量指標化する

研究を推進してきた。多岐にわたる操縦安定性の官能性能を13項目の指標にまとめ、これらを運用することで車両開発の計画段階から操縦安定性を定量根拠に基づき設計できるよう開発は進化させてきた。

しかしながら、これら多数の評価指標を開発初期に適切に活用するには高度な専門的知見を必要とする。また、指標間に相関性も認められることから、共通した潜在因子のぞんざいが示唆される。そのため、評価指標間の関係を整理し、操縦安定性評価の構造を体系的に理解することが求められていた。

そこで、本研究では、この操縦安定性評価に用いられる13項目の蓄積データに因子解析を適用し、評価指標間に存在する構造を明らかにすることを試みた。さらに、抽出された因子構造について解釈をおこない、操縦安定性評価を構成する主要因子として整理できるかを検証した。

¹ 四輪研究開発センター

E-mail: kaoru_kusaka@jp.honda

Table 1 Subjective evaluation indices for handling performance (13 indices, 140 samples)

ID	Index A1	Index A2	Index A3	Index A4	Index A5	Index A6	Index A7	Index B1	Index B2	Index B3	Index B4	Index B5	Index C
Subjective Evaluation Term	Steering Feedback Quality	Steering Torque at High Speed Turn	Appropriate Vehicle Response to Steer	Response Linearity to Steering Input	Responsive-ness to Steering Input	Rear-Axle Response Fidelity to Steer	Perceived Cohesion of Vehicle Behavior	Steering Torque at Cornering Turn-In	Optimal Steering Effort at Turn-In	Appropriateness of Yaw Response	Linearity in Steering Response	Front-Axle Response Fidelity to Steer	Appropriateness of Understeer
Sample No.													
1	-0.75	0.47	0.51	-0.10	0.73	0.44	-1.11	-0.23	1.23	-0.23	0.46	-0.76	-0.84
2	-0.31	-0.13	1.63	-0.87	2.40	-0.09	-0.80	0.98	0.10	1.14	0.05	-0.72	-1.38
3	-0.19	0.10	0.33	2.23	1.22	0.95	2.33	0.25	0.26	-0.10	-0.99	1.15	0.07
4	-1.86	0.23	0.63	0.10	0.85	-0.03	-0.05	-0.83	-0.19	0.39	-0.27	-0.62	-0.93
5	-1.35	4.48	-0.34	-1.30	0.23	-1.35	-0.41	-0.30	-0.17	-0.30	0.70	-0.74	-0.31
6	-2.00	0.36	1.43	1.24	0.33	2.07	-0.68	-1.57	-2.97	1.40	-1.07	3.88	-0.03
7	-0.48	-0.06	1.60	0.13	2.73	0.99	-1.13	1.68	1.21	0.47	0.21	-0.76	-0.75
8	-0.67	0.86	-1.22	-0.93	-0.86	-0.66	-0.52	0.64	-0.18	-0.94	0.38	-0.33	0.46
136		-1.01						0.63	-0.23	-0.86	0.85	0.33	1.09
137	-4.45		3.89	2.86	-0.41	2.16	-0.23	-0.81	-0.08	2.80	0.86	1.75	-1.60
138	0.26	-0.17	0.75	-0.17	0.31	-0.15	0.45	-0.18	0.54	0.18	0.81	-0.22	-1.19
139	0.34	0.42	0.98	-0.24	0.43	-0.36	-0.34	1.30	0.23	0.45	-0.34	-0.02	-0.61
140	0.68	-0.64	2.40	-0.16	-0.78	-1.14	1.13	0.51	1.76	2.47	1.11	-0.93	-1.47
Ave	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
StdDev	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

2. 手法

2.1. 官能評価の定量化指標

本研究で解析対象とする操縦安定性の主観評価指標を Table 1 に示す。

各評価指標は、テスト条件の異なる、A 系列 7 項目、B 系列 5 項目、および C 系列 1 項目の 13 項目から構成されている。それらの官能表現は、ステアリングの手ごたえの良さ、ステアリング切り初めの重さ感、などのステアフィールに関するものや、車両の応答量の適正さ、ドライバ操作に対する挙動の一体感、などの車両応答に関するものとなっている。

