

官能評価手法に基づいたシート用 ポリウレタンフォーム設計手法による 高性能ポリウレタンフォームの開発

Development of High-performance PUF and Organoleptic Evaluation of Polyurethane Foam for Car Seat

石井直人*
Naoto ISHII

松本伴紀*
Tomoki MATSUMOTO

青 励*
Tsutomu AO

要 旨

ABSTRACT

座り心地、乗り心地、乗員の運転しやすさの向上と軽量化をねらいとした、車両用シートクッションのための、ポリウレタンフォームを開発した。静的な性能である座り心地については、硬さ感、ぐらつき感、底付き感、ばね感について官能評価をおこない、各評価指標とポリウレタンフォーム特性値の関係を明確にした。また、動的な性能である乗り心地については、人体の振動特性に注目し、ポリウレタンフォーム特性を調整することにより性能が向上できることを明らかにした。これらの結果からポリウレタンフォームの設計手法を確立することができた。この開発手法を用いて、座り心地、乗り心地に優れ、振動やぐらつき感が少なく、かつ軽量のシートを実現することができた。

A polyurethane foam for a vehicle seat cushion was developed in order to improve seat comfort and drivability, as well as to reduce ride vibration and weight. An organoleptic evaluation of seat comfort, which is a static property, was performed by examining hardness, wobbling, bouncing sensations and the bottoming feel, and the correlations between each evaluation marker and the polyurethane foam property values were clarified. For ride comfort, which is a dynamic property, emphasis was placed on the vibrational properties of the human body, and a clear determination was made that adjusting polyurethane properties improves performance. A method for designing the polyurethane foam was established using these results. Using this development method, it was possible to achieve a lightweight seat with superior seat comfort and ride comfort that produced little sensation of vibration or wobbling.

1. まえがき

車両用シートのクッションには、乗員を優しく支え快適な座り心地を確保すること、不快な振動を遮断すること、ぐらつかず運転しやすいこと、などが求められている。また昨今の環境問題への意識の高まりから、燃費性能向上のために、軽量化の要求も大きくなっている。

今日、車両用シートのクッション材には、ポリウレタンフォーム (PUF) が多く使われている。PUF のモールド成形製造技術は 1960 年頃に確立され、Honda においては、1974 年発売の初代 CIVIC のリヤクッションに日本初で適用した。現在はコールドキュア (HR) PUF が、高反発であるために薄肉化できることと、製造エネルギーが少ないことから主流となっている。

シートのクッションを軽量化するには、PUF の密度を

低くすることが一般的であり、一部の軽自動車などのシートに使われているが、静的な性能である座り心地などを満たすことが課題である。一方、動的な性能である車の乗り心地向上の要求に対しては、高密度な PUF を用いて性能を満足させることで対応している。よって、低密度で高性能な PUF が求められている。

そこで、まず静的な座り心地において人間の官能評価と PUF の特性の関係を明らかにし、動的な特性のコントロール手法を含め、PUF が持つべき特性の開発方向性を定めた。次に PUF の特性の実現においては、ポリウレタン配合処方、F-S 特性など各種 PUF 特性値や、PUF のセル構造によってコントロールする開発手法を明確にした。

この開発手法により、軽量で高性能なシートクッション用 PUF を開発することができた。

*四輪 R&D センター

2. 静的性能の官能評価

静的性能である座り心地に関し、硬さ感、ぐらつき感、底付き感、ばね感の官能評価指標と PUF 特性値の関係を明らかにするため、各種ウレタン処方で広範囲な特性値のテストピース (TP) を作成し静的官能評価試験をおこなった。基本的な考え方を Fig. 1 に示す。

ここで Indentation Load Deflection (ILD) 硬度は、 $\phi 200$ の円盤で TP の厚さの 25%、65% まで押し込んだ時の、それぞれの荷重値である。つまり、25% ILD は初期のタッチを示し、65% ILD は安定して着座している時の硬さを示す。例えば Fig. 1 に示すように、25% と 65% の ILD 硬度がともに低い場合は過度に軟らかい特性を示し、ともに高い場合は過度に硬い特性となる。また、25% ILD 硬度が低く 65% ILD 硬度が高い場合は、初期タッチは柔らかいがストロークに対し荷重が急激に立ち上がることでぐらつきにくい特性となり、逆に 25% ILD 硬度が高く 65% ILD 硬度が低い場合は、初期タッチが硬いがストロークに対し荷重が立ち上がりにくく、ぐらつきやすくなる。

このように座り心地に関して、25% ILD 硬度と 65% ILD 硬度のバランスにおいて最適な特性領域があると考え、官能評価試験をおこなった。

2.1. 試験サンプル

試験用サンプルは、三井化学株式会社で作成したものを使用した。TP の寸法は、 $400 \times 400 \times 100$ mm とした。製法はハンド発泡とし、アルミ製発泡型を用いて 25% ILD 硬度を 180 N から 300 N にコントロールするために、ポリプロピレングリコール (PPG) の平均分子量 (M_w) を 4000 から 7000 の範囲で 4 種類の処方でイソシアネートインデックスと密度を可変した (Fig. 2)。

2.2. 官能評価試験方法

パネルは男女 20 名で体重は 45 kg から 95 kg である。実験参加者は公募と自由意志による参加とし、書面による

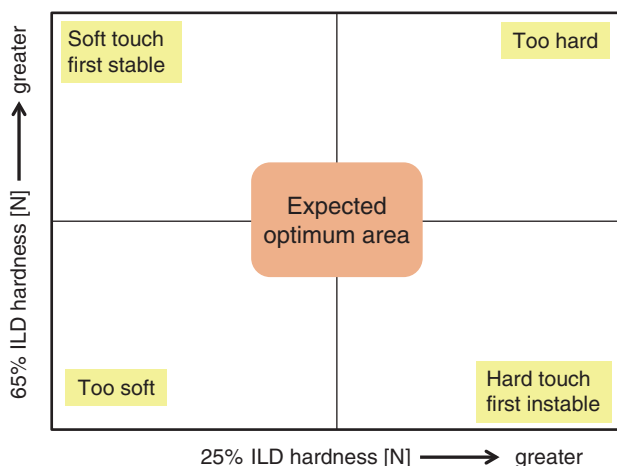


Fig. 1 Material characteristics of polyurethane

十分な説明の後、Fig. 3, Table 1 に示す試験方法で官能評価を実施した。また本試験は、弊社生命倫理委員会の承認を受けて実施した。

2.3. 官能評価試験結果

2.3.1. 硬さ感と ILD 硬度

一般的に 25% ILD 硬度が自動車用シートクッションパッドに PUF の硬さの指標として用いられている。今回、各種配合処方で PUF の特性を可変した PUF による官能評価による硬さ感と ILD 硬度の相関性を確認した。その結果、Fig. 4 のとおり 65% ILD 硬度の方が、より相関係数が高かった。

