

Kazukata Takei, Eiichi Yasuda, Shun'ichi Doi, Setsuo Maeda

要 旨

近年，車両の操縦性・安定性向上はめざましく，高速直進時の安定性向上は，小さくても安全かつ省燃費であるコンパクトカーの実現をもたらしている。これらの車両特性，パフォーマンスの設計においては，ドライバの感受性といった品質評価感度をも考慮する必要がある。すなわち，高速走行時の車両運動の安定性について考えるならば，多くの評価項目の中に人間の感知し得るヨー運動知覚特性などを考慮する必要がある。

本研究では人間のヨー回転振動に関する知覚感度特性を明らかにするため，6自由度の加振装置

を用いて，人間のヨー方向の回転に対する知覚感度や振幅の変化に対する弁別特性を調べた。

実験結果によるとヨー運動の知覚能力は，0.1Hz以下の低周波の動揺に対しても充分感度を有し，さらに，このような低周波領域においても，振幅変化に対して検出能力のあることが明らかとなった。これらの結果は，高速走行時における安定性評価の知覚感度を含めた設定基準を明確にすることにより，人間特性を考慮した車両運動特性設定法を新たに構築し得ることを示している。

キーワード

車両，安定性，快適，ヨー運動，振動，人間，感受性，閾値

Abstract

Recent progress in vehicle stability and controllability during straight running at high speed realized a small compact car as well as a low energy consumption. The design of these performances requires the consideration of taking the human driver's sensitivity into account. As for the vehicle stability at high speed, the characteristic of detectable yaw-motion is one of the important evaluational properties.

In this study, the human sensitivity for yaw-motion and the threshold characteristics for the change in amplitude are examined using an electric shaker with 6 degrees of freedom to clarify

the human sensitivity for rotational sensation.

According to the experimental results,

1) Human sensitivity for yaw-motion is recognizable for low frequency regions below 0.1Hz, and moreover,

2) Even for these low frequency regions, human sensitivity for the detecting abilities of the amplitude changes are evident and the threshold values obeyed Weber's law.

From these facts based on experimental data, the evaluation of stability and controllability of a vehicle is more understandable by taking the human response characteristics into account.

Keywords

Vehicle, Stability, Comfort, Yaw-motion, Vibration, Human, Sensitivity, Perception

1. はじめに

近年の自動車の高効率、低燃費化に伴い、軽量でかつ高速走行安定性に優れた車両運動特性が重要となってきた。すなわち、車両重量が軽く全長およびホイールベースが短い小型車では、直進走行時の慣性モーメントが小さいため、ヨー復元力が低下し、路面の凹凸や横風外乱等による車両のふらつきが大きくなり、ドライバへの運転負担を増加させる。こうした課題に対して、現状ではサスペンション特性の適正化が進められているが、高速走行時の操縦性・安定性向上のための設計に必要な人間の動揺知覚特性は不明な点が多い。

一方、人間-自動車系の研究においては、従来から高速走行時の安定性に関する検討¹⁻³⁾がなされており、ヨーレイトの2乗平均値や、ヨーイング固有振動数とスタビリティファクターの関係が評価因子となっている。また、こうした研究から、運転者のヨー感覚が車両の操縦において最も重要な感覚と考えられ、ヨー方向の知覚特性を調べた研究がある⁴⁾。しかし、これらの研究はヨーレイト変化に対する応答時間と閾値の関係をj得ているものの、加振周波数に対する閾値特性は明らかにされていない。そのため、操縦性・安定性評価の一般的な指標であるヨーレイトの周波数応答特性と関連付けることができないといった問題がある。

一方、自動車以外の乗り物を含む人間の全身振動に対する評価の研究も数多くあり、Griffinらは、各振動の等感度特性を電氣的なフィルタ特性に置き換えた乗り心地評価基準を提案している⁵⁻⁹⁾。

また、Irwinは、構造物中における人間のヨー方向の知覚特性として、閾値と等感度を0.05～数Hzの周波数帯域で調べ、ともに0.05Hzまで知覚できると報告している¹⁰⁾。しかし、いずれの研究も、ヨー回転中心の設定が人間の着座中心位置であるため、自動車のヨー回転振動に対する知覚特性とは異なることが考えられる。

