

船舶の乗り心地評価に関する研究 (第2報)

——心理測定モデルの構築——

正員 細田 龍介* 正員 有馬 正和**

Evaluation of Ride-Quality and Incidence of Seasickness (2nd Report)

——Mathematical Modelling for the Analyses of Psychological Measurements——

by Ryusuke Hosoda, *Member* Masakazu Arima, *Member*

Summary

Measurements of motion stimuli, physiological and psychological effects on motion-sickness and ride-quality have been carried out by using ship-motion simulator. It is essential to take into account of the physiological and psychological effects for the analyses of motion-sickness and ride-quality. The meaning of human expressions are always emotional and sensual, so that it is very difficult to obtain quantitative measure of these effects.

In the present paper, the authors propose a method for the analyses of results of psychological measurements. A mathematical model using the hierarchical fuzzy integral is developed and is applied to the analysis of results obtained by the Semantic Differential Method (SD-method), one of the psychological measurement methods. Since the physiological and psychological effects are neither independent nor additive, the fuzzy measures that correspond to the degree of contributions of each physiological and psychological effect give good quantitative measures for the evaluation of motion-sickness and ride-quality. The mathematical model developed in the present study may be applicable to the analyses of results obtained by other psychological measurements.

1. 緒 言

著者等の所属する研究室においては、「船体動揺模擬装置」(乗り心地シミュレータ)を用いて搭乗被験者に低周波動揺刺激を加え、脳波、心電図、筋電図、発汗等の生理現象、顔面温度、表情等の計測を実施中である。この実験の目的は、乗り物酔い、乗り心地のメカニズムを解明することにあるが、乗り物酔い発症の原因は動揺刺激だけではなく、視覚、聴覚を初めとする五感の全てに関連のある外的刺激に関連することは言うに及ばず、実験時の被験者の体調、乗り物酔いに関する過去の経験、予感と言った生理的、心理的な内的要因の関与が極めて重要な意味を持つことが医

学的、生理学的、心理学的見地からも指摘されている。

そこで、著者等は第1報において、乗り物酔いを発症した被験者が外部に対して最初に表現すると考えられる表情の変化を捉えるための表情評価モデルの構築を行った。その結果、ファジィ測度、ファジィ積分の考え方を評価モデルに適用できることを示した¹⁾。

動揺実験においては、生理計測の外に実験開始前、終了後に心理計測の1つであるSD法のアンケート調査を実施している。これは、実験前後の心理状態、生理状態の被験者の内的要因の変化を把握するためであり、前報の表情評価と極めて密接な関係にあると考えることによる。しかし、SD法による調査結果からは乗り物酔い、乗り心地に対して如何なる要因がどの程度寄与するかは、各要因の寄与に対する独立性や加法性が満足されていないため、正しく把握することは難しい。乗り物酔い、乗り心地の解析に正確を期するためには、このような内的要因の寄与の度合いを量的に把握する必要がある。

本論文では、アンケートの設問内容から乗り物酔いに対

* 大阪府立大学工学部

** 大阪府立大学大学院工学研究科

原稿受理 平成5年1月11日

春季講演会において講演 平成5年5月19, 20日

する主たる要因を選び出し、その寄与の度合いを独立性や加法性を仮定しないで解析するためのモデルの構築を目的としている。解析に用いられる手法としてはアンケート調査の内容に合わせて階層化ファジィ積分³⁾の手法を用いた。

2. 乗り心地評価のための動揺実験

2.1 船体動揺模擬装置の概要

装置の概要については、文献³⁾に述べられているので本報では省略するが、Fig. 1 に示されるように L×B×H=3.0×1.8×2.0(m)のキャビンを上揺、縦揺、横揺させることができる。駆動には油圧を用いている。計測項目は動揺及び生理計測として被験者の脳波、心電図、発汗であり、同時に被験者の頭部加速度を計測している。また、被験者の顔面温度を赤外線放射計を用いて計測している。顔面温度情報と顔面表情は Video 装置を用いて録画される。

2.2 実験の概要

動揺実験において用いられた動揺刺激は、横揺（振幅 10°）、周波数 0.2, 0.1, 0.3(Hz)である。実験は被験者一人に対してこの順に合計 3 回行われた。1 回の実験の動揺暴露時間は 20 分間で、この外に前後の生理計測、アンケート調査にそれぞれ 10 分程度が費やされた。被験者は著者等の所属する大学に在籍する大学生、大学院生の男女 30 名である。慣れの影響を除く目的で、同一被験者に対する実験は 3 日以上の間隔をおくことを原則とし、可能な限り同じ曜日の同じ時間帯に実験を実施するよう努めた。

心理計測として、動揺刺激を加えることによる被験者の乗り心地に関する心理的反応の変化をアンケート調査によって調べた。実験の手順は以下の通りである。

- ① 1 回目の実験時のみ、実験前に性別、年齢、乗り物酔いに関する過去の体験等に関するアンケート調査を

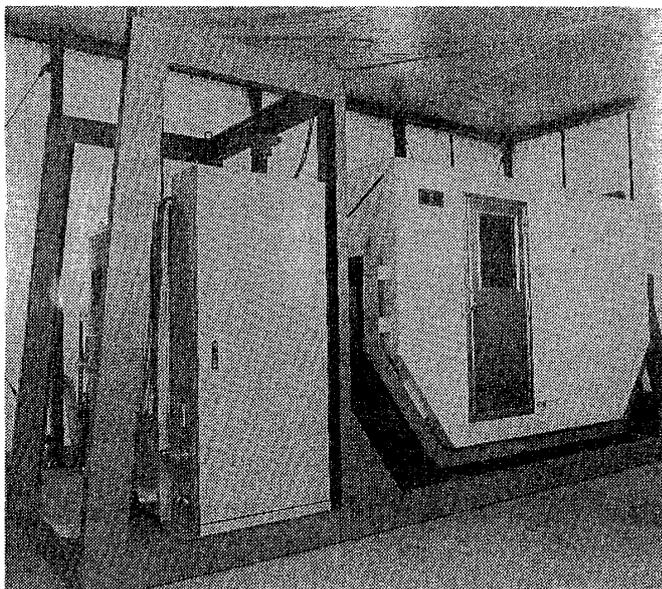


Fig. 1 Ship motion simulator.