2.3.2. ぐらつき感とサグファクタ

ぐらつき感と、25% ILD 硬度と 65% ILD 硬度比であるサグファクタの関係を、TP で検証した結果を Fig. 5 に示

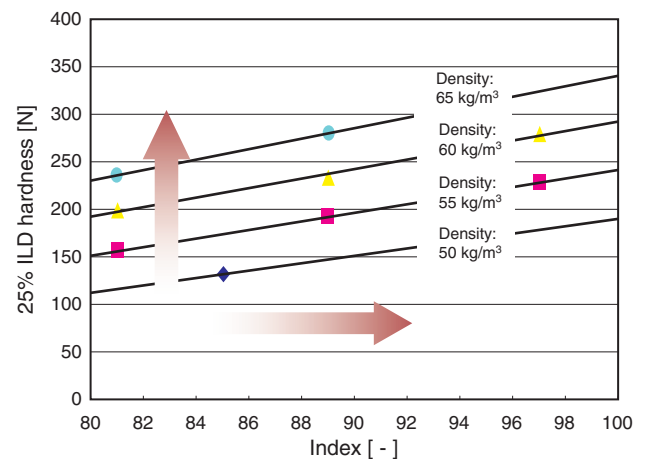


Fig. 2 Hardness controlled under different density and indexes

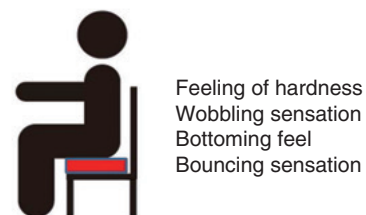


Fig. 3 Organoleptic evaluation method

Table 1 Procedures of organoleptic evaluation method

Feeling	Test method
Feeling of hardness	Sit still on a seat and make a sensory evaluation on a 6-point scale. ^{*1}
Wobbling sensation	Based on urethane test piece equivalent to the reference one, swing upper body back and forth and around to make a sensory evaluation on a 6-point scale.
Bottoming feel	Stand up from urethane test piece and sit down to make a sensory evaluation on a 5-point scale. ^{*1}
Bouncing sensation	

*1 (To correct feeling change with the passage of time, compare seating comfort with reference samples and other test piece.)

す。ぐらつき感とサグファクタには、きわめて高い相関性があることが確認できた。この結果は、25%ILD 硬度や65%ILD 硬度とぐらつき感を示す Fig. 6 よりも高い相関性があることを示している。

2.3.3. 底付き感とサグファクタ

底付き感とサグファクタの関係を Fig. 7 に示す。サグファクタが2.6 から3.0の領域に底付きを感じにくい領域があることがわかった。サグファクタが3.0を超える領域では、ウ

