

報 告

重回帰分析による液封エンジンマウント静ばね特性予測式の確立

竹尾 茂樹*¹

The Establishment of the Hydraulic Engine Mounting Static Spring Stiffness Estimate Formula by Multiple Regression Analysis

Shigeki Takeo*¹

要 旨

エンジンマウントの設計は、まず静ばね特性を満足するゴム本体の設計から始める。数形状のゴム本体を作り、解析し、それぞれの結果から形状の絞り込みを行い、絞り込んだ1形状の解析でゴム本体の形状を決定している。

ゴム本体の形状設計は、設計者のノウハウによるところが多く、ここを定量化する必要がある。また、絞り込み段階は、解析を繰り返し実施しているので多くの工数がかかっている。

そこで本報告は、今回SQCとCAEを活用し液封エンジンマウントゴム本体部の形状の因子を選び、それらの解析結果から精度の高い予測式を作成し、形状の絞り込み（繰り返し解析）に適用した事例について報告する。

Abstract

The design of the engine mounting is started from the design of main body of rubber shape that satisfies the static spring stiffness.

Several main body of rubber shape are made, they are analyzed, shape is selected from each result, we analyze by the one shape, and the main body of rubber part shape has been decided.

Because the main body of rubber shape strongly influences designer's know-how, it is necessary to quantify this shape design.

Moreover, it is analyzing repeatedly, many of design man-hours are occupied, and it is necessary to improve the stage of the selection.

Then, this report targeted the hydraulic engine mounting rubber part. The factor of the shape was chosen, SQC and CAE were used, and the estimate formula with high accuracy was made from the obtained analytical result.

We report on the estimate formula about the case where the use shape is easily selected.

*1 機能部品事業部 PV部品技術室

1. はじめに

エンジンマウント、ブッシュ等の防振ゴムの開発には、CAEを活用し、その計算結果に基づいて設計を実施し効率化を図って来ている。活用頻度も増加し効率化を図っている。

現状のCAEのニーズとしては、一つは予測できていない特性に対する解析方法を確立し、設計に活用、効率化を進めることであり、いま一つは繰り返し同じ解析を実施しているところを簡略化して繰り返し解析の短縮を図ることである。繰り返し解析に関しては、いままでの解析や実験結果の知見から特性に影響しそうな因子の部分的、定性的な傾向は知られている。

そこで今回、SQCとCAEを活用し液封エンジンマウントゴム本体部の形状の因子を選び、それらの解析結果から精度の高い予測式を作成し、形状の絞り込み（繰り返し解析）に適用した事例について報告する。

2. エンジンマウントとは

エンジンマウントは、数点でエンジンを支持、防振する機能をもつ製品である。（図1）

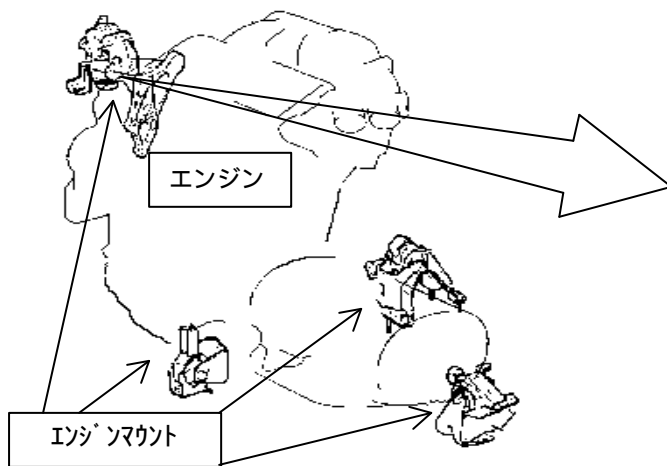


図1 エンジンマウント配置

エンジンマウントのゴム本体部の形状は、V字断面形状、長方形形状やおわん形状と要求される特性により種々のものが存在する。

図2に示す液封エンジンマウントには、要求される特性は上下、前後、左右方向の静ばね特性、動ばね特性、減衰特性など多岐にわたる。これらの特性のうちで静ばね特性は、エンジンマウントの設計での最初のステップで、この結果が後々の設計に大きな影響を与えてしまう。

3. 現状の把握

設計の流れを図3に示す。エンジン搭載位置、各方向のストッパクリアランスの設定、エンジンマウント自体のサイズに関する静ばね特性は、設計の最初のステップであり、その後の設計ステップに大きな影響を与えるのでこの設計はマウント自体の設計では重要な位置付けにある。