本研究では、ヨー回転振動に対する回転方向の弁別閾値特性と、振動振幅が時間的に増加あるいは減少する場合の閾値特性を、実車と同様なヨー回転中心位置での加振条件により調べた。そして、その周波数特性を実験的に検討した。本稿では、

前者の閾値特性を方向弁別閾値、後者を振幅変化弁別閾値と呼び、それぞれの試験結果と高速走行時の安定性評価への適用例を報告する。

2. 実験方法

2.1 実車走行試験

ヨー回転振動の弁別閾値を計測する実験条件を設定するため、実車走行中におけるヨー回転振動レベルの測定を行った。試験に用いた車両は、多種多様な車両形式のうち、カテゴリの異なる3種類の車両を代表車として選択した。Table 1に供試車両の主要諸元を示す。走行試験は、車速100km/hで高速道路の走行レーンを道路に沿って3分間走行した。

なお、レーン中央線からのふらつき量の目安は±20cm以下、設定車速の範囲は±5km/h以下となるように運転者へ指示した。

Fig. 1は、高速道路走行中におけるヨー回転振動の大きさを調べるために、代表的な3車種のヨー角加速度をリニアスペクトラム解析したもので、3分間の平均振幅を示す。Irwinが調べた0.05～数Hzの周波数帯域における振動振幅に注目すると、0.5Hz付近でA車が他の車両に比べ振動振幅が大きくなり、車種間の違いが見られる。また、Fig. 2に示すA車のヨー角加速度の時間軸波形の時刻6～8secを見ると、最大値が約0.07rad/s²であり、実効値で言えば0.05rad/s²r.m.sの振幅値となる振動が発生している。これらの結果をもとに、次節以下のヨー回転振動の弁別閾値を検討するための角加速度レベルを設定した。

2.2 加振条件

回転振動を発生させる体感評価装置¹¹⁾は、Fig. 3に示すように3組の平行リンクで支持されたキャビンの位置と角度を変更することによって、車両の6自由度運動を再現することができる。この平行リンクのキャビン支持位置と角度は、6台のACサーボモータの回転によって制御される。また、本

Table 1 Test vehicle.

Car	Category	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Wheel base (m)	Front mass (kgf)	Rear mass (kgf)
A	Luxury	4.80	1.75	1.42	2.73	1030	925
B	Van	4.44	1.70	1.86	2.72	965	935
C	Compact	3.74	1.63	1.40	2.30	520	470

装置のヨー回転中心は、普通乗用車の車両重心に相当する位置に設定することで、キャビン内のシートに着座した被験者には実車と同様な振動が暴露される。ここで、被験者の年齢構成は、20歳から50歳まで各10歳代ごとに2名ずつ、計8名である。Table 2に被験者の身体諸元を示す。

2.2.1 ヨー回転の方向変化試験

体感評価装置のシートに被験者を座らせ、キャビンのドアを閉めて外界情報を遮断した後、正弦波形でヨー回転させる。被験者は、Table 3に示す加振条件に基づいて変更されたヨー回転方向を判別し、回転方向に応じた押しボタンによってその方向を申告する。そして、誤判定した一つ前の振幅を方向弁別閾値とし、3回の平均値をとる。また、Table 3に示した加振条件は、Irwinの結果で得られた弁別閾値

を参考として、その近傍の振動量を設定した。

2.2.2 ヨー回転振動の振幅変化試験

体感評価装置のシートに座った被験者に、基準となる正弦波のヨー角加速度を与えた後、Fig. 4に示すようにその振幅を断続的に増加または減少させる。このヨー角加速度の振幅変化に対して、

- (a) 増加した場合には、右ボタンスイッチ
- (b) 減少した場合には、左ボタンスイッチ
- (c) 変わらない、もしくはわからない場合には両方のボタンスイッチ

を押すことで申告し、弁別閾値の判定を行う。これを0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5Hzの周波数について調べる。ここで、基準のヨー角加速度は、Fig. 2に示した高速走行時のヨー角加速度振幅をもとに

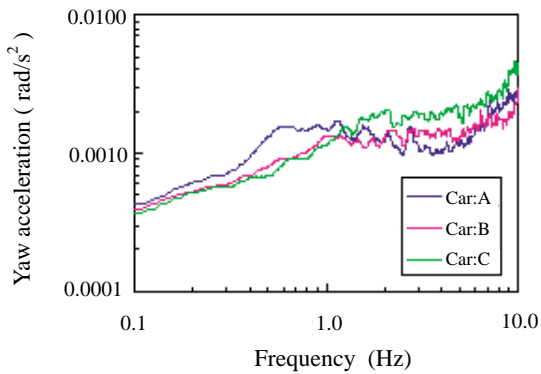


Fig. 1 Frequency characteristics of yaw acceleration. acceleration.