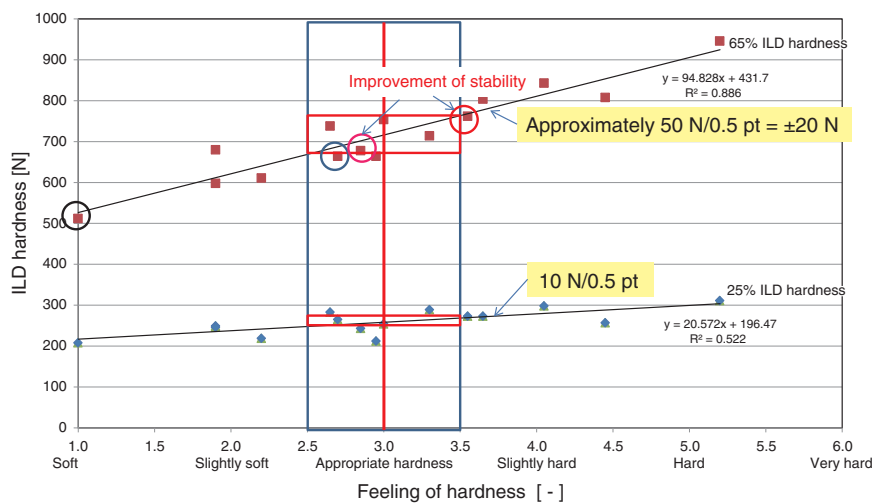


Fig. 4 Feeling of hardness and ILD hardness

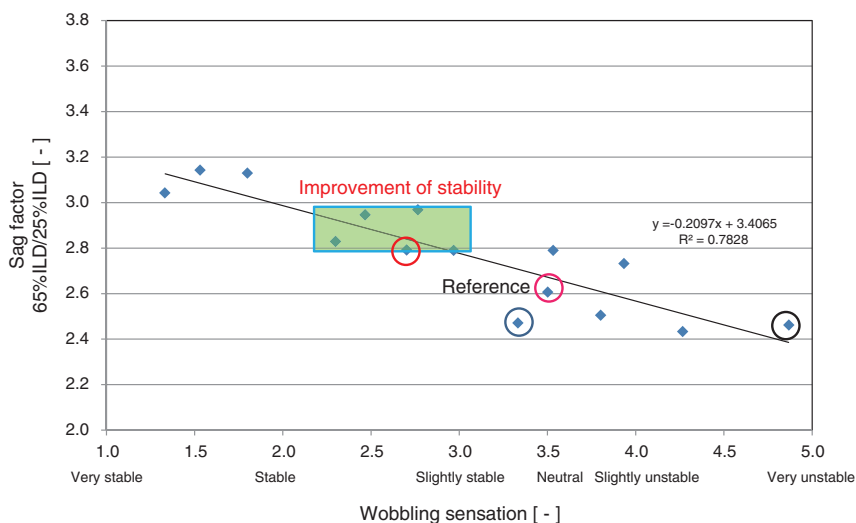


Fig. 5 Relationship between wobbling sensation and sag factor

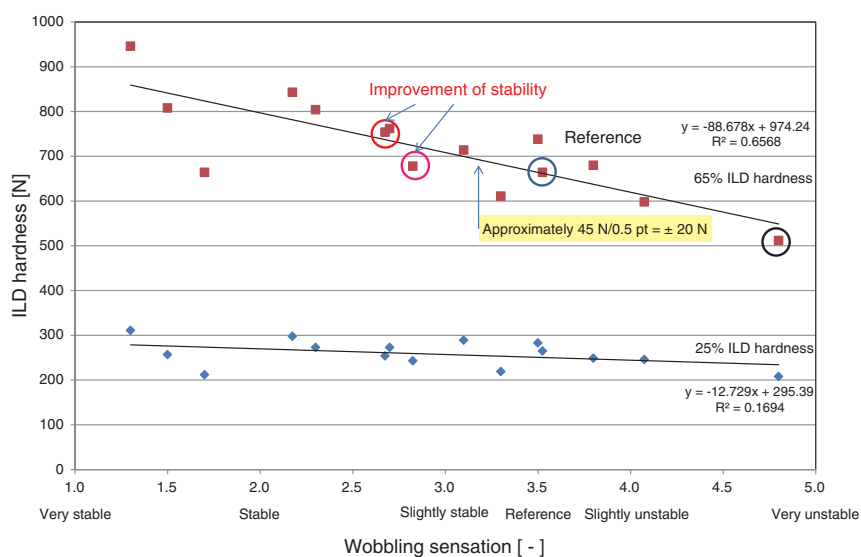


Fig. 6 Wobbling sensation and ILD hardness

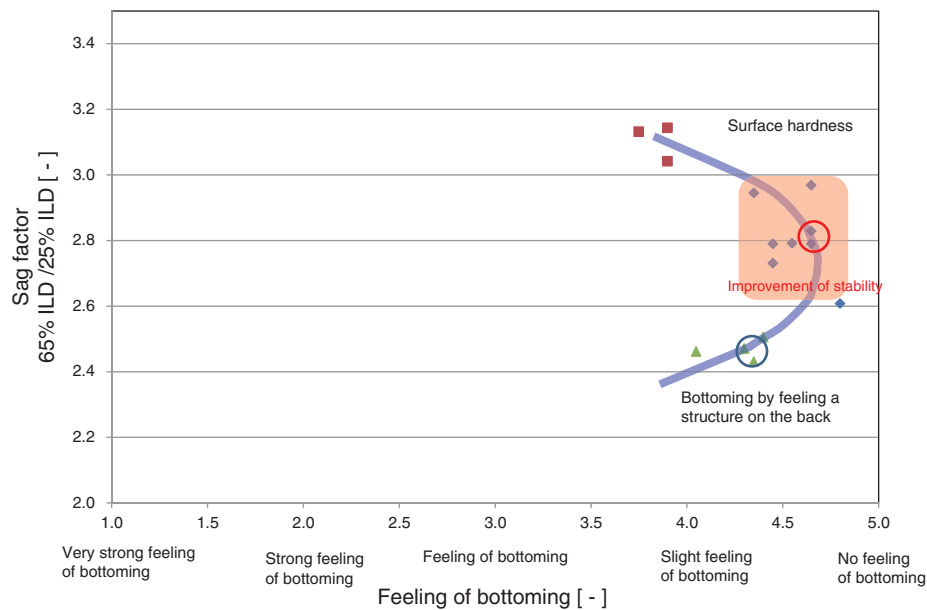


Fig. 7 Relationship between bottoming feel and sag factor

レタンがたわみ過程での荷重立ち上がりを底付きと感じる。サグファクタが2.6以下の領域では、たわみに対する荷重が立ち上がらず、荷重に対するストローク量が多くなり最後に急激に荷重が立ち上がるため、底付きと感じる。

2.3.4. ばね感とヒスロス率

ばね感とヒステリシスロス（ヒスロス）率との相関性を確認した（Fig. 8）。F-S特性の圧縮から除荷した際の赤の面積がヒスロス部分である。ヒスロス率が低いほどばね感を強く感じる傾向が見られた。ばね感は樹脂のヒスロスだけでなく、PUFのセルの通気抵抗により熱エネルギー変換され振動吸収することが知られている。同一条件で作成したTPを発泡直後につぶすクラッシング条件を可変し、強くクラッシングすることで、より通気性が良くなりばね感が高くなる。

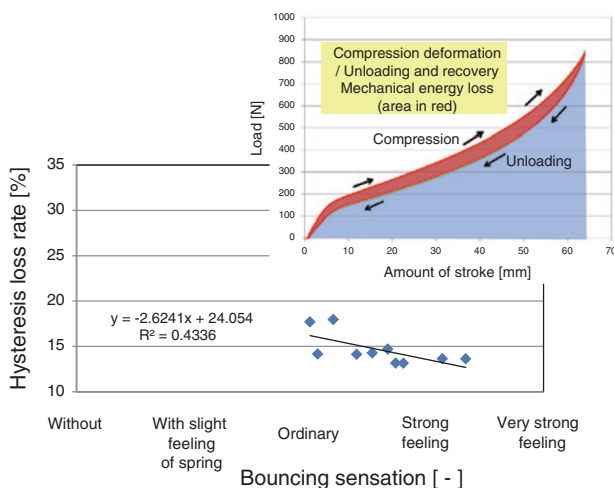
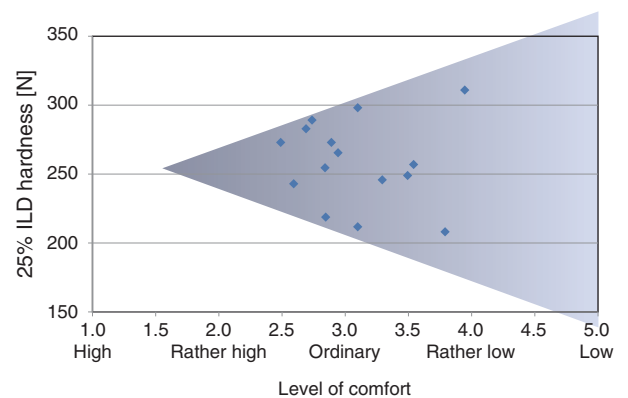