行う。

- ② シミュレータ内で、脳波計、心電計、発汗計の電極を取り付け、加速度計のセットされたヘッドギアを被験者の頭部に取り付ける。
- ③ 血圧、心拍数、体温を計測する。
- ④ 乗り心地に関するアンケート調査を実施する。(Fig. 2 参照)
- ⑤ 閉眼、開眼安静時の生理計測を実施する。
- ⑥ 動揺を開始する。持続時間は 20 分間とし、途中被験者が嘔吐した場合にのみ中止する。この間 30 秒毎に約 20 秒間の生理計測を行い、更に、5 分毎に被験者の気分、覚醒状態等について通話装置を通して質問する。
- ⑦ 動揺終了後、直ちに血圧、心拍数、体温を計測する。
- ⑧ 再び、乗り心地に関するアンケート調査を実施する。
- ⑨ 開眼、閉眼安静時の生理計測を実施する。
- ⑩ 電極等を取り外し、実験を終了する。

動揺実験の手順④、⑧で実施されたアンケート調査紙を Fig. 2 に示す。但し、手順④では動揺に関する設問 B) は削除されている。

乗り心地に関するアンケート調査

以下の各設問についてお尋ねします。該当するところに○をつけて下さい。

設問 A) 室内環境 (臭い、座り心地、騒音 etc.) について。

非常	か	や	普	や	か	非
常	な	り	通	り	な	常
に						に
良い						悪い

設問 B) 動揺環境について。

快	_____	不快
---	-------	----

設問 C) 現在の体調について。

良い	_____	悪い
----	-------	----

設問 D) あなたは、乗り物に酔いやすいと思いますか？

思う	_____	思わない
----	-------	------

設問 E) 「乗り心地シミュレータ」に乗って、どう感じますか？ 次の 30 項目について、○をつけて下さい。

1	安心な	_____	不安な
2	暖かい	_____	寒い
3	眠くない	_____	眠い
4	喉の乾いた	_____	喉の潤った
5	おどやかな	_____	激しい
6	わざとらしい	_____	さりげない
7	大きい	_____	小さい
8	せわしない	_____	落ちついた
9	珍しい	_____	ありきたりの
10	鋭い	_____	鈍い
11	緊張した	_____	和んだ
12	澄んだ	_____	濁った
13	遅い	_____	速い
14	満腹な	_____	空腹な
15	親しみやすい	_____	取っ付きにくい
16	ゆったりした	_____	窮屈な
17	つまらない	_____	おもしろい
18	疲れている	_____	疲れていない
19	不規則な	_____	規則的な
20	静かな	_____	騒々しい
21	賑々しい	_____	軽やかな
22	狭い	_____	広い
23	すがすがしい	_____	うっとうしい
24	臭い	_____	香々しい
25	楽しい	_____	苦しい
26	なじみのある	_____	目新しい
27	明るい	_____	暗い
28	荒い	_____	滑らかな
29	柔らかな	_____	硬い
30	好き	_____	嫌い

設問 F) 以上のことを総合的に判断すると、乗り心地をどう感じますか？

快	_____	不快
---	-------	----

ご協力ありがとうございました。

Fig. 2 Questionnaire on ride-quality.

3. 心理測定

3.1 SD法の適用

心理測定は、心理現象(精神現象)を数量化すること、あるいは心理現象に対する「数値の付与」を意味しており⁴⁾、その計測方法としては、官能検査、SD法、質問紙法、定性的計測法等⁵⁾がある。本論文では、種々の心理計測法の中から対象の持つイメージを相反する形容詞対を尺度として用いるSD法を採用して、乗り心地に対する心理的な変化と乗り物酔いに対する各種の要因の寄与の度合いを量的に取り扱うためのモデル化を試みた。SD法(Semantic Differential Method, 意味微分法)は、Concept(概念)をSemantic(意味的)にDifferential(区別)する方法と解釈されており⁶⁾、その評価手法は、人間がある評価対象から受ける心理的反応を、対象に関する複数個の形容詞対(形容動詞対)に対する主観的評価尺度に基づいて測定する方法である。一般にはSD法の調査結果に統計的分析手法の一つである因子分析法を適用することによって、評価対象に対するイメージの意味構造を明らかにすることができる^{5,6)}。通常は、ある評価対象に対する評価値として全評価者の平均値をその代表値とする場合が多いが、乗り心地のように極めて感覚的にしか表現されず、しかも個人差の大きい評価対象に対しては平均値のような統計的期待値の持つ意味も明確ではなくなる。即ち、評価対象はそれ自身の持つあいまいさの故にファジィ集合として表現し、評価結果の全体を用いた評価対象の意味づけが必要とされる。

3.2 心理計測実験結果の解析

実験の前後に被験者に対して行われたアンケート調査の回答を用いて、動揺実験前後における心理状態の変化、即ち乗り心地に対するイメージの変化に着目し、解析を試みた。設問E)の30組の形容詞対に対する解析手順は次の通りである。

- ① 30組の形容詞対の内、快適性の観点からは評価できない形容詞対(例えば、不規則な—規則的な)を除く。
- ② 更に、評価者の受け取り方で評価が逆転する形容詞対(例えば、大きい—小さい)を除く。
- ③ 7段階に評定された測定値にレベル0(快適)~6(不快)を割り当てる。
- ④ 実験前後の評定結果の差(実験後—実験前, 12段階)を改めて0~12とし、各形容詞対に対する評価値とする。
- ⑤ 形容詞対を変量、回答をサンプルとして因子分析を行う。
- ⑥ 得られた因子に対する意味づけを行う。

アンケートに対する回答に不備のあった1名分を除く89名分の回答について解析を行った。解析手順①, ②で除

かれた形容詞対は8組あり、残りの22組の形容詞対を用いて因子分析を行った。バリマックス回転によって因子軸を回転した結果をTable 1に示す。因子の解釈を行うと、第1因子は疎外感を表しており、第2因子は興味、関心、第3因子は安心感、第4因子は平常性を表していると意味づけることができる。

しかし表からも判るように、第1~第4因子の中には、これらの要因の外にも因子負荷量の大きいものが含まれており、その絶対値の最も大きな因子に意味を代表させることは必ずしも適当ではないことを示唆している。また、乗り物酔い、乗り心地に対して各因子が複合して寄与するケースが多いと考えられるが、因子分析法ではこの点を説明することができない。更に、当然の結果として、第1~第4因子の寄与率は加法性を満足することになっているが、この点についても何の保証もないので、因子分析法を用いて心理計測結果の解析を行うことには疑問の余地がある。また、一般的には乗り物酔い、乗り心地に対して影響を及ぼす要因としては空間環境、動揺刺激、生理状態、心理状態の4つが用いられるが、因子分析結果からはこれらの4要因との繋がりを考えにくい。(但し、形容詞対の選び方が適当でないことも考えられる。)

以上の結果から、乗り物酔い、乗り心地に寄与する要因の独立性、加法性を前提としない解析方法を確立する必要があることが理解される。

4. 心理測定モデルの構築

乗り物酔い、乗り心地のように評価過程に人間が介在する場合、複数の評価項目間の独立性は必ずしも保証されない。また、前述の理由により評価における加法性も必ずしも成立しない。この場合、評価項目の重み(評価における寄与の度合い)をファジィ測度によって表現して、各項目の個別評価値にそれぞれの重みを考慮して合成し、総合的な評価を行う方法としてファジィ積分が有効であることを示した⁷⁾。本論文では、いくつか提案されているファジィ積分の中から心理計測結果の解析への適用性を検討した上で、心理測定モデルの構築を行った。