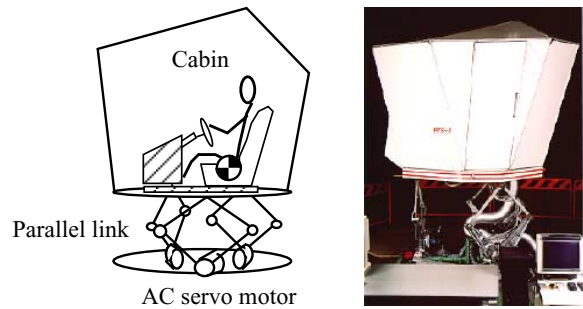


Fig. 3 The measuring system of evaluating complex motion sensation.

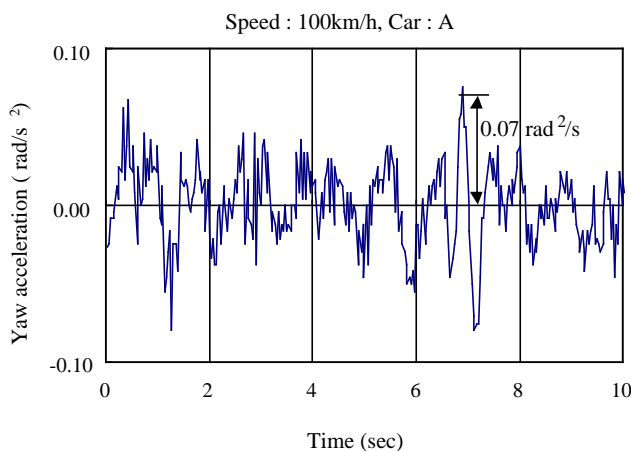


Fig. 2 Real time characteristics of yaw acceleration.

Table 2 Physical characteristics of subjects.

Subject	Sex	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
A	female	20	168	54
B	female	20	160	47
C	male	30	170	70
D	male	31	176	75
E	male	42	163	67
F	male	43	167	64
G	male	53	157	55
H	male	58	156	60
I	male	43	168	60
J	male	54	163	60

0.05rad/sec²r.m.sを設定するとともに、高速の車速を考慮してその2倍にあたる0.1rad/sec²r.m.sも設定した。

なお、振幅の変更に関しては基準振動に対して単調に増減させるだけではなく、意図的に変化させない条件も入れた。

3. 実験結果

3.1 方向変化に対する弁別閾値特性

ヨ一回転振動の周波数に対してそれぞれ3回ずつ測定したヨ一角加速度の方向弁別閾値をFig. 5に示す。図の平均値特性より、0.1Hz以上の周波数領域では、0.2Hzで折れ点が見られるものの、周波数と

Table 3 Experimental conditions.

Yaw acceleration (rad/s ² r.m.s)	Frequency (Hz)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
0.04242					
0.03535					0.00506
0.02828				0.02532	0.00405
0.02121				0.01899	0.00304
0.01414			0.05060	0.01267	0.00202
0.01051		0.15198	0.03799	0.00949	0.00152
0.00848		0.12158	0.03040	0.00759	0.00122
0.00707		0.10132	0.02532	0.00634	0.00102
0.00363		0.09119	0.02279	0.00571	0.00091
0.00565		0.08105	0.02026	0.00506	0.00080
0.00495		0.07093	0.01771	0.00443	0.00072
0.00424		0.06079	0.01520	0.00380	0.00061
0.00354		0.05067	0.01267	0.00316	
0.00283		0.04053	0.01014	0.00253	
0.00212		0.03040	0.00759	0.00190	
0.00141	0.12660	0.02026	0.00506		
0.00105	0.09500	0.01520	0.00380		
0.00085	0.07600	0.01217	0.00304		
0.00071	0.06330	0.01014	0.00253		
0.00063	0.05700	0.00911	0.00286		
0.00056		0.00810			
0.00049					
0.00042					