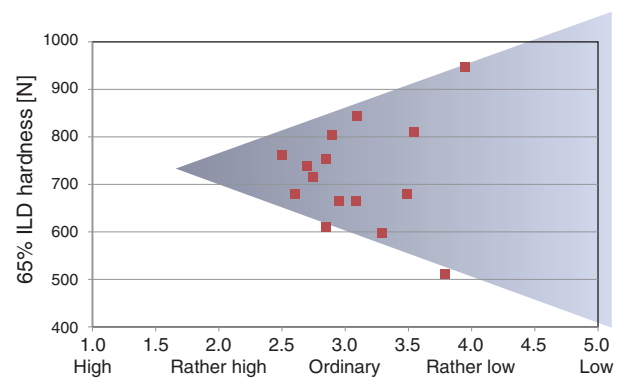
Fig. 8 Relationship between bouncing sensation and hysteresis loss rate

2.3.5. 硬さ感とぐらつき感から得られた快適硬度領域

官能評価の主要指標として25%ILD硬度と65%ILD硬度と静的着座での快不快について確認した。聞き取りの結果、快不快の判断は硬さ感とぐらつき感であった。Fig. 9に示すように、硬さ感とぐらつき感の観点から見ても、25%ILD硬度ではやや快適からやや不快な領域が同一硬度



(a) 25% ILD hardness [N]



(b) 65% ILD hardness [N]

Fig. 9 Hardness of polyurethane test piece and level of comfort

Table 2 Feelings and urethane foam characteristics

	Urethane compression Physical property					Ventilation volume
	25% ILD hardness	65% ILD hardness	Sag factor	Hysteresis loss rate	Impact resilience rate BR%	Ventilation volume
	25% compression Reaction force	65% compression Reaction force	Value obtained by dividing 65% ILD hardness by 25% ILD hardness	Rate of mechanical energy loss during 1 cycle of compression deformation and recovery	Height of an iron ball bouncing back when it is dropped	<Vibration absorption> Approximate energy loss due to ventilation resistance of urethane cell
Feeling of hardness	○	◎				
Wobbling sensation		◎	◎			
Bottoming feel	(○)	(○)	◎			
Bouncing sensation				◎	◎	◎
Comfort level	○	◎	◎			

○ : Good

◎ : So good

に多く混在するのに対し、65%ILD 硬度では硬度と快不快の切り分けが容易に可能となる結果が得られた。このことから、従来からの 25%ILD 硬度指標に加え 65%ILD 硬度が指標として有効なことがわかった。

2.4. 静的性能と PUF 特性のまとめ

静的な座り心地と PUF 特性の関係を Table 2 にまとめる。より再現性を高めるべく要求特性項目と最適な管理幅を明示しシート開発の効率化と量産品質安定を図る必要がある。

3. 動的性能評価

3.1. 動的性能と人体共振周波数

実車走行における車体からの入力加速度の計測結果を Fig. 10 に示す。1 Hz から 2 Hz、4 Hz から 8 Hz、10 Hz から 20 Hz にピークがある。車体からの入力はシートフレームからウレタンパッドを通じ人体各部に振動が伝わる。人

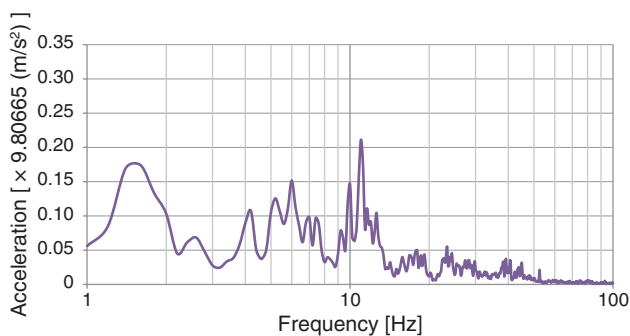


Fig. 10 Input acceleration from body (Attachment point of front seat)

体の感じ方は、2 Hz から 4 Hz は乗員の上下動によるヒョコヒョコ感、4 Hz から 8 Hz は腹部への圧迫感、8 Hz 以上は大腿部へのゴツゴツ、ブルブル、ビリビリ感として伝達される。

車体から伝わる振動を遮断し、人体の感じやすい不快な 4 Hz 以上の振動領域の振動を低減するとともに共振を低減することが車酔いや疲労を少なくする意味でも重要である。

3.2. 動的性能と PUF 特性

ウレタンパッド上に人が座った時、車体からの入力を受けた状態を簡易モデルで示す (Fig. 11)。共振周波数 f_0 [Hz] は、ばね定数により変わり、人が着座した状態でのばね定

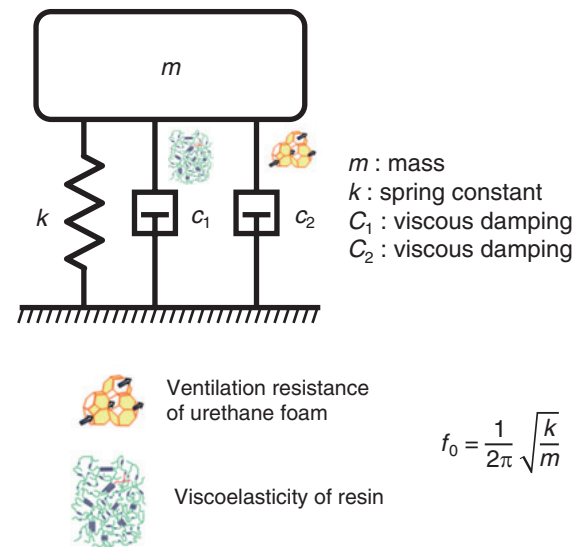


Fig. 11 Viscosity mass damper with spring model of PUF

数を下げることで共振周波数を Fig. 12 のように低周波にシフトさせることが可能である。

動的性能である乗り心地の観点では、PUF の共振周波数を低周波数域にシフトすることと共振倍率をより低くし全域で振動伝達を低減することが望まれる。

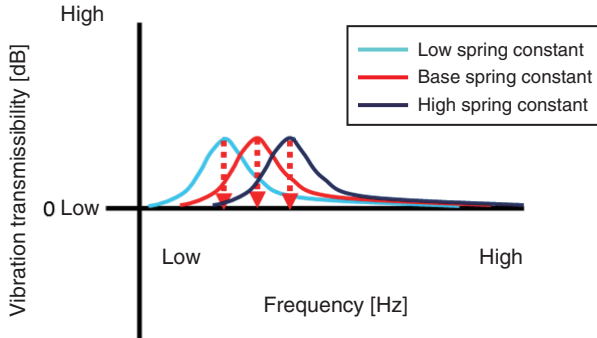


Fig. 12 Movement by spring rate of resonance frequency

4. 設計手法

車両用シートで重要な役割である、体の安定に影響の大きいぐらつき感に影響するサグファクタと振動遮断についてウレタン樹脂設計と PUF のセル構造の関係をまとめた。

4.1. ILD コントロール

硬さ感との相関が高い ILD については、イソシアネートインデックスと密度で 25%ILD を調整することが一般的

であるが、この手法では 25%ILD と 65%ILD の両方を望む値にコントロールすることは困難である。Fig. 1 で示す最適な特性域の硬度に設計する上で PPG の分子量およびポリマーポリオール (POP) の量が重要である。