4.1 ファジィ積分の検討

(X, S)を可測空間とする。関数 $g: S \rightarrow [0, \infty)$ が条件、

$$f1) \quad g(\emptyset) = 0 \quad (1)$$

$$f2) \quad A, B \in S, A \subset B \Rightarrow g(A) \leq g(B) \quad (2)$$

を満たすとき、関数 g はファジィ測度⁷⁾と呼ばれる。いま、 s_1, s_2, \dots, s_n が評価対象の持つ属性を表すものとする、評価対象は集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ で表現することができる。評価者 j による要素 s_i に対する評価値を表す関数 $h_j(s_i): S \rightarrow [0, 1]$ を定義する。

ファジィ測度 g を各要素に対する寄与の度合いと考えると、各要素の評価値にそれぞれの寄与度を考慮して合成し、評価対象全体に対する総合評価値 e_j を求める手法として

Table 1 Results of factor analysis of adjective pairs.

番号	形容詞対	因子負荷量				代表因子			
		第1因子	第2因子	第3因子	第4因子	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
1	安心な - 不安な	-0.07	0.42	0.62	-0.05		安心な	安心な	
2	暖かい - 寒い	-0.01	0.11	0.09	-0.24				
4	喉の潤った - 喉の乾いた	-0.02	0.03	0.04	0.36				
5	おだやかな - 激しい	-0.12	0.11	0.35	0.51				おだやかな
6	さりげない - わざとらしい	-0.23	0.24	0.19	0.54				さりげない
8	落ちついた - せわしない	-0.04	0.31	0.27	0.50				落ちついた
11	和んだ - 緊張した	-0.12	0.13	0.55	0.11			和んだ	
12	澄んだ - 濁った	-0.34	0.44	0.33	-0.05		澄んだ		
14	満腹な - 空腹な	-0.42	-0.35	0.01	0.05	空腹な			
15	親しみやすい - 取っ付き難い	-0.66	0.10	0.16	0.48	取っ付き難い			親しみやすい
16	ゆったりした - 窮屈な	-0.28	0.29	0.43	0.04			ゆったりした	
17	おもしろい - つまらない	-0.17	0.69	-0.09	0.26		おもしろい		
18	疲れていない - 疲れている	-0.40	0.45	0.07	0.07		疲れていない		
20	静かな - 騒々しい	-0.14	-0.03	0.40	0.03			静かな	
21	軽やかな - 重々しい	-0.36	0.39	0.14	-0.09				
22	広い - 狭い	-0.48	0.03	0.30	0.03	狭い			
23	すがすがしい - うっとうしい	-0.55	0.15	0.33	0.01	うっとうしい			
24	香ぐわしい - 臭い	-0.08	0.11	0.25	0.15				
25	楽しい - 苦しい	-0.62	0.35	0.13	0.33	苦しい			
27	明るい - 暗い	-0.42	-0.03	0.44	0.09	暗い		明るい	
28	滑らかな - 荒い	-0.16	-0.15	0.39	0.14				
30	好き - 嫌い	-0.61	0.54	0.25	0.27	嫌い	好き		
	固有値	5.485	1.214	1.061	0.955				
	寄与率	0.629	0.139	0.122	0.110				
	累積寄与率	0.629	0.768	0.890	1.000				

ファジィ積分を導入する。

第1報の表情評価モデルに適用したファジィ積分⁶⁾は

$$e_j = f_s h_j(s_i) \circ g(\cdot) \quad (3)$$

であり、要素の個別評価値を表す被積分関数 $h_j(s_i)$ を大きさの順に並べ換えて、

$$h_j(s'_1) \geq h_j(s'_2) \geq \dots \geq h_j(s'_n) \quad (4)$$

とし、 $S_i = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_i\}$ を定義すると、

$$e_j = \vee [h_j(s'_i) \wedge g(S_i)] \quad (5)$$

のように書き換えられ、Fig. 3のように表された。但し、 \vee は max を、 \wedge は min を表すものとし、図では $n=4$ の場合を示す。

この積分には max, min 演算が含まれているためにファジィ測度の同定のための最適化計算は容易ではなく、膨大な計算時間を要する。また、この積分値は重み付き中央値と解釈することができ、被積分関数の全体的な変化を表現することはできるが局所的な変化を積分値に反映させることができない。

ファジィ積分に関しては、菅野、室伏によって

$$e_j = (C) \int_s h_j(s_i) dg \quad (6)$$

で表されるファジィ積分⁷⁾が新たに提案された。この積分では(4)式のように被積分関数を大きさの順に並べ換え、

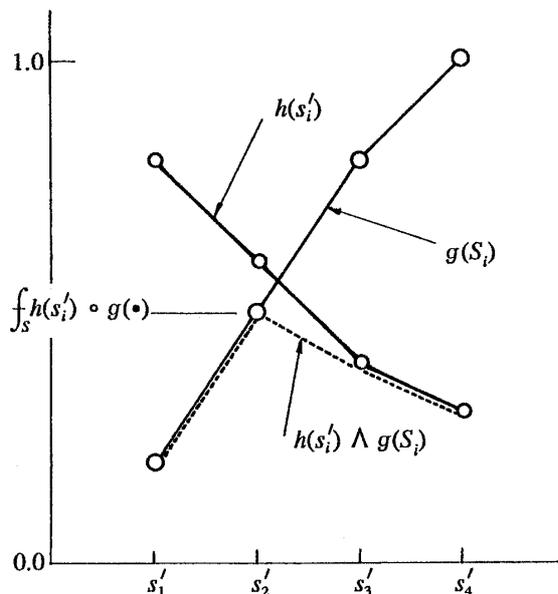


Fig. 3 Schematic expression of fuzzy integral used in the former report.