各指標は計測物理量で運用されているが、相関分析および因子解析における寄与度の比較を容易にするため、平均および分散を用いて正規化した値を用いた。

2.2. データの正規分布性

因子解析は、評価指標間の相関に基づくため、各指標の分布が極端に偏る場合は現象を上手く再現できなくなる。

そこで、本解析に先立ち、各評価指標の分布特性の正規性や、二極化や極端な外れ値が含まれないかを確認した。

Fig. 1 に 13 項目の評価指標のデータの正規分布を示す。

各指標の分布はいずれもおおむね正規分布形状を示しており、極端な外れ値などは認められなかった。したがって、特別な処理を施すことなくとも、後におこなう相関分析および因子解析において分布特性に起因するバイアスは生じないと判断した。

2.3. 指標間の相関分析

因子解析における潜在因子抽出では指標間の相関関係を利用するため、Fig. 2 で 13 指標間の相関を確認した。

指標間に相関がある場合はプロットが線状に分布するが、複数の指標間で相関の存在が確認された。

Table 2 にその相関を定量化した共分散マトリクスを示

す。正規化したデータを用いる場合、共分散は指標間の相関と等しくなるので、正の相関を青、負の相関を赤となるようグラデーション表示している。

今、具体例として Index A3 と Index B3 に着目すると、

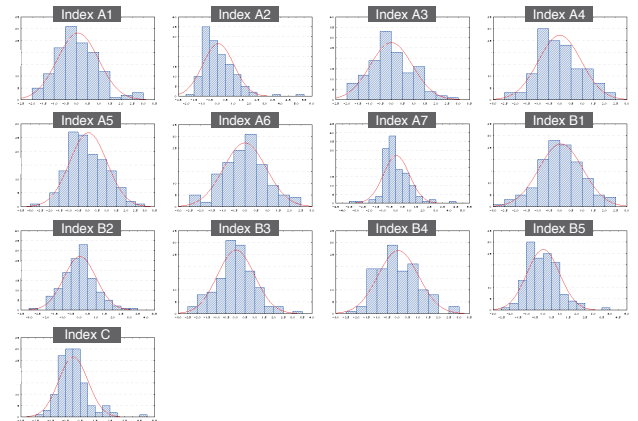


Fig. 1 Statistical distributions of handling indices

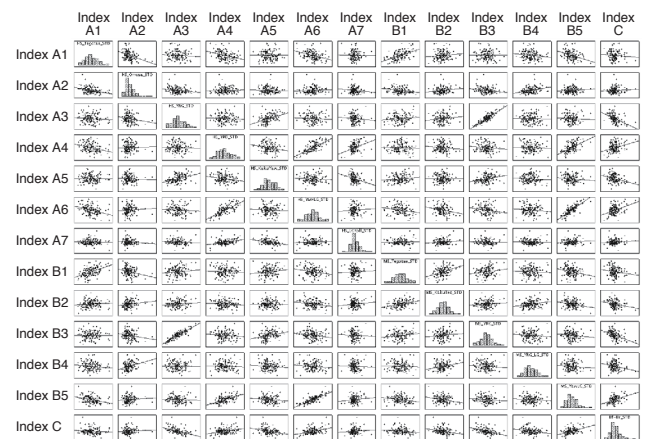


Fig. 2 Overview of correlations among handling indices

Table 2 Covariance matrix of handling indices

	Index A1	Index A2	Index A3	Index A4	Index A5	Index A6	Index A7	Index B1	Index B2	Index B3	Index B4	Index B5	Index C
Index A1	0.88	-0.34	-0.07	-0.30	0.00	-0.34	-0.02	0.47	0.09	0.00	-0.13	-0.32	-0.08
Index A2	-0.34	0.98	-0.18	0.04	-0.05	0.08	-0.12	-0.24	0.16	-0.19	0.33	0.09	0.07
Index A3	-0.07	-0.18	0.91	-0.04	0.39	-0.06	-0.08	0.12	0.12	0.84	-0.02	-0.06	-0.48
Index A4	-0.30	0.04	-0.04	0.95	-0.22	0.70	0.36	-0.05	-0.09	-0.10	-0.05	0.55	0.30
Index A5	0.00	-0.05	0.39	-0.22	1.01	-0.06	-0.34	0.14	0.00	0.26	-0.09	-0.11	-0.31
Index A6	-0.34	0.08	-0.06	0.70	-0.06	0.96	0.07	-0.21	-0.21	-0.19	-0.10	0.77	0.38
Index A7	-0.02	-0.12	-0.08	0.36	-0.34	0.07	1.01	0.05	0.12	-0.05	-0.04	0.12	0.09
Index B1	0.47	-0.24	0.12	-0.05	0.14	-0.21	0.05	1.01	0.35	0.18	-0.05	-0.23	-0.16
Index B2	0.09	0.16	0.12	-0.09	0.00	-0.21	0.12	0.35	0.98	0.12	0.24	-0.23	-0.25
Index B3	0.00	-0.19	0.84	-0.10	0.26	-0.19	-0.05	0.18	0.12	0.98	-0.09	-0.11	-0.42
Index B4	-0.13	0.33	-0.02	-0.05	-0.09	-0.10	-0.04	-0.05	0.24	-0.09	1.00	-0.09	-0.24
Index B5	-0.32	0.09	-0.06	0.55	-0.11	0.77	0.12	-0.23	-0.23	-0.11	-0.09	0.98	0.43
Index C	-0.08	0.07	-0.48	0.30	-0.31	0.38	0.09	-0.16	-0.25	-0.42	-0.24	0.43	1.00