4.2. サグファクタと PPG 分子量

ぐらつき感に影響が大きいサグファクタは Fig. 13 のようにポリオールの分子量の影響が大きいことが確認できた。ポリウレタン樹脂の模式図を Fig. 14 に示す。低分子量 PPG に比べ高分子量 PPG を用いたポリウレタン樹脂は PPG とアミノ基が相分離しやすく、イソシアネートと鎖延長剤で形成されるハードセグメントが大きくなるため、初期弾性が高い。また主に PPG で構成されるソフトセグメントは、高分子鎖が長く伸びやすい特性があり、PUF の特性として見ると高ストロークでも荷重が立ち上がりにくい F-S 特性になる。

4.3. 動的性能とぐらつき感の両立

ウレタンの樹脂設計の観点で見ると Fig. 13 のようにポリオールの成分である PPG の分子量による影響が大きく、高分子量 PPG を用いることで共振周波数を低周波にシフトさせることが可能なことがわかった。しかしながら単純に高分子量 PPG を用いてばね定数 k 値を低くすると Fig. 15 のように共振周波数が低周波にシフトするものの、共振倍率が高くなる。Fig. 13 に示すように、PPG の高分子量化によりサグファクタが低下しぐらつき感を感じやすくなるため、ぐらつき感とのバランスをとることが重要である。単純に高分子量 PPG 化した場合、連泡化により通気量が高くなり、共振倍率が高くなる。これについては、シリ