S_i を定義すると、

$$e_j = \sum \{ [h_j(s'_i) - h_j(s'_{i+1})] \times g(S_i) \} \\ = \{ h_j(s'_1) - h_j(s'_2) \} \times g(S_1)$$

$$\begin{aligned}
& + \{h_j(s_2') - h_j(s_3')\} \times g(S_2) \\
& + \dots\dots\dots \\
& + h_j(s_n') \times g(S_n) \quad (7)
\end{aligned}$$

のように書くことができ、積分値は Fig. 4 中の斜線部の面積で表される。従って、被積分関数の局所的な変化を積分値に反映させることができる。更に、この積分は、積和だけで表されており、ファジィ測度の同定のための最適化計算は容易となり、数理計画法を用いることができる。

評価者 j による全体評価値を d_j とすると、関数

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (e_j - d_j)^2} \quad (8)$$

ここに、 J : 全評価者数、

を最小化するようなファジィ測度 g を同定する。これは、個別評価値から合成された評価値 e_j と評価対象全体に対する評価値 d_j の差を最小とすようにファジィ測度を同定することを意味している。いま、簡単のため要素数 n を 4 とすると、(7)式は、

$$\begin{aligned}
e_j &= \sum [\{h_j(s_i') - h_j(s_{i+1}')\} \times g(S_i)] \\
&= \{h_j(s_1') - h_j(s_2')\} \times g(\{s_1'\}) \\
&\quad + \{h_j(s_2') - h_j(s_3')\} \times g(\{s_1', s_2'\}) \\
&\quad + \{h_j(s_3') - h_j(s_4')\} \times g(\{s_1', s_2', s_3'\}) \\
&\quad + h_j(s_4') \times g(\{s_1', s_2', s_3', s_4'\}) \quad (9)
\end{aligned}$$

と表現できる。更に、(9)式を一般化して、

$$\begin{aligned}
y_j &= a_{j1} \times g(\{s_1\}) + a_{j2} \times g(\{s_2\}) \\
&\quad + a_{j3} \times g(\{s_3\}) + a_{j4} \times g(\{s_4\}) \\
&\quad + a_{j5} \times g(\{s_1, s_2\}) + a_{j6} \times g(\{s_1, s_3\}) \\
&\quad + a_{j7} \times g(\{s_1, s_4\}) + a_{j8} \times g(\{s_2, s_3\}) \\
&\quad + a_{j9} \times g(\{s_2, s_4\}) + a_{j10} \times g(\{s_3, s_4\}) \\
&\quad + a_{j11} \times g(\{s_1, s_2, s_3\}) + a_{j12} \times g(\{s_1, s_2, s_4\}) \\
&\quad + a_{j13} \times g(\{s_1, s_3, s_4\}) + a_{j14} \times g(\{s_2, s_3, s_4\}) \\
&\quad + a_{j15} \times g(\{s_1, s_2, s_3, s_4\}) \quad (10)
\end{aligned}$$

を考える。(4)式で表される個別評価値の大小関係を満足するように評価値を並べ換え、(10)式の y_j が(9)式の e_j に一致するように係数 a_{jk} を決定するための規則を得ることができれば、ファジィ積分は(10)式を用いて行えばよいことになる。

さて、ファジィ測度の同定を定式化すると、

Find

$$\begin{aligned}
& g(\{s_1\}), g(\{s_2\}), g(\{s_3\}), g(\{s_4\}), \\
& g(\{s_1, s_2\}), g(\{s_1, s_3\}), g(\{s_1, s_4\}), \\
& g(\{s_2, s_3\}), g(\{s_2, s_4\}), g(\{s_3, s_4\}), \\
& g(\{s_1, s_2, s_3\}), g(\{s_1, s_2, s_4\}), \\
& g(\{s_1, s_3, s_4\}), g(\{s_2, s_3, s_4\}), \\
& g(\{s_1, s_2, s_3, s_4\})
\end{aligned}$$

such that

$$\sigma^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (y_j - d_j)^2 \rightarrow \text{minimize} \quad (11)$$

subject to

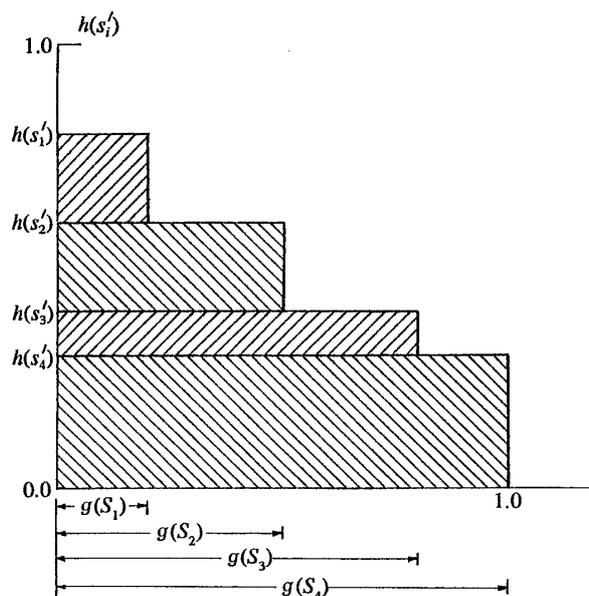


Fig. 4 Schematic expression of fuzzy integral introduced in the present paper.

$$0 \leq g(\cdot) \quad (\text{for all } g) \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
& \max(g(\{s_1\}), g(\{s_2\})) \leq g(\{s_1, s_2\}) \\
& \max(g(\{s_1\}), g(\{s_3\})) \leq g(\{s_1, s_3\}) \\
& \max(g(\{s_1\}), g(\{s_4\})) \leq g(\{s_1, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_2\}), g(\{s_3\})) \leq g(\{s_2, s_3\}) \\
& \max(g(\{s_2\}), g(\{s_4\})) \leq g(\{s_2, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_3\}), g(\{s_4\})) \leq g(\{s_3, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_1, s_2\}), g(\{s_1, s_3\}), g(\{s_2, s_3\})) \leq g(\{s_1, s_2, s_3\}) \\
& \max(g(\{s_1, s_2\}), g(\{s_1, s_4\}), g(\{s_2, s_4\})) \leq g(\{s_1, s_2, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_1, s_3\}), g(\{s_1, s_4\}), g(\{s_3, s_4\})) \leq g(\{s_1, s_3, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_2, s_3\}), g(\{s_2, s_4\}), g(\{s_3, s_4\})) \leq g(\{s_2, s_3, s_4\}) \\
& \max(g(\{s_1, s_2, s_3\}), g(\{s_1, s_2, s_4\}),
\end{aligned}$$

$$g(\{s_1, s_3, s_4\}), g(\{s_2, s_3, s_4\})) \leq g(\{s_1, s_2, s_3, s_4\}) \quad (13)$$

となる。ここに、(12)、(13)式はファジィ測度に課せられ条件(1)、(2)式を表している。この問題は、目的関数 σ^2 が2次式で、制約条件が1次式で表されているから、非線形計画の2次計画法⁹⁾を用いて容易に解くことができる。この方法によって得られたファジィ測度は、前報で報告した λ -ファジィ測度¹⁰⁾と比較してきめの細かい評価に適していることが判った¹¹⁾。

以上の検討の結果、本論文では(6)式あるいは(7)式で表されるファジィ積分を用いて心理測定モデルの構築を行うこととした。

4.2 階層化ファジィ積分モデル

被験者の乗り心地と刺激に起因する心理的な変化との因果関係を明らかにするために階層化ファジィ積分モデルを提案する。総合評価である乗り心地と影響要因の間の因果関係を Fig. 5 に示す。乗り心地を左右する要因として、一般に用いられている空間環境要因、動揺刺激要因、生理的