Fig. 2 の相関プロットでは右肩上がりの線状にデータが分布している。また、Table 2 の相関係数も 0.84 と高い正の相関を示していることが分かる。

Index A3 と Index B3 は、操舵に対する車両の応答量の適正さ、および、ヨー応答の適正さの指標であり、速度や走行モードなど評価条件の違いがあるにもかかわらず、これら両指標が共通する因子により説明可能であることを示唆している。

一方、Index C アンダーステアの適正さ、に着目すると、この指標は方向安定性に関する指標であるため、前述の車両応答性の指標である Index A3 および Index B3 との間にはそれぞれ -0.48、-0.42 の負の相関があることが読み取れる。この結果から、車両の応答性と安定性の指標間にはトレードオフ関係が存在し、安定性をつかさどる因子の別々の側面をそれぞれの指標が表現している可能性が読み取れる。

このように、Fig. 2 および Table 2 からは、複数の指標間に正または負の比較的強い相関が認められ、これら評価指標群の背後に共通した潜在的な因子が存在する可能性が確認できた。

因子解析は、各指標間に相関構造が存在することを前提とする統計解析手法であるため、無相関のデータでは適用できない。そこで次に、この相関性の存在について厳密な検定を実施した。

2.4. Bartlett の球面性検定

評価指標間の相関の統計的有意性を確認する方法としては、Bartlett の球面性検定が標準的な検定手法となる⁽⁶⁾。

本検定は、すべての評価指標が無相関で分散が等しく相関行列 $\mathbf{R}$ が単位行列 $\mathbf{I}$ になる、つまり、検定統計量 χ^2 が零になる、という帰無仮説を検定する。この帰無仮説が棄却される場合、評価指標間には有意な相関が存在し、因子解析を適用する妥当性が統計的に支持される。

Table 1 に示した 140 台の車両データの内、欠損値を含むサンプルを除外した 129 台を対象とし、13 項目の評価

Table 3 Bartlett's test of sphericity

Test statistic*	$\chi^2 = -\left(n - 1 - \frac{2m+5}{6}\right) \ln \mathbf{R} = 780.03$
Degrees of freedom	df = m(m-1)/2 = 78
p value	p = 0.000 < 0.001

指標のデータで検定をおこなった。結果を Table 3 に示す。

表中の n はサンプル数 (=129)、 m は評価指標数 (=13)、 $\mathbf{R}$ は評価指標間の相関を要素とする行列である。

統計検定量 χ^2 は 780.03 と非常に大きな値となり、自由度 78 に対するすべての指標が無相関であるという帰無仮説が成立する確率 p 値は 0.001 以下となった。よって帰無仮説は棄却され、指標間に統計的に有意な相関が存在することが証明された。

2.5. クラスター分析

次に、指標どうしの意味的まとまりの概略を定性的に把握するために、13 指標に対しクラスター分析を実施した。結果を Fig. 3 のデンドログラムに示す。なお、クラスター分析は、指標間の類似度に基づいて性質の近い指標を段階的にグループ化する手法で、デンドログラムは、クラスター分析した指標間の類似性を樹形図で表現した図である。

Fig. 3 の縦軸は 13 個の評価指標を、横軸は指標間の類似性を表すユークリッド距離を表している。このユークリッド距離は、各評価指標を多次元空間上の点として表現した際の直線距離であり、値が小さいほど指標間の挙動が類似していることを意味する。