unit: rad

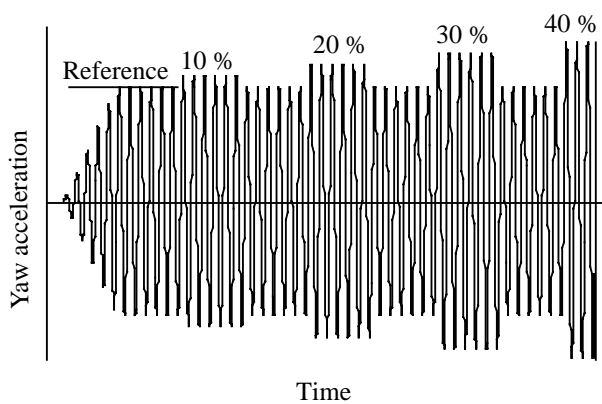


Fig. 4 Yaw acceleration command signal.

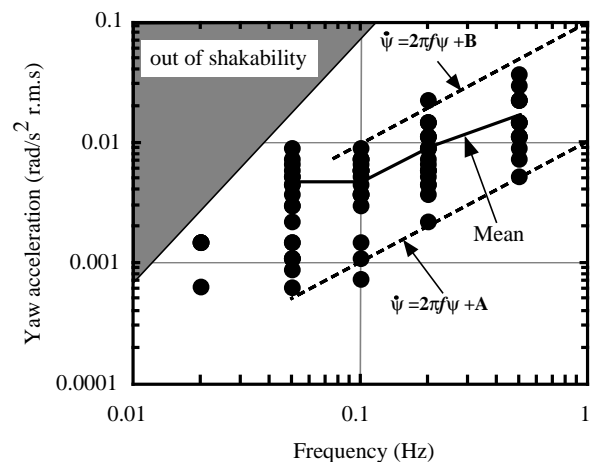


Fig. 5 Mean acceleration curves for directional perception of yaw vibration.

ともに弁別閾値が増加する傾向となる。特に0.1Hzと0.2Hzを結ぶ平均値特性の傾きは、周波数 f が0.1Hzから0.2Hzに2倍高くなると、弁別閾値も2倍大きくなるという正比例の関係にある。これは、物理的な関係からヨー角加速度 $\dot{\psi}$ が $\dot{\psi}=2\pi f\psi$ で示されるため、ヨー角速度 ψ の大きさで表現すると0.1Hzと0.2Hzの弁別閾値は同じであることを示している。

また、図中の破線は、各周波数における方向弁別閾値の最小値付近と最大値付近に $\dot{\psi}=2\pi f\psi$ の傾きをもつ切片AとBの1次式を示すが、0.1Hz以上の弁別閾値はこの傾きにはほぼ対応している。したがって、0.1Hz以上の周波数領域におけるヨー回転振動の知覚は、ヨー角速度 ψ の大きさで弁別していると考えられる。

一方、0.1Hz以下の周波数領域における平均値特性では、0.05Hzと0.1Hzのヨー角加速度の弁別閾値がほぼ同等で一定となる傾向を示す。さらに、周波数が0.02Hzまで低くなると加振機の制限範囲内で回転方向を弁別できた人は、被験者8名の内、A, C, D, Eの4人であった。しかも、3回とも回転方向を正確に弁別できた被験者は一人もいなかった。

この結果から、ヨー回転振動の周波数に対する人の知覚特性は、0.05～0.1Hzと0.1～0.5Hzの周波数領域で弁別する物理量が異なっていると考えられる。すなわち、前者の周波数領域ではヨー角加速度であり、後者の周波数領域ではヨー角速度である。また、弁別可能なヨー回転振動の最低周波数は0.02Hz程度

であり、その弁別閾値の最小値（限界値）は、 $0.00063\text{rad/s}^2\text{r.m.s}$ であった。また、0.1Hzにおける被験者8名の平均値は $0.0047\text{rad/s}^2\text{r.m.s}$ であった。