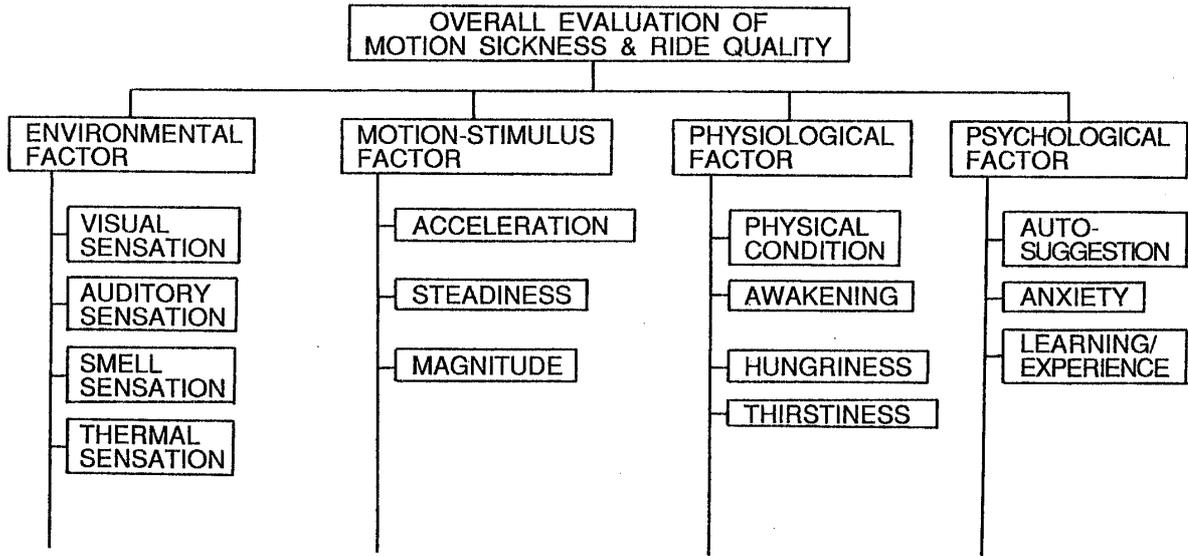


Fig. 5 Hierarchical structure of the evaluating process of motion-sickness and ride-quality.

Table 2 Categorized adjective pairs.

空間環境要因	動揺刺激要因	生理的要因	心理的要因
22 広い - 狭い (0.90)	28 滑らかな - 荒い (0.90)	14 満腹な - 空腹な (0.97)	30 好き - 嫌い (1.00)
16 ゆったりした - 窮屈な (0.84)	5 おだやかな - 激しい (0.77)	18 疲れていない - 疲れている (0.87)	1 安心な - 不安な (0.83)
27 明るい - 暗い (0.83)	21 軽やかな - 重々しい (0.37)	4 喉の潤った - 喉の乾いた (0.77)	25 楽しい - 苦しい (0.77)
20 静かな - 騒々しい (0.74)	8 落ちついた - せわしない (0.32)	24 香ぐわしい - 臭い (0.45)	17 おもしろい - つまらない (0.73)
2 暖かい - 寒い (0.71)	6 さりげない - わざとらしい (0.23)	2 暖かい - 寒い (0.29)	23 すがすがしい - うっとうしい (0.73)
12 澄んだ - 濁った (0.70)	17 おもしろい - つまらない (0.20)	.	11 和んだ - 緊張した (0.67)
24 香ぐわしい - 臭い (0.55)	.	.	15 親しみやすい - 取っ付きにくい ((0.63)
15 親しみやすい - 取っ付きにくい (0.37)	.	.	6 さりげない - わざとらしい (0.47)
8 落ちついた - せわしない (0.32)	.	.	8 落ちついた - せわしない (0.32)
.	.	.	
.	.	.	

要因, 心理的要因の4つを考える。ここに, 空間環境要因とは空間の広さ, 座席の座り心地, 騒音, 空気の清浄度, 照度, 身体の束縛感, 周囲の雰囲気等に対する快適性であり, 動揺刺激要因は, 乗り心地シミュレータにより被験者に加えられる低周波動揺刺激に対する快適性, また生理的要因とは体調, 覚醒度, 空腹感等の生理状態で, 心理的要因は乗り物酔いに対する不安, 過去の経験による自己暗示, 慣れ等を意味する。既に述べた通り, 30組の形容詞対がどの要因に帰属するかは, アンケート回答結果の因子分析によっては明確な答は得られなかった。そこで30組の形容詞対がどの要因に属するかをアンケート調査した。成人30名の評価者が分類した結果を Table 2 に示す。括弧内の数値は30名中の割合を示しており, 形容詞対は割合の多い順に並べてある。本研究においては, この調査結果を解析モデルに用いることとし, 空間環境要因に関する形容詞対として,

8 落ちついた — せわしない,
 16 ゆったりした — 窮屈な,
 20 静かな — 騒々しい,
 22 広い — 狭い,
 27 明るい — 暗い
 の5組を, 動揺刺激要因に関する形容詞対として,
 5 おだやかな — 激しい,
 6 さりげない — わざとらしい,
 8 落ちついた — せわしない,
 21 軽やかな — 重々しい,
 28 滑らかな — 荒い
 の5組を, 生理的要因に関する形容詞対として,
 2 暖かい — 寒い,
 4 喉の潤った — 喉の乾いた,
 14 満腹な — 空腹な,
 18 疲れていない — 疲れている,

- 24 香ぐわしい — 臭い
 の5組を、また心理的要因に関する形容詞対として、
 1 安心な — 不安な、
 8 落ちついた — せわしない、
 11 和んだ — 緊張した、
 15 親しみやすい — 取っ付きにくい、
 23 すがすがしい — うっとうしい

5組を選んだ。ここに、番号はアンケート設問中の形容詞対番号である。選択は、割合の多い順とし、3つの要因に含まれている番号8「落ちついた—せわしない」を加えることで、各要因における寄与の度合いの相違を調べることとした。心理的要因においては、総合評価を表していると考えられる形容詞対(例えば、好き—嫌い)は除いた。各要因がこれら5組の形容詞対によって説明されるものとし、各形容詞対に対する評価の変化がそれぞれの要因に対する評価の変化に如何に寄与しているのか、更に各要因に対する評価の変化が乗り心地に対する評価の変化に如何に寄与しているのかを調べた。前述したように人間が主観的な評価を行う場合、これらの寄与度は必ずしも加法性を満たしているとは限らない。そこで、寄与度をファジィ測度