この図より、評価指標は大きく二つのクラスターに分類されることが分かる。以下に主要クラスターの意味的解釈をおこなう。

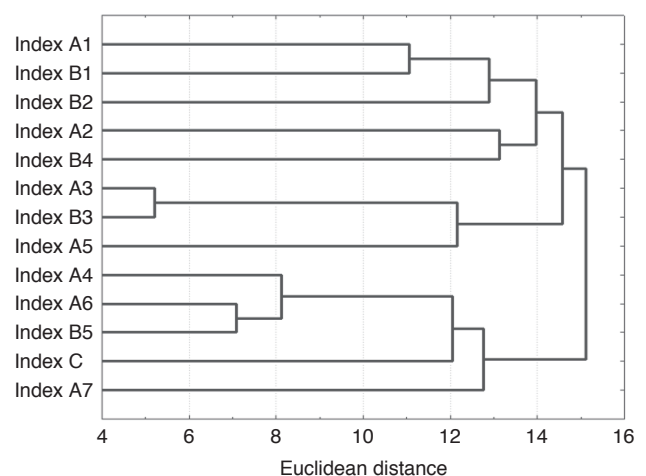


Fig. 3 Dendrogram calculated by nearest neighbor method

上側のクラスターでは、Index A3 操舵に対する車両の応答量の適正さ、および Index B3 ヨー応答の適正さ、が最も近接した距離で結ばれており、これにやや距離を置いて、Index A5 操舵に対する応答の早さ、が含まれる。これらは操舵入力に対する車両挙動の指標であり、本クラスターは＜車両挙動に関する評価項目群＞と位置付けられる。

これに対し、Index A1 ステアリングの手ごたえの良さ、Index B1 ターンイン時のステアリングの重さ、Index B2 ターンイン時の操舵力の適正さ、もまた近接して集約されているが、これらはドライバーが感じる＜操舵時のフィーリング＞に関するクラスターを形成している、などと解釈を与えていくことができる。

一方、下側のクラスターでは、Index A4 操舵に対するリニアリティの良さ、Index A6 操舵に対する車体のリア応答の追従性、Index B5 操舵に対する車体フロントの応答性、が近接しており、操縦安定性に関する指標群ではあるものの、Index A3, B3, A5 が示す直接的な車両応答に関する評価に比べ、＜ドライバー意図との一致性＞を重視した主観的評価群と解釈できる。

以上の解釈例より、一見すると同じ操縦安定性の一側面を評価しているように見える指標であっても、背後に存在する評価の視点や潜在的な意味合いには差異が存在することが示唆されている。この結果は、操縦安定性の官能評価が多面的構造を持つことを定性的に示しており、因子解析によりこれら構造を因子モデルとして整理すれば、定量的なモデルとして構築できる可能性を示している。

3. 因子モデル

3.1. 因子解析

以上の定性的分析を踏まえ、操縦安定性を定量的に表現する因子モデルの構築を試みる。

具体的には、式(1)に示すように、評価指標 x_j の平均値からの偏差 $x_j - \mu_j$ を、共通因子 f_k と因子負荷量 λ_{jk} の線形結合と独自因子 ε_j の和で表すモデル化をおこなう。

$$\begin{aligned} x_j - \bar{x}_j &= \lambda_{j1}f_1 + \lambda_{j2}f_2 + \cdots + \lambda_{jm}f_m + \varepsilon_j \quad (j=1,2,\dots,k) \\ \therefore \mathbf{x} - \boldsymbol{\mu} &= \mathbf{A}\mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (1)$$

where

$\bar{x}_j = E[x_j]$, $E[\mathbf{f}] = 0$, $\text{Var}[\mathbf{f}] = \Phi$, $E[\boldsymbol{\varepsilon}] = 0$, $\text{Var}[\boldsymbol{\varepsilon}] = \Psi$,
m: 共通因子数, j: 評価指標番号, k: 評価指標数

ここで因子負荷量は、各評価指標が共通因子から受ける影響の大きさを表しており、抽出した潜在因子の意味を解釈する上で重要である。すなわち、因子負荷量の値が類似する評価指標は、その背後に共通した潜在因子が存在していると解釈するのである。

観測変数の分散共分散行列 Σ は、上記で求めた因子負荷

行列 Λ 、共通因子の分散行列 Φ 、および独自因子の分散 Ψ を用いて式(2)のように表すことができる。

$$\Sigma = \text{Var}[\mathbf{x}] = E[(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T] = \Lambda\Phi\Lambda^T + \Psi \quad (2)$$