3.2 振幅変化に対する弁別閾値特性

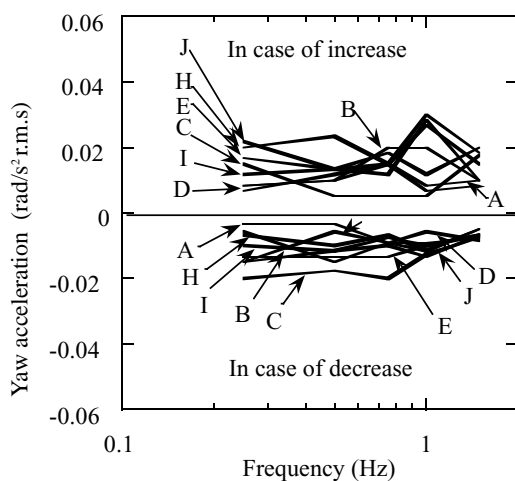
Fig. 6(a)および(b)は、基準のヨー角加速度からの振幅変化を弁別できた最小のヨー角加速度差を周波数ごとに整理した弁別閾値特性であり、被験者全員の特性を示す。なお、図中の各弁別閾値は3回の平均値である。

また、Fig. 6の結果をもとに振幅の増加方向と減少方向について、それぞれ8名の被験者で弁別閾値を平均し、その絶対値で表した振幅変化弁別閾値特性をFig. 7に示す。振幅変化弁別閾値は、方向弁別閾値とは異なり、周波数に対してフラットに近い特性である。また、振幅変化の方向性については、振幅の増加方向よりも減少方向の方が知覚しやすいことがわかる。特にこの傾向は、基準振動の小さい方が顕著である。

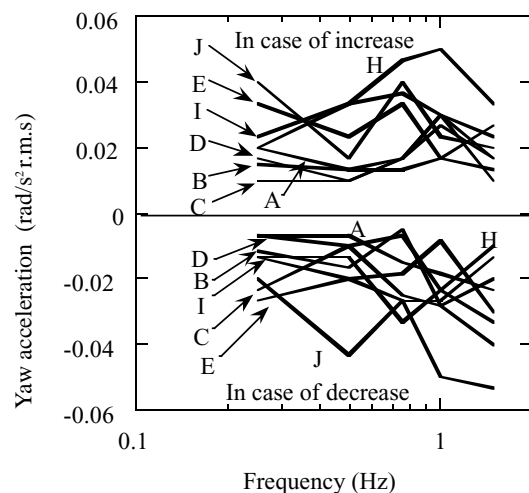
4. 考察

4.1 ヨー回転振動における人間の知覚感度

ヨー回転振動における人の知覚感度に関して、これまでに報告されている閾値特性および等感度特性^{5, 8)}と、本研究で得られた方向弁別閾値とを比較した結果をFig. 8に示す。本研究におけるヨー回転振動の方向弁別閾値特性は、従来の閾値特性（Irwin）と比べ周波数が高くなるほどヨー角加速度で示す閾値が



(a) Referred acceleration : $0.05 \text{ (rad/s}^2 \text{ r.m.s)}$



(b) Referred acceleration : $0.10 \text{ (rad/s}^2 \text{ r.m.s)}$

Fig. 6 Individual perceptibility of amplitude of yaw vibration.

増加する傾向は一致しているが、各周波数における閾値は低く従来の結果よりも人間の感度は高いことがわかる。さらに、低周波数領域における感度は、0.1Hz以下で飽和する傾向が見られ、ヨー方向における動揺感覚の下限値がわかった。

また、振幅変化試験を行ったFig. 7の結果より、2

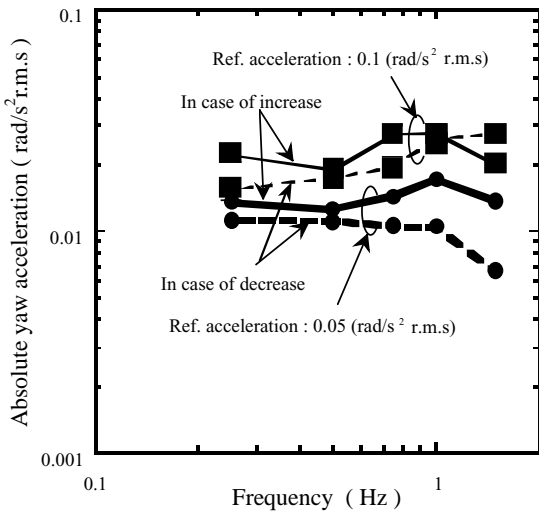


Fig. 7 Mean acceleration curves for detectable amplitude of yaw vibration.