で表し、5組の形容詞対に対する評価値に寄与度を考慮して合成する手法として(6)式で表されるファジィ積分を用いる。各形容詞対に対する評価値は、3.2④で得られた評定結果の差で表した評価値を用いることとする。また4つの要因に対する評価値として、アンケート用紙の設問A)~D)の結果を用い、総合評価値として、同じく設問F)の結果を用いた。但し、実験前の動揺刺激要因に対する回答は普通(レベル3)とした。

4.3 解析結果及び検討

(1) 乗り心地要因に対する形容詞対の寄与

まず、4つの要因に対する5組の形容詞対の寄与の度合いを求める。アンケートの回答から得られた各要因に対する評価値を d_j とし、5組の形容詞対の個別評価値をファジィ積分して得られた評価値を y_j とし、(11)式を最小とするようファジィ測度 g を同定する。但し、ここで求めるべきファジィ測度の数は、要素数 $n=5$ として31である。同定されたファジィ測度を Table 3(a), (b), (c), (d) に示す。表中、対角要素はその形容詞対単独の寄与の度合いを示しており、上三角形内の要素は対応する2組の形容詞対を同時に評価したときの寄与の度合いを示している。

Table 3(a) Degree of contribution of adjective pairs on environmental factor.

空間環境要因	落ちついた - せわしない	ゆったりした - 窮屈な	静かな - 騒々しい	広い - 狭い	明るい - 暗い
落ちついた - せわしない	0.38	0.42	0.42	0.58	0.58
ゆったりした - 窮屈な	0.75	0.09	0.39	0.42	0.58
静かな - 騒々しい	0.86	0.75	0.0	0.42	0.58
広い - 狭い	0.58	0.58	0.58	0.42	0.75
明るい - 暗い	0.71	0.42	0.42	0.42	0.40
その他の4形容詞対	1.01	0.75	0.86	0.58	0.71
全形容詞対	1.01				

$\sigma=0.07$

Table 3(c) Degree of contribution of adjective pairs on physiological factor.

生理的要因	暖かい - 寒い	喉の潤った - 喉の乾いた	満腹な - 空腹な	疲れている - 疲れていない	香ぐわしい - 臭い
暖かい - 寒い	0.0	0.13	0.13	0.97	0.0
喉の潤った - 喉の乾いた	1.02	0.13	0.13	0.64	0.13
満腹な - 空腹な	0.64	1.02	0.13	0.71	0.13
疲れている - 疲れていない	0.13	1.02	0.97	0.53	0.64
香ぐわしい - 臭い	0.97	0.97	1.02	0.13	0.0
その他の4形容詞対	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
全形容詞対	1.02				

$\sigma=0.07$

Table 3(b) Degree of contribution of adjective pairs on motion-stimulus factor.

動揺刺激要因	おだやかな - 激しい	さりげない - わざとらしい	落ちついた - せわしない	軽やかな - 重々しい	滑らかな - 荒い
おだやかな - 激しい	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
さりげない - わざとらしい	1.06	0.0	0.85	0.16	0.24
落ちついた - せわしない	1.06	1.06	0.0	0.49	0.0
軽やかな - 重々しい	0.85	0.24	0.24	0.16	1.06
滑らかな - 荒い	1.06	0.98	0.95	0.85	0.0
その他の4形容詞対	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
全形容詞対	1.06				

$\sigma=0.08$

Table 3(d) Degree of contribution of adjective pairs on psychological factor.

心理的要因	安心な - 不安な	落ちついた - せわしない	和んだ - 緊張した	親しみやすい - 取っ付きにくい	すがすがしい - うっとうしい
安心な - 不安な	0.0	0.28	0.70	0.65	0.0
落ちついた - せわしない	0.79	0.28	0.28	0.28	0.79
和んだ - 緊張した	0.97	0.80	0.0	0.20	0.0
親しみやすい - 取っ付きにくい	0.79	0.75	0.79	0.20	0.20
すがすがしい - うっとうしい	0.65	0.80	0.79	0.75	0.0
その他の4形容詞対	0.79	0.80	0.97	0.79	1.05
全形容詞対	1.05				

$\sigma=0.08$

一方、下三角形内の要素は対応する2組の形容詞対以外の3組の形容詞対を同時に評価したときの寄与の度合いであり、下2段のうち上段には、第1行に示される形容詞対を除く4組の形容詞対を同時に評価したときの寄与の度合いを表している。また、最下段には5組の形容詞対全てを同時に評価したときの寄与の度合いが示されている。 σ は(11)式における評価誤差で、何れもかなり小さい値を示していることから、各形容詞対からの寄与度に関しては満足できる同定がなされたと理解できる。

(a)は、環境要因に対する各形容詞対の寄与の度合いを表している。表より、乗り心地には「狭い」、「暗い」が寄与していることが判る。更に、「狭い」、「暗い」の組み合わせで寄与度は0.75となり、これに「窮屈な」が加わるとその寄与度は0.86となることが判る。「狭い」、「暗い」、「窮屈な」、「騒々しい」の組み合わせで空間環境要因の全体を説明することができ、「せわしない」は単独では寄与するものの、複合するとかえってその寄与は小さくなることが判る。一方、「騒々しい」、「せわしない」の寄与度は0.42で、残りの「窮屈な」、「狭い」、「暗い」の寄与度は0.58となり、これらの寄与の仕方には加法性が満たされていることが判る。同様に、「狭い」単独での寄与度は0.42で、残りの4組の形容詞対による寄与度は0.58となり、やはり加法性が満たされていることが判る。一方、「窮屈な」と「狭い」は劣加法的な関係にあるが、形容詞対の意味の重複を考慮に入れると妥当な結果であると判断される。

(b)は、動揺刺激要因に対して同定された各形容詞対の寄与の度合いである。表より、動揺刺激には「重々しい」、「荒い」あるいは「せわしない」、「わざとらしい」の組み合わせで動揺刺激要因を説明できることが判る。

(c)は生理的要因に対して同定された寄与度である。「疲れている」の寄与が大きいことが判る。これは、被験者の体調と疲労との相関が大きいであろうことから容易に理解することができる。特に、「寒い」、「疲れている」の組み合わせで0.97の寄与度を占めており、被験者が暖かいと感じるかどうかは体調に寄与していることは興味深いことである。但し、本実験は初冬(11月中旬~12月中旬)に実施されたので、夏期に実験を行う場合には異なる可能性が高い。

(d)は心理的要因に対する寄与を示している。各形容詞対は単独ではその寄与は小さいが、「うっとうしい」、「せわしない」あるいは「緊張した」、「不安な」の組み合わせでその寄与は大きくなる。ここでも、「不安な」、「せわしない」と「緊張した」、「取っ付きにくい」、「うっとうしい」の間に加法性が成り立つ。