この関係は、観測された分散 $\text{Var}[\mathbf{x}]$ が、共通因子によって説明される成分 $\Lambda\Phi\Lambda^T$ と、個別要因による成分 Ψ とに分解できることを意味している。共通因子によって説明できる割合は累積寄与率と言い、一般に 70% 以上であれば実務上十分な説明力を有するとされている。

なお、因子解析では、因子負荷量に基づく因子の解釈を容易にするため、Fig. 4 に概念図で示すように因子軸を回転させる数学的な操作を施したのちに解釈をおこなう。

本研究では、因子間の独立性を仮定し、直交回転法の一つであるバリマックス回転を適用した。また、因子軸の回転後、対象とする現象をより適切に説明しうる因子数を探索的に選定し、各因子の意味付けをおこなう因子解析を実施した。

3.2. 因子数選定

官能評価における因子解析においては、統計的に抽出された因子が人間の主観的評価として無理なく解釈できることが重要である。そこで次に、操縦安定性の官能評価構造を適切に表現できる因子数を決定するため、因子数を変化させた探索的検討をおこなった。

Table 1 に示す 13 指標について、欠損値を含むサンプルを除外した 129 台分のデータを用い、因子数を 2 から 9 まで変化させて因子解析を実施した。因子の抽出条件として最小固有値を 0.2 とし、各ケースについてバリマックス回転を適用した。統計解析には TIBCO Software 社製 STATISTICA を使用した。

因子数が 2 または 3 の場合には、いずれの因子にも高い因子負荷量を示さない評価指標が複数確認され、操縦安定性の十分な評価構造が得られなかった。

一方、因子数 6 以上では、ただ一つの評価指標のみが高い負荷量を示す単一指標因子が現れ、評価指標が過分割される傾向が認められた。このような因子構造は解釈が容易でないばかりか、サンプル依存度が高く、評価構造の汎用性が低下すると考えられる。

以上の結果を踏まえ、複数の評価指標が高い因子負荷量を示し、かつ因子解釈が比較的明瞭であった因子数 4 お

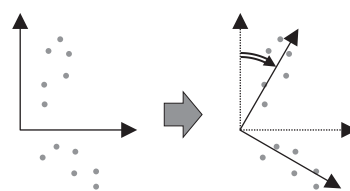


Fig. 4 Schematic image of factor axis rotation

Table 4 Comparison of factor models of handling indices

2 Factor	3 Factor	4 Factor	5 Factor	6 Factor	7 Factor	8 Factor	9 Factor

	Four factor model				Five factor model					Six factor model					
Handling Index	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Index A1	-0.50	0.12	-0.59	0.26	-0.41	-0.16	0.37	0.64	-0.01	-0.37	-0.14	-0.19	-0.76	-0.01	0.08
Index A2	0.04	0.18	0.77	-0.05	0.11	-0.22	-0.73	-0.24	-0.19	0.05	-0.24	0.65	0.49	-0.19	-0.20
Index A3	0.03	-0.96	-0.03	0.00	0.02	0.96	0.02	0.03	-0.10	0.02	0.96	0.01	-0.01	-0.10	-0.01
Index A4	0.85	0.04	0.01	0.25	0.83	0.00	-0.03	0.01	0.34	0.84	0.00	0.03	0.01	0.33	-0.02
Index A5	-0.19	-0.54	-0.04	-0.39	-0.01	0.41	0.04	0.14	-0.70	-0.01	0.41	0.04	-0.12	-0.70	0.08
Index A6	0.88	0.07	0.03	-0.12	0.93	-0.09	0.03	-0.11	-0.04	0.93	-0.09	-0.07	0.12	-0.05	0.04
Index A7	0.34	0.12	-0.13	0.64	0.16	0.03	0.04	0.09	0.85	0.15	0.03	0.07	-0.07	0.86	0.06
Index B1	-0.26	-0.18	-0.41	0.54	-0.07	0.11	0.05	0.90	-0.02	-0.05	0.12	0.25	-0.87	-0.03	0.03
Index B2	-0.25	-0.18	0.29	0.67	-0.13	0.15	-0.58	0.56	0.16	-0.16	0.15	0.79	-0.31	0.16	-0.16
Index B3	-0.04	-0.89	-0.12	0.06	-0.08	0.91	0.10	0.05	0.00	-0.10	0.91	0.02	-0.03	0.01	0.11
Index B4	-0.17	0.01	0.70	0.26	-0.14	-0.01	-0.75	-0.06	0.07	-0.04	-0.06	0.16	0.08	0.00	-0.94
Index B5	0.85	0.07	0.02	-0.13	0.86	-0.08	0.06	-0.17	0.00	0.86	-0.08	-0.07	0.17	0.00	0.09
Index C	0.44	0.61	-0.19	-0.15	0.44	-0.61	0.25	-0.08	0.05	0.39	-0.60	-0.01	0.10	0.08	0.44
Variance contribution	0.23	0.19	0.14	0.12	0.21	0.18	0.13	0.13	0.11	0.20	0.19	0.09	0.13	0.11	0.09
Cumulative contribution	0.23	0.42	0.56	0.68	0.21	0.40	0.52	0.65	0.76	0.20	0.39	0.48	0.61	0.72	0.81