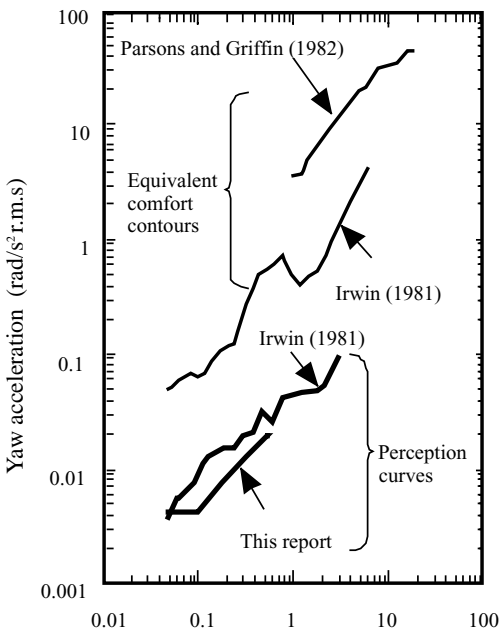


Fig. 8 Perception curves and equivalent comfort contours of yaw vibration.

種類の基準振動と振幅変化弁別閾値の比を調べてみると、ほぼ一定の比率であり、その比率は約0.2～0.3である。これは、「刺激の強さをR、そのときの識別閾rとすると、Rの大小によらず、そのときのWeber比 (r/R) は一定である」というWeberの法則と一致し、人間の振動感受特性もこの法則に従うものと思われる。

4.2 高速走行時の安定性評価への適用例

ここでは、実車走行時におけるヨー回転振動の振動レベルと本研究で得られたヨー方向の知覚感度特性とを対比し、車両の方向安定性評価指標になり得るかを検討する。

Fig. 9は、周回テストコースの直線部を定常走行した場合のヨー角加速度のリニアスペクトラムと、Fig. 5で得られた方向弁別閾値特性を示したものである。車速は、140km/h一定走行とし、図中には各20秒間のデータを10回計測した場合の平均値と、1回ごとのばらつきを示す。図より、平均的なヨー角加速度は、ヨー回転振動の知覚感度以下である。しかし、1回ごとのばらつきは、車両を直進走行するために行うと見られる修正操舵時のヨー回転振動が知覚感度内に達している。すなわち、ドライバは、車両の方向安定性を十分に評価できることがわかる。

こうした人間のヨー回転振動の方向弁別閾値特性を用いた方向安定性の評価は、ドライバの曖昧な官能評価に代わり客観的な評価指標になり得ると考え

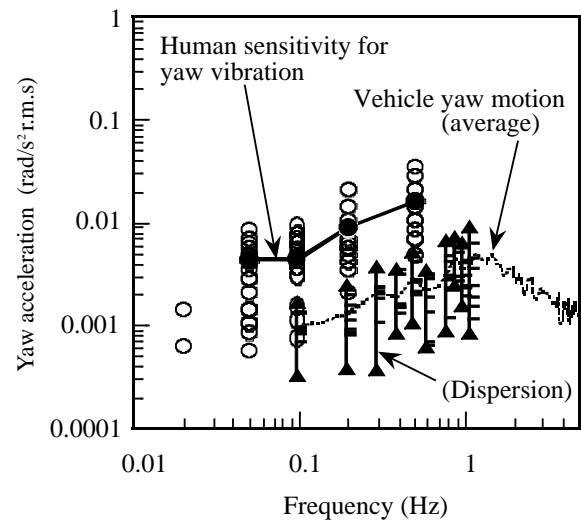


Fig. 9 Comparison of vehicle yaw motion and human sensitivity.