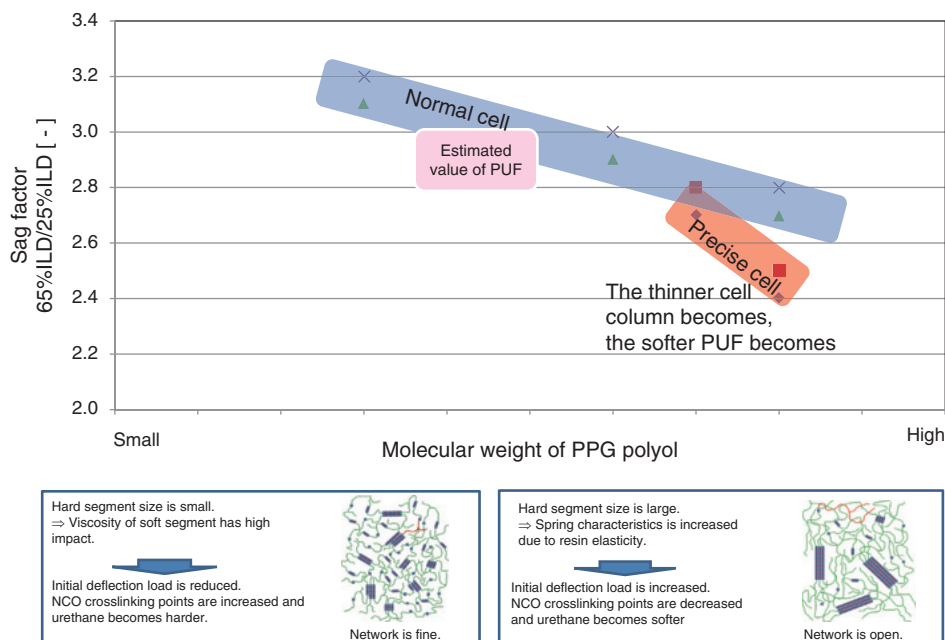


Fig. 13 Sag factor and molecular structure

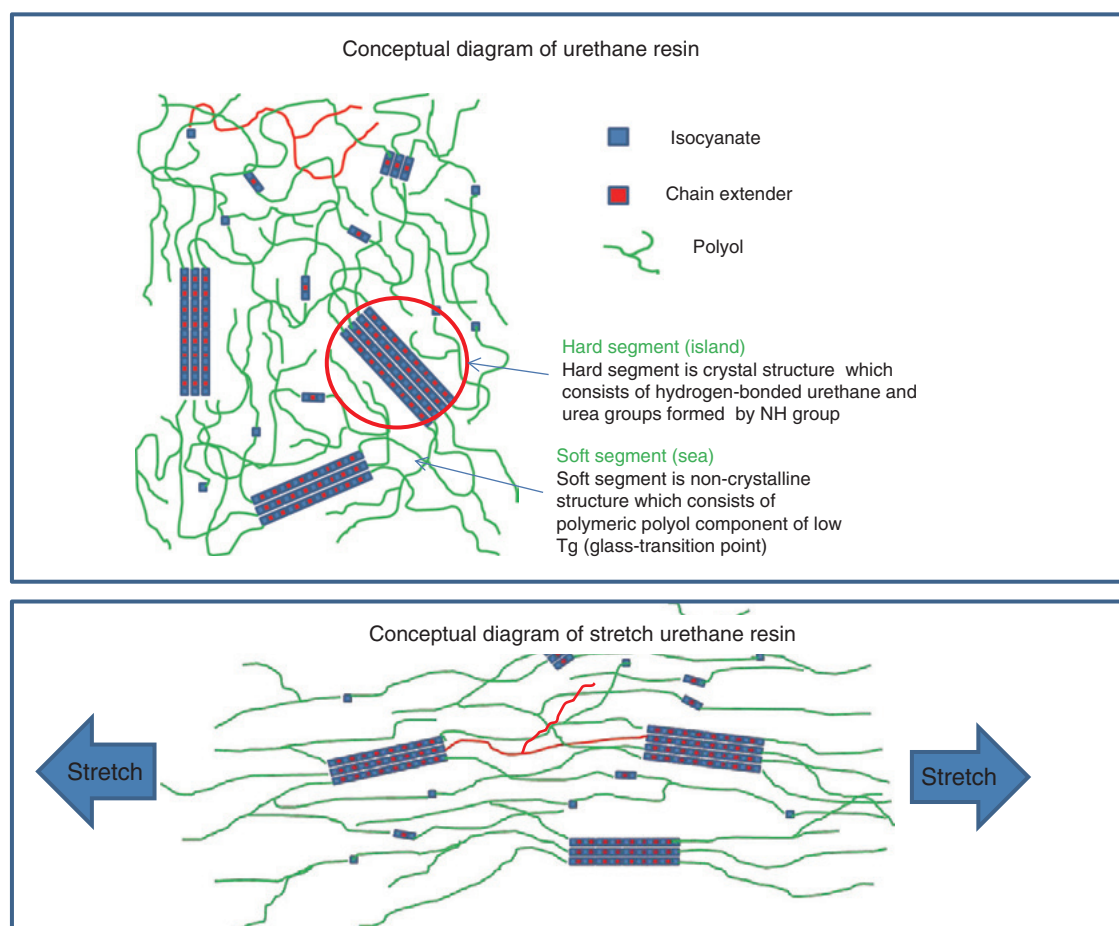


Fig. 14 Schematic diagrams of polyurethane

コン整泡剤の種類や量を最適化することで、緻密なセル構造で通気抵抗を増やし共振倍率を低減させた。通気量と共振倍率は、Fig. 16 の関係がありセルサイズやクラッシング条件の設定により最適な通気量にすることで共振倍率を低くし、共振周波数とのバランスをとることが可能になった。PPG と POP の配合比率変更でも同様な共振周波数の変化やサグファクタの変化が確認されている。

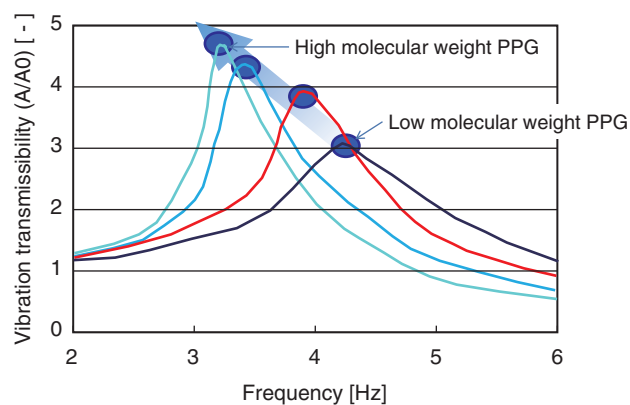


Fig. 15 Molecular weight and vibration transfer characteristics of PPG

4.4. PUF 設計手法のまとめ

今回の解析から静的には、ぐらつき感に大きな影響のあるサグファクタと PPG の分子量 (Fig. 13)、ヒスロス率と PPG の分子量 (Fig. 17) の相関性が確認された。従来の密度とイソシアネートインデックスによる 25%ILD 硬度管理に加え、快適な硬度指標である 65%ILD 硬度ぐらつき感指標のサグファクタに影響が大きい PPG の分子量を指定可能なヒスロス率を規定することが重要であることがわかった。

また、動的には、共振周波数とヒスロス率 (Fig. 18)、ヒスロス率と PPG の分子量 (Fig. 17) の高い相関性が確認され、望む共振周波数を得るために必要な PPG の分子量指