よび5のケースを中心に各因子の解釈をおこなった。さらに、参考として、単一指標因子が出現する6因子モデルについても考察を加えた。

3.3. 4因子モデル

Table 4に、因子数を4, 5および6とした場合の13評価指標の因子負荷量, 各因子の寄与率, および累積寄与率を比較して示す。

一番左の4因子モデルに着目すると、因子1は、Index A1, A4, A6, B5に対して高い因子負荷量を示しており、ステアリングの手ごたえの良さ、操舵リニアリティ、リア応答の追従性、およびフロントの応答性に関連する因子であることが示唆される。したがって、4因子モデルの因子1は＜操舵感と車両応答性＞因子と解釈される。

因子2は、Index A3, B3, A5, Cに高い因子負荷量を示し、操舵に対する車両応答量、ヨー応答、応答の早さ、およびアンダーステアの適正さに関連している。一般に、アンダーステアであるほど共振周波数より低い操舵応答の位相遅れは理論的に少なく、応答は速くなることから、因子2は＜アンダーステア度合い＞因子と解釈できる。

因子3は、Index A1, A2, B4に強く寄与しており、ステアリングの手ごたえ、切り初めの重さ感、およびリニアリティの良さに関連することから、＜操舵フィール＞因子と解釈可能である。

因子4は、Index A7, B1, B2に対する因子負荷量が高く、挙動の一体感、ターンイン時のステアリング重さ、および操舵力の適正さに関連するため、＜ばね上挙動と操舵

フィール＞因子と考察される。

この4因子モデルの累積寄与率は68%であり、4因子により評価指標全体の約7割弱を説明できることが分かる。

3.4. 5因子モデル

Table 4の中央に示す表の5因子モデルでは、4因子モデルに対し、各因子への評価指標の割付けがより純化された結果が得られた。

5因子モデルの因子1は、4因子モデルからIndex A1が分離し、操舵リニアリティ、リア応答の追従性、およびフロントの応答性という、より純粋に車両応答に直接関連する指標のみで構成される因子となり、＜車両応答＞因子と解釈が可能である。

因子2は、同じく、4因子モデルからIndex A5 応答の早さが分離し、車両応答量の適正さ、ヨー応答の適正さ、アンダーステアの適正さで構成され、＜準定常状態のアンダーステア度合い＞因子として解釈が明確になっている。

因子3は、Index A2, B2, B4が高い因子負荷量を示し、切り初めの重さ感、操舵力の適正さ、およびリニアリティの良さに関連し、＜操舵フィール＞因子と解釈が可能である。

因子4は、Index A1, B1, B2が高い負荷量を示し、ステアリングの手ごたえの良さ、ターンイン時のステアリングの重さ、および操舵力の適正さに関連するため、＜操舵の重さと保舵力＞因子との説明が合理的である。

因子5は、Index A5, A7が高い負荷量を示し、応答の早さ、および挙動の一体感、であり、＜挙動一体感＞因子と解釈できる。

Table 5 Five factors and their interpretations

Factor	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
Subjective evaluation term	"Response Linearity to Steering Input"	"Appropriate Vehicle Response to Steer"	"Steering Torque at High Speed Turn"	"Steering Torque at Cornering Turn-In"	"Responsiveness to Steering Input"
	"Rear-Axle Response Fidelity to Steer"	"Appropriateness of Yaw Response"	"Optimal Steering Effort at Turn-In"	"Steering Feedback Quality"	"Perceived Cohesion of Vehicle Behavior"
	"Front-Axle Response Fidelity to Steer"	"Appropriateness of Understeer"	"Linearity in Steering Response"	"Optimal Steering Effort at Turn-In"	
Factor interpretation	<Vehicle Dynamics>	<Understeer>	<Steering Feel>	<Steering Effort and Torque>	<Integrated Vehicle Behavior>
Contribution	21%	18%	13%	13%	11%