また、「せわしない」の寄与度は空間環境要因では0.38、動揺刺激要因では0.0、心理的要因では0.28となり、同じ形容詞対に対する評価もその形容詞対が属する要因によって大きく異なることが判る。更に、他の形容詞対と複合す

ると、その寄与度はさらに大きく異なっていることも、これらの表より明らかとなった。

4つの要因に対する形容詞対の寄与を全体として眺めると動揺刺激要因、生理的要因、心理的要因とも3組の形容詞対の組み合わせでその寄与は大きくなる。この結果からも、4つに分けた要因に対して色々な因子が複合して寄与しており、加法性を前提とした解析は適当でないと判断される。

(2) 乗り心地に対する各要因の寄与

次に、乗り心地の総合評価値を d_j とし、4つの要因に対する個別評価値をファジィ積分して得られた評価値を y_j として、(11)式を最小とするファジィ測度 g の同定を行う。この場合、要素数 $n=4$ であり求められるファジィ測度の数は15となる。同定された各要因の寄与の度合いをTable 4に示す。表の見方はTable 3の場合と同様である。表より、各要因は単独ではその寄与は小さいが、「動揺刺激要因」、「生理的要因」あるいは「動揺刺激要因」、「心理的要因」の組み合わせでその寄与は大きくなることが明らかである。動揺実験の前後で乗り心地に対する評価がどのように変化するかの解析において、これらの組み合わせによる複合的な寄与度が高いという結果は妥当であると判断することができる。

一方、今回の実験においては「空間環境要因」は乗り心地に対して殆ど寄与しておらず、実験の前後で環境に対する心理量の変化は小さく、乗り心地の評価においてもその寄与は小さいという結果を得た。これは、動揺実験時にはキャビン内の環境は一定に保たれたことによると考えられる。

(3) 解析モデルの妥当性の検証

本解析モデルによって得られた各形容詞対、各要因の寄

Table 4 Degree of contribution of four principal factors on motion-sickness.

総合評価	空間環境要因	動揺刺激要因	生理的要因	心理的要因
空間環境要因	0.00	0.39	0.29	0.14
動揺刺激要因	—	0.20	0.86	0.81
生理的要因	—	—	0.29	0.29
心理的要因	—	—	—	0.00
その他の3要因	0.97	0.95	0.81	0.86
全要因	0.97			

$\sigma=0.05$

与度を用いて、乗り心地評価における心理量の変化を説明することができるかどうかの検証を行った。Fig.6(a), (b), (c), (d)に検証結果を示す。図は、動揺実験の前後で各要因の評価及び乗り心地の総合評価が快あるいは不快に変化した度合いを表している。図中斜線矢印は実験によって得られた評価結果であり、白矢印(モデルA)は提案した階層化ファジィ積分モデルによる出力結果で、形容詞対に対する個別評価値をファジィ積分して各要因の評価

値を求め、その結果を更にファジィ積分して得られた総合評価値である。総合評価における縦線矢印(モデルB)は動揺実験で得られた各要因に対する評価結果をファジィ積分して得られた結果を示している。図中の乗り物酔いの発症に関しては被験者の愁訴による。

(a)は動揺周波数0.2[Hz]の横揺に対して不快を訴えた被験者に対するもので、実験、モデル共に不快方向に大きく変化していることが判る。(b)、(c)は同一被験者の

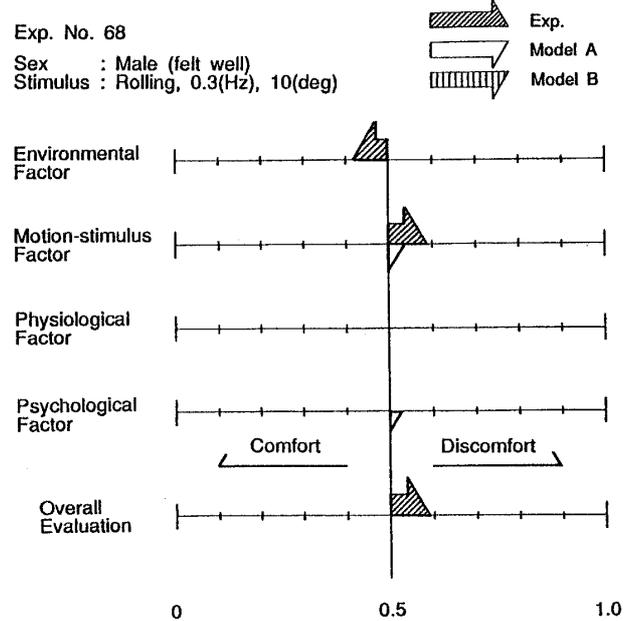
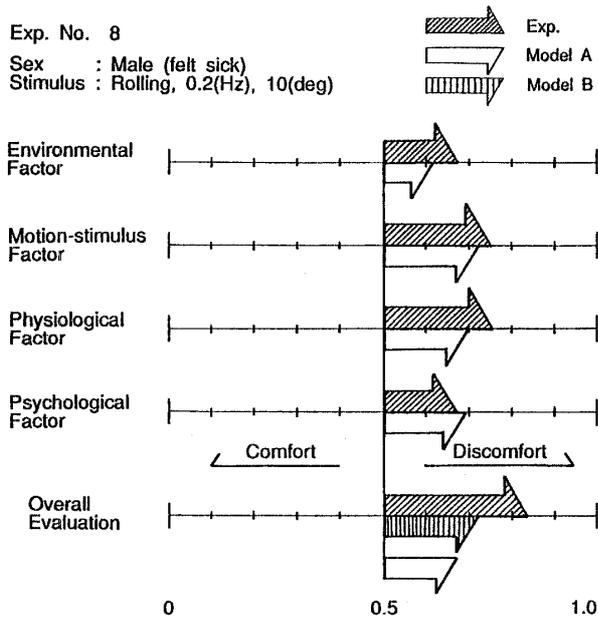


Fig. 6(a) An example of analyzed ride-quality. (Male, felt sick, Rolling, 0.2 Hz)

Fig. 6(c) An example of analyzed ride-quality. (Male, felt well, Rolling, 0.3 Hz)