この静ばね特性の設計は2段階ある。第1段階は設計者のノウハウ等から形状を作成し、大よその目標を満足する形状を絞り込む段階で、静ばね特性の設計の約2/3を占め多くの工数を必要としている。

この段階は解析の繰り返しであるのでこれを予測式で代用できないかと考えて検討を実施した。

尚、第2段階は絞り込んだ1形状でFEM解析を実施し目標を満足していることを確認するものである。

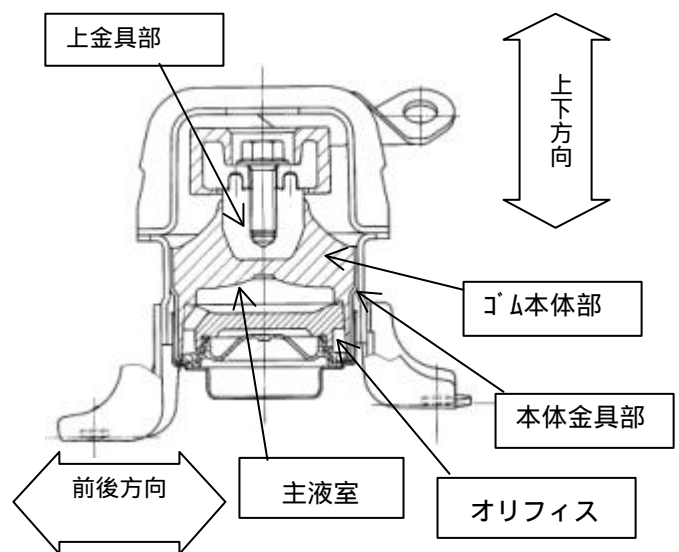


図2 液封エンジンマウント断面図

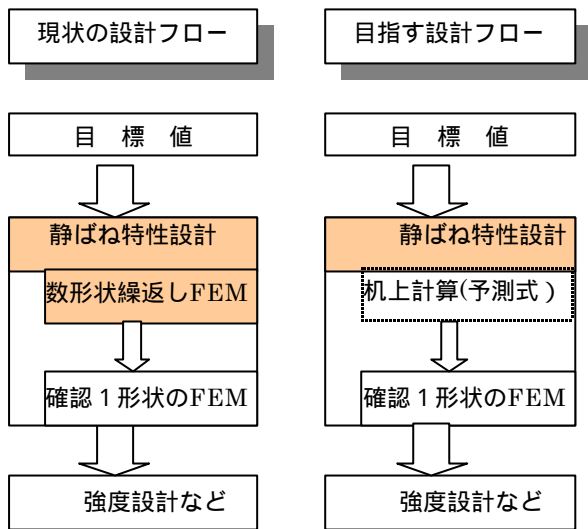


図3 設計のフロー

静ばね特性の設計の第1段階を解析での値から予測式から求めた値に置き換えようと考えた場合の予測式の精度が悪いと絞り込んだ形状で確認のための解析をしても目標を満足せず再度の設計と成ってしまう。このために予測式の精度は5%以内が必要と考えた。

予測式の精度を相関係数で判定することにして精度5%以内の相関係数(R)を求めた。

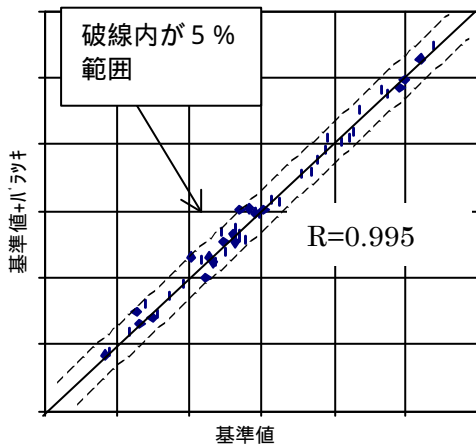


図4 5%以内のバラツキ時の相関係数

基準値に対して5%相当のバラツキを加味した値との相関係数を求めたその結果を図4に示す。相関係数は0.955である。求めた相関係数で予測式の精度を検討することにした。

通常おわんタイプと称する図2に示すマウントゴム本体形状に対して、静ばね特性への形状の因

子の影響について予測式を検討することにした。

ここでエンジンマウントの荷重、たわみの解析結果と実測結果の比較を図5に示す。実線は解析結果、破線は実測結果をしめす。静ばね特性は荷重、たわみの傾きを表す。解析結果と実測結果はよく一致しているので実際にものを作るのではなくFEM解析結果から予測式を作成することにした。