この5因子モデルでは、各因子の概念的ー貫性がさらに向上するとともに、累積寄与率も76%となり、因子モデルとして十分な説得力を持つとされる70%を超える水準となっている。

3.5. 6因子モデル

因子数探索の一環として試行した6因子モデルでは、因子1, 2, および5は5因子モデルと同一構造を持ち、本質的因子として一貫した解釈が可能である。一方、因子3と因子4については、5因子モデルでまとまっていた因子構造が過度に分割される結果となり、Index B4 リニアリティの良さが因子6として独立し単一指標因子が出現した。

さらに、因子4についても、5因子モデルの<操舵の重さ・保舵力>から Index B2, 操舵力の適正さ、が分離し、概念的に近接する評価指標が過分割される傾向が現れた。

因子解析は似た変動を示す相関性を手がかりに、それらを少数の共通した潜在因子で説明する手法である。このため、一つの評価指標だけで成る因子、単一指標因子が現れる状態は、本来まとめられるはずの構造が分断されていることを意味するので望ましくなく、サンプル依存性も高くなる。すなわち、単一指標因子は背後にある本質的な潜在因子でない可能性が高い。

この6因子モデルは累積寄与率81%と5因子モデルから5%の向上がみられるものの、評価指標の過分割および単一指標因子の出現から、操縦安定性の因子構造を表現する因子モデルとして適切ではないと判断される。

3.6. 因子モデルの構造解釈

Fig. 5 に、因子数を2から9まで変化させた場合における各因子の寄与率をまとめて示す。

3.1 節から 3.5 節までの結果、および Fig. 5 で単一指標因子が現れない因子構造で最も寄与が高くなることを踏まえ、本研究では、累積寄与率が76%で各因子の意味解釈が明確であった5因子モデルを、操縦安定性の評価構造として最も妥当であると結論付けた。

Table 5 に、採択した5因子モデルと13評価指標の因子構造を整理して示す。因子解釈を総括すると、因子1<車

両の応答性>寄与率21%、および、因子2<準定常状態のアンダーステア度合い>寄与率18%、は、操縦安定性の約4割を説明する主要因子と言える。

一方、因子3<操舵フィール>、因子4<操舵の重さと保舵力>は、いずれも寄与率13%であり、主要因子に次ぐ重要な因子として、広義のステアフィールを構成する因子群を構成している。

因子5<挙動一体感>は、寄与率は11%と比較的小さいものの、因子1および因子2と合わせて、車両挙動評価の一側面を補完的に表現する因子と位置付けられる。

Fig. 6 には、これら5因子と実務で用いられる13評価指標との対応関係を視覚的に模式化して示す。本図に示す因子構造は、前章で示したクラスター分析結果とも多くの点で整合しており、操縦安定性に関する評価指標に潜在する本質的な評価構造を、体系的に整理できていることが確認できた。

本因子構造の整理により、13項目の評価指標群を5つの視点で類型化できることが示された。これにより、評価者が多数の評価指標間の関係を共通する潜在因子の観点から理解できるため、車両コンセプトごとに重視すべき評価領域の整理に活用できる。