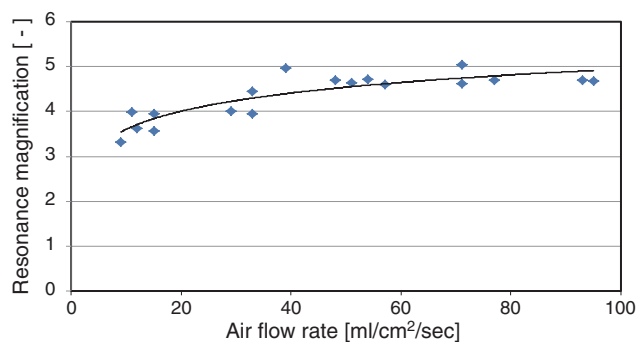


Fig. 16 Air flow rate and resonance magnification

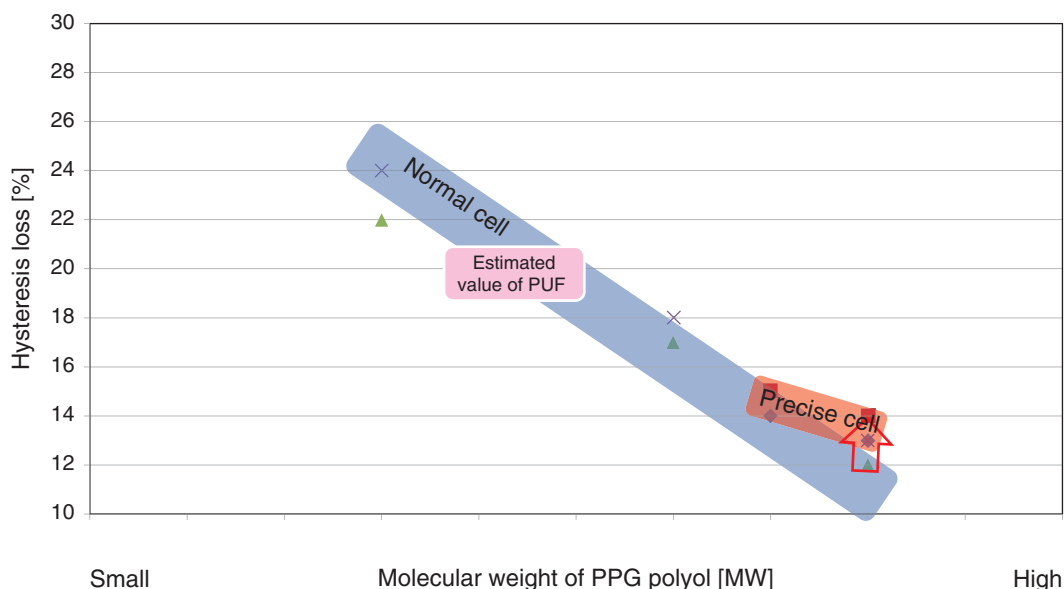


Fig. 17 Hysteresis loss rate and molecular structure of PPG

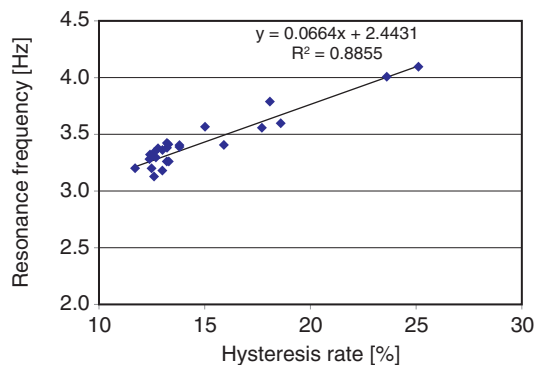


Fig. 18 Hysteresis loss rate and resonance frequency

定をヒスロス率で代替できることがわかった。ヒスロス率を指定することでポリオールの主原料である PPG の分子量の限定とウレタンの振動特性の共振周波数などの主要な性能を規定できることを示した。また通気量を規定することで共振倍率の予測が可能である。

5. 高性能シートの開発

5.1. ねらい

車両シート用 PUF 材料開発に際して以下の 4 点を主要なねらいとした新たな特性の PUF (開発 PUF) を開発した。

- (1) 適度な硬さ感
- (2) 優れた振動遮断性
- (3) 従来同等のぐらつき感特性
- (4) 軽量

5.2. 開発 PUF の特徴

開発 PUF 主要諸元を Table 3 に示す。開発 PUF は、量産の低密度ウレタンと同じ 63 kg/m³ のコア密度で軟らか

いながら、共振周波数が低く、全域で振動伝達率が低減されている。また 80 kg/m³ の高密度 PUF 並みの座り心地でぐらつき感が少なく適度なばね感を有しかつ振動遮断性にすぐれた特性を有している。

Fig. 19 に開発ウレタンと現行量産低密度ウレタンのマイクロ X 線 CT スキャンで撮影した画像を示す。開発ウレタンは量産低密度ウレタンに比べセルが細かく均一で、セル間の通気抵抗が大きい構造であった。

5.3. 開発 PUF 設計の考え方

開発 PUF のウレタン樹脂はヒスロス率が低くなる、低モノオールの高分子量 PPG を採用し、ぐらつき感と振動特性のバランスをとった。具体的には、高分子量 PPG による低ばね化で共振周波数を低周波数にシフトさせ、シリコン系整泡剤の種類と量の最適化でウレタンのセル構造を緻密化とクラッシング量の最適化により、エアダンパによる振動吸収性能を向上させることで共振倍率を低く抑え 6 Hz および 10 Hz 振動遮断性を向上させた。

Fig. 20 に代表的ウレタンの F-S 特性を示す。開発ウレタンは、車両クッション用ウレタンとして軟らかすぎず硬すぎずぐらつき感の少ない特性であり、欧州で用いられている MDI 系ウレタンに近く 65%ILD 硬度の値がほぼ一致していることが確認された。

同一 25%ILD 硬度で低分子量 PPG を用いてウレタン樹脂設計した場合、図中の赤紫色線で示すように F-S 特性の傾きが高く硬い PUF になり、底付きを感じやすい。一方、高分子量 PPG を用いた場合、図中青線で示すように F-S 特性の傾きが寝ているため、軟らかく、ぐらつき感を感じやすい PUF で振動遮断性が極めて高いが、実シートでぐらつき感が大きく対策が必要となった PUF の特性を示している。

Table 3 Specifications of flexible PUF (400×400×100 mm)

		Unit	Development	Reference existing mass- produced low repulsion urethane	Reference high density product urethane
Density	Dcore	kg/m ³	63	63	83
Hardness	25%ILD	N	250	245	250
	65%ILD	N	730	700	675
Hysteresis loss rate		%	<15	19	14
Repulsive elastic core		%	>65	65	68
Resonance frequency		Hz	3.3	3.6	3.3
Resonance magnification (A/A0)		-	2.6	2.6	2.8
6 Hz transmissibility (A/A0)		-	0.6	0.8	0.65
10 Hz transmissibility (A/A0)		-	0.2	0.3	0.28

Fig. 21 に厚さ 100 mm の PUF を用いた振動特性を示す。図中の赤線で示す開発品は、図中黒線で示す量産の振動吸収ウレタンよりも共振周波数が低く、かつ共振倍率も低い特性を示しており、人体が感じやすい 4 Hz から 8 Hz の領域での振動伝達率が低い。図中青線で示すぐらつき感対策前は、振動遮断性が極めて高いが、実シートでぐ

Table 4 Specifications of trial seat

Cushion frame	Pan frame
Cushion pad thickness (HP)	105 mm
PUF density (core)	63 kg/m ³
Hardness 25%ILD (Pad)	245 N
Hardness 65%ILD (Pad)	790 N

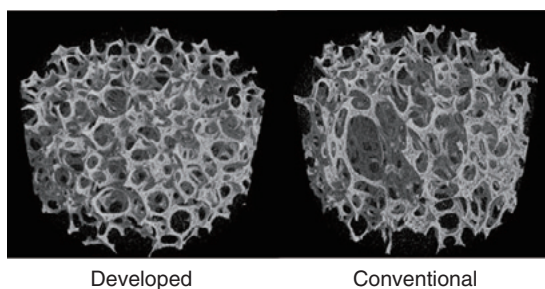
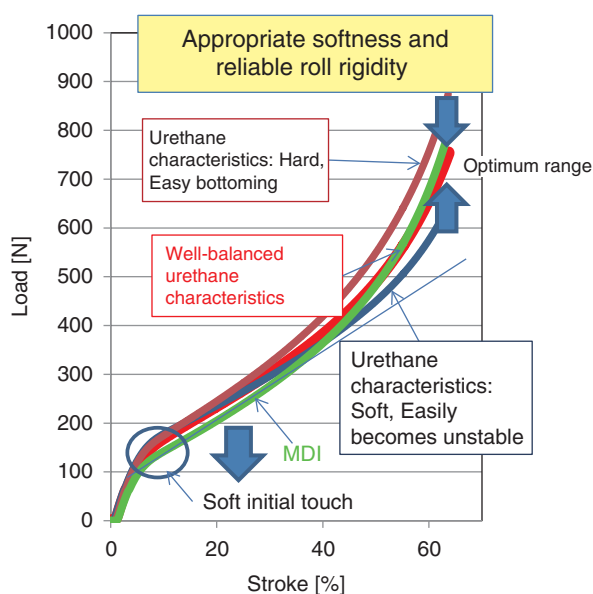