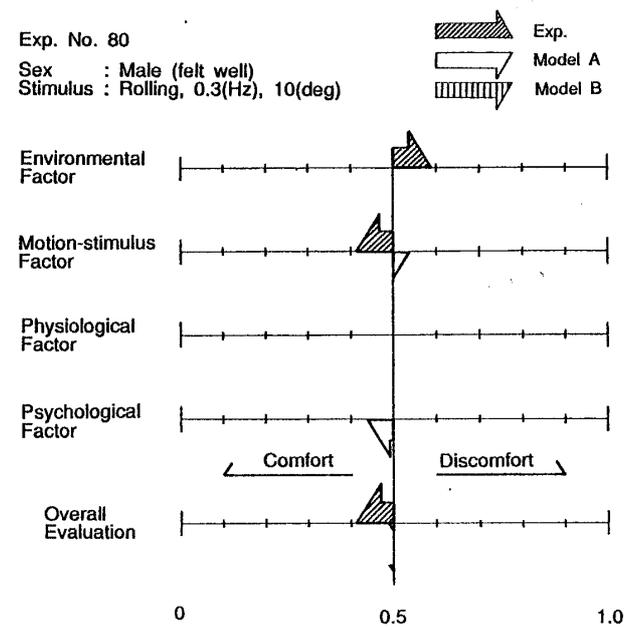
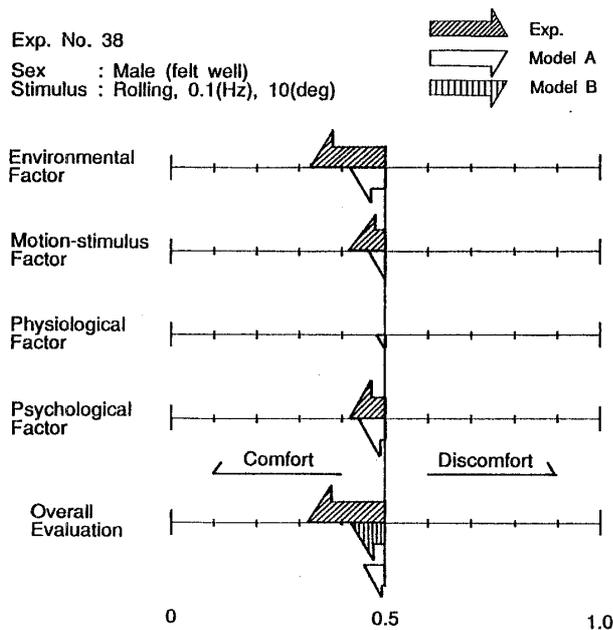


Fig. 6(b) An example of analyzed ride-quality. (Male, felt well, Rolling, 0.1 Hz)

Fig. 6(d) An example of analyzed ride-quality. (Male, felt well, Rolling, 0.3 Hz)

動揺周波数 0.1, 0.3 [Hz] に対する検証結果であり、実験時に酔いの発症のなかった例である。(b)の実験結果では、空間環境要因が大きく快方向に変化したため総合評価値も快方向に変化しており、程度の差はあるもののモデル出力も同じ傾向を示している。(c)では、空間環境要因は快方向に変化しているものの、動揺刺激を不快と感じ、総合評価は若干不快と判断されている。空間環境要因が乗り心地に対する寄与の小さいことを表している。モデルによる解析結果では若干の差はあるが、変化の傾向は実験によるものとよく似ている。総合評価としてはむしろ4組の要因の積分結果より実験による総合評価に近い。(d)は別の被験者の、動揺周波数 0.3 [Hz] に対する結果である。被験者は、動揺刺激を快適と感じているにも拘らず、モデル出力は不快と判断している。これは、今回選択された5組の形容詞対だけで各要因に対する寄与の度合いを説明しきれないこと、形容詞対に対する感受性の個人差を完全にモデル化することの難しさ等に起因していると考えられる。即ち、乗り心地に関与する要因の選択、更には、SD法における形容詞対の選択には十分な注意を要することを示唆している。

以上の検討の結果、本論文において提案した解析モデルでは、SD法を適用する場合の形容詞対の選び方、乗り心地に寄与する要因の選び方に十分な配慮がなされれば、心理計測結果の解析に用いることが可能であると判断される。

5. 結 言

本論文では乗り心地の評価という極めて感覚的でしかも個人差の大きな問題の中で、量的な解析が難しいと考えられる心理状態の変化に着目し、その量的解析手法を確立するために、評価者の代表値(例えば、平均値)を用いるといった従来の解析手法ではなく、全評価者によるあいまいさを含む評価値を用いた解析モデルの構築を行った。

評価項目間の独立性や評価における加法性を保証できないような評価問題にファジィ測度論を導入することで、感覚的で個人差が大きいという評価対象の持つあいまいさを解析に考慮することが可能であることを明らかにした。解析モデルでは、乗り心地評価過程を階層構造的に表現することで各要因、各形容詞対の寄与の程度を理解し易くした。しかし、今回の動揺実験の心理計測で使用した形容詞対だけで乗り心地の全てが説明されたわけではなく、しかも、形容詞対の因子分析結果からは一般に用いられる乗り物酔

い、乗り心地の要因の分類との繋がりを見出すことが困難であったことから、形容詞対の選び方には十分な注意が必要であることが明らかとなった。検証実験による検討の結果、本論文で構築された心理測定モデルは心理計測結果の解析に用いることができると考えられる。

本論文で提案した心理測定モデルの手法はSD法のみに対してではなく、他の心理計測手法による計測結果の解析に対しても適用可能で、従来量的な取り扱いの困難であった心理量の変化を量的に解析、評価することができると考えている。

本研究を遂行するにあたり、実験、解析に協力された大阪府立大学工学部船舶工学科岸光男助教授、山田智貴助手及び中島武士、桜井秀一、後藤守浩、石原幸信の諸君、被験者として実験に協力下さった多数の学生諸君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 細田龍介, 有馬正和: 船舶の乗り心地評価に関する研究(第1報)―表情評価モデルの作成―, 日本造船学会論文集, No. 172, (1992), pp. 717-728
- 2) 椎塚久雄, 杉山孝男: 階層化ファジィ積分による主観的意思決定法について, 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (1992), pp. 33-36
- 3) 細田龍介: 船舶システムにおける HUMAN PERFORMANCE の把握, 推定に関する基礎研究, 平成3年度科学研究費補助金研究成果報告書, (1992)
- 4) 市川伸一: 心理測定法への招待, サイエンス社, (1991)
- 5) 野呂影勇: 図説エルゴノミクス, (財)日本規格協会, (1990)
- 6) 畔柳昭雄: 快適性に関わる環境―視環境―, 海洋建築と環境, (1991), pp. 67-83
- 7) 室状俊明, 菅野道夫: ファジィ測度論入門[VII], 日本ファジィ学会誌, Vol. 4, No. 2, (1992), pp. 244-255
- 8) 菅野道夫: Fuzzy 測度と Fuzzy 積分, 計測自動制御学会論文集, 8, (1972), pp. 218-226
- 9) 例えば, 刀根薫: 2次計画法, BASIC, 培風館, (1981), pp. 185-191
- 10) 菅野道夫: Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価, 計測自動制御学会論文集, 9, (1973), pp. 361-368
- 11) 細田龍介, 有馬正和: 表情評価のための Fuzzy Modelling, 日本人間工学会関西支部大会講演論文集, (1992), pp. 39-42