られる。

5. まとめ

最近の車両開発においては、小型・軽量化がますます進み、高速走行時の操縦安定性能が重要視されている。しかしながら、運転者の知覚感度特性については、十分に把握されているとは言えない。本報では、操縦安定性に関わる運転者のヨー回転振動の知覚感度特性として、回転方向と振幅変化に対する弁別閾値の周波数特性を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) ヨー回転振動の周波数に対する人の知覚特性は、0.05 ~ 0.1Hzと0.1 ~ 0.5Hzの周波数領域で弁別する物理量が異なり、前者の周波数領域ではヨー角加速度、後者の周波数領域ではヨー角速度で知覚すると考えられる。また、最小弁別閾値は、0.00063 rad/s² r.m.s、平均弁別閾値は0.0047rad/s² r.m.sであった。

(2) 振幅変化に対する知覚感度は、振幅の増加よりも減少の方が高い傾向が見られた。また、このような低周波数領域における人の振動振幅変化の感受特性はWeberの法則に従い、基準振動との比が0.2 ~ 0.3であった。

(3) 高速走行時の方向安定性評価において、人間の閾値特性が官能評価を説明する客観的な指標になることを示した。

今後は、上記の結果を踏まえた人の振動感受特性を車両の操縦・安定性評価や乗り心地評価などに、反映させていきたい。

最後に、本研究を進めるにあたり機械2部の石黒陸雄技師と、感性・人間行動部の加藤悦子事務員に協力して頂いた。

参考文献

- 1) 杉本軍司, ほか4名: "高速道路における人間-自動車系の横風; 走行安定性の解析", 自動車技術会学術講演会前刷集, 761(1976), 243-250
- 2) 橋本利幸, ほか2名: "高速走行時の安定性", 自動車技術, 34-3(1980), 206-210
- 3) 広田敦生, ほか2名: "直進安定性の評価法", 自動車技術, 36-3(1982), 284-290
- 4) 堀口明伯, ほか1名: "運転者のヨー運動知覚特性の研究", 自動車技術, 48-12(1994), 38-43
- 5) M. J. Griffin: Handbook of Human Vib., (1996), 62, Academic Press, London
- 6) Parsons, K. C. and Griffin, M. J.: "The Effect of the Position - Body Roll and Pitch Vibrations of Seated Persons", J. Sound Vib., 58-1(1978), 127-141
- 7) Parsons, K. C. and Griffin, M. J.: "Vibration and Comfort II; Rotational Seat Vibration", Ergonomics, 25-7(1982), 631-644
- 8) Morioka, M. and Griffin, M. J.: "Difference Thresholds for Intensity Perception of Whole-body Vertical Vibration; Effect of Frequency and Magnitude", J. Acoust. soc. Am.,

107-1(2000), 620-624

- 9) Mansfield, N. J. and Griffin, M. J.: "Difference Thresholds for Automobile Seat Vibration", Appl. Ergonomics, 31(2000), 255-261
- 10) Irwin, A. W.: "Perception, Comfort and Performance Criteria for Human Beings Exposed to Whole Body Pure Yaw Vibration and Vibration Containing Yaw and Translational Components", J. Sound Vib., 76-4(1981), 481-497
- 11) 三村宣治: "電動6軸パラレルリンクマニピュレータとその応用", 日本機械学会論文集 (C編), 62-597(1996), 1866

(2001年3月30日原稿受付)

著者紹介



武井一剛 Kazukata Takei
生年: 1961年。
所属: 予防安全研究室。

分野: 予防安全および人間機械系解析分野の研究。
学会等: 自動車技術会会員。



安田栄一 Eiichi Yasuda
生年: 1954年。
所属: 感性・心理研究室。

分野: 人体の振動感受特性に関する研究。
学会等: 自動車技術会会員。



土居俊一 Shun'ichi Doi
生年: 1947年。
所属: 感性・人間行動部。

分野: 車両運動・予防安全および人間機械系解析分野の研究。
学会等: 日本機械学会, 計測自動制御学会, 自動車技術会会員。
1985年IR100選入賞。
1993年計測自動制御学会技術賞
武田賞受賞。工学博士。



前田節雄 Setsuo Maeda
生年: 1952年。
所属: 独立行政法人産業医学総合研究所人間工学特性研究部。

分野: 振動, 音響工学および人間工学に関する産業医学分野の研究。
学会等: 日本音響学会, 日本騒音制御工学会, 日本人間工学会, 日本建築学会, 日本産業衛生学会, 自動車技術会会員。工学博士。

【お詫びと訂正】

著者に誤り (を追加) があり、2002年4月15日付で訂正いたしました。深くお詫びいたします。お手元にプリント版がございましたら差し替えをお願いいたします。