Fig. 19 X-ray Microtomography $\phi 3$ mm 3D View


Fig. 20 Compression load characteristics of flexible PUF 400×400×100 mm

らつき感が大きく対策が必要となった PUF の特性を示している。

5.4. 開発 PUF シートの官能評価

車両に Table 4 に示す諸元の実験シートを取り付け、テストコース走行でのエキスパートによる官能評価において Table 5 の結果を得た。PUF の PPG の分子量変更によるばねレートを上げる調整で低ストローク時の荷重を低くすることで柔らかさや振動減衰性の向上やロール剛性（ぐらつき感）の向上が認められ、バランスの良いシートができた。

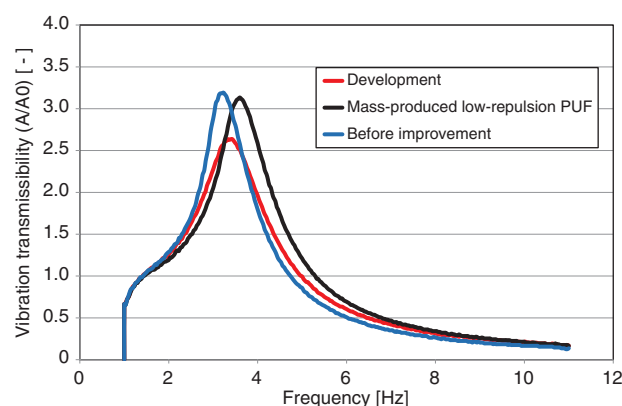


Fig. 21 Vibration transmissibility of PUF 400×400×100 mm

Table 5 Organoleptic evaluation of test track driving

	Structure with spring						Full pan structure			
	Mass-production foam		Foam with formulation to reduce wobbling sensation		High resilience and high-vibration absorption foam after reducing wobbling sensation		High resilience and high-vibration absorption foam after reducing wobbling sensation		High resilience and high-vibration absorption foam before reducing wobbling sensation - baseline	
Soft-touch feeling	- Felt	-0.5 ×	- Slight permanent set - Felt	-1 ×	- Felt	+1 ○	- Felt	+1 ○	- Baseline	Baseline
Damping feeling	- Choppy road (US) 80 - 100km/h large vertical motion - Vibration not absorbed when suspension fully stroked.	± 0	- Choppy road less vertical motion - Vibration absorbed when suspension fully stroked - Unsteadiness of spring hardly felt	+1 ○	- Choppy road less vertical motion - Vibration absorbed when suspension fully stroked - Slight stroke observed and sufficient thickness of foam felt	+1 ○	- Choppy road less vertical motion - Vibration absorbed when suspension fully stroked - Slight stroke observed and sufficient thickness of foam felt	+1 ○		Baseline
Rolling stiffness feeling	- Rolling observed when turning corner	± 0	- Movement of spring felt but rolling stiffness sufficient	+1 ○	- Good firmness	+1.5 ◎	- Good firmness	+1.5 ◎		Baseline
Shaky feeling	- Hardly felt	± 0	- Not felt other than at belly	-0.5 ×	- No	± 0	- No	± 0	- No	Baseline
Fluffy feeling	- Felt	-0.5 ×	- No	± 0	- No	± 0	- No	± 0	- No	Baseline
Rebound feeling	- Slightly felt	-0.5 ×	- No - Felt thinner than actual	-1 ×	- Firmness, felt thicker than actual	+0.5 ○	- Firmness, felt thicker than actual	+0.5 ○	- Greatly reduced elasticity	Baseline
Bottoming feeling	- No	+1 ○	- No - Slight vertical acceleration felt at suspension bottoming	+0.5 ○	- No - Right amount of stroke, a sense of fullness	+1.5 ◎	- No - Right amount of stroke, a sense of fullness	+1.5 ◎		Baseline

◎ : So good ○ : Good × : Poor

6. まとめ

車両用シートクッション用として優れた特性の PUF を開発した。高分子量 PPG の分子量と POP 配合比の最適領域を見いだすことで、軟らかく、姿勢保持性に優れ、ぐらつき感が少ない特性を得た。高分子量 PPG とシリコン整泡剤の種類および量の最適化とクラッシング条件の最適化を組み合わせることで、人体に不快な領域の振動遮断性を得た。

本開発 PUF は、パンフレームのみならず、ばねフレームのシートに用いても座り心地および乗り心地に優れている。

同時に本研究を通じて以下の知見が得られた。

- (1) 官能評価指標を再現する PUF 特性の重点管理項目は、密度、25%ILD 硬度、65%ILD 硬度、ヒスロス率、反発弾性率、通気度である。
- (2) PUF 特性は、PPG の分子量や POP との配合比の影響が大きく、荷重たわみを示すサグファクタ、ヒスロスに対する影響が特に大きい。
- (3) 振動遮断において共振周波数を PPG の高分子量化により低周波にシフトする。シリコン整泡剤の種類および量の最適化とクラッシング条件の最適化により共振倍率を低くすることと、人体に不快な領域の振動伝達率を低く抑える条件が存在する。
- (4) 座り心地および乗り心地に影響の大きいウレタン樹脂設計に必要な特性が明確になり PUF の再現性が向上した。

参考文献

- (1) <http://hdl.handle.net/10069/24818>
- (2) 自動車技術会編：3 章人間工学ベースの新技术，3.1 負荷低減，a. シートの疲労軽減技術，自動車の人間工

学技術 (2008)

- (3) 村田義幸，高木大輔，佐々木孝之，原田久一，豊田賢伯：高性能シートクッションパッドの開発，自動車技術，Vol.60, No.7, p.62-67(2006)
- (4) 野崎博路：自動車工学入門 第3章 乗り心地・振動，p.65-66(2005)

著者



石井 直人



松本 伴紀



青 励