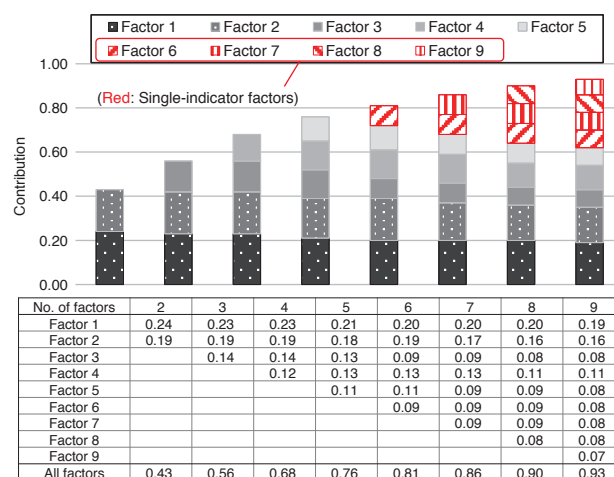


Fig. 5 Number of factors vs cumulative contribution

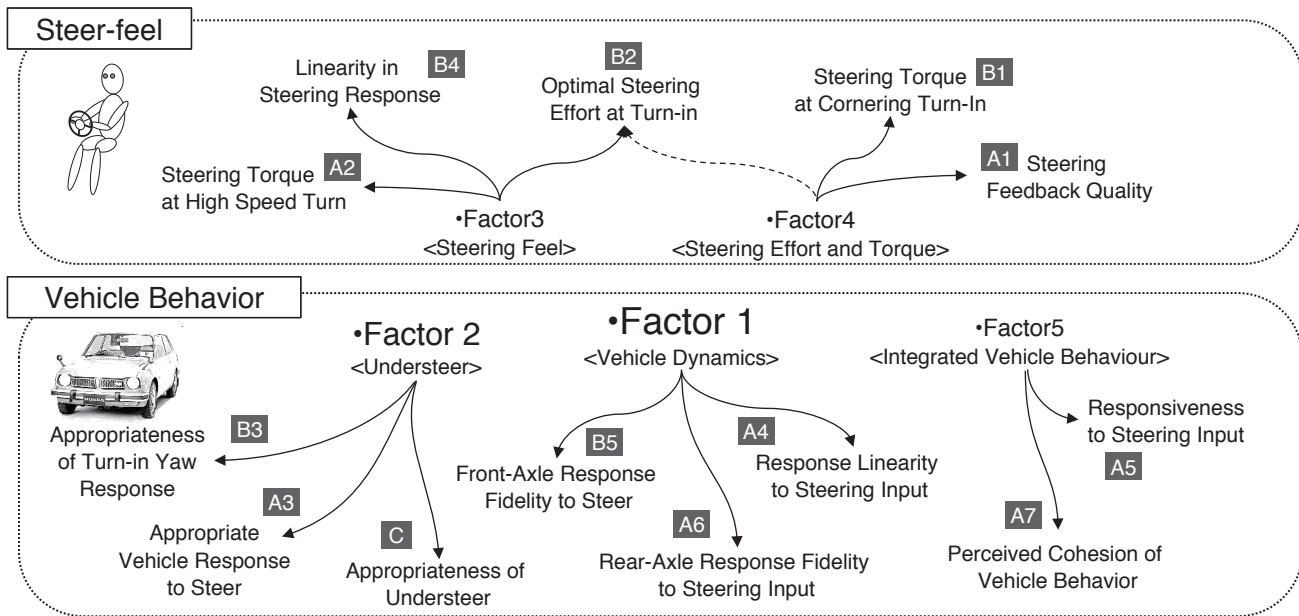


Fig. 6 Five factors and related subjective evaluation terms

4. まとめ

本研究では、操縦安定性の評価に用いられている 13 項目の評価指標に対し、因子解析を適用し、以下の知見を得た。

- (1) 操縦安定性評価に用いられる 13 項目の評価指標に因子分析を適用した結果、5 因子モデルにより 13 評価指標の分散の 76% を説明できることが確認された。
- (2) 本モデルを用いることで、因子スコアと評価指標との関係を式 (1) により表現することができる。これにより、各評価指標がどの因子の影響を強く受けるかを把握し、操縦安定性の評価構造を理解するための指標として活用できる。
- (3) 各因子の寄与率を車両コンセプトや評価目的に応じて参照することで、操縦安定性において重視すべき特性を整理することができる。

参考文献

- (1) 本田宗一郎: 本田宗一郎語録, 小学館, 288 p., (1998)
- (2) Matsuda, A., Yoshimura, S., Yagawa, G., Hirata, T.: Subjective Evaluations for Handling and Stability of Vehicle Using Hierarchical Neural Networks, Computational Mechanics '95, p. 76-81, (1995), doi: 10.1007/978-3-642-79654-8_13
- (3) 日高彰紀, 椎葉太一: 要因分析に基づく車両パラメータと運動特性の関係性評価, 交通・物流部門大会講演論文集, 2021.30 巻, PS1-14, (2021), doi: 10.1299/jsmetld.2021.30.PS1-14
- (4) 日下馨, 神田稔也, 中島健彰, 粥見哲也, 益田綾子:

自由記述キーワード抽出法による日本と米国の自動車ユーザ主観価値の分析, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 132-139, (2020), doi: 10.69239/hondatechnicalreview.2020_32_2_16

- (5) Kusaka, K., Yuhara, T.: Modal Analysis Approach for Analysis and Design of Vehicle Transient Behavior, SAE Technical Paper 2025-01-8794, (2025), doi: 10.4271/2025-01-8794
- (6) 柳井晴夫, 繁桝算男, 前川真一, 市川雅教: 因子分析—その理論と方法—, 朝倉書店, 280 p., (1990)

■著 者■



日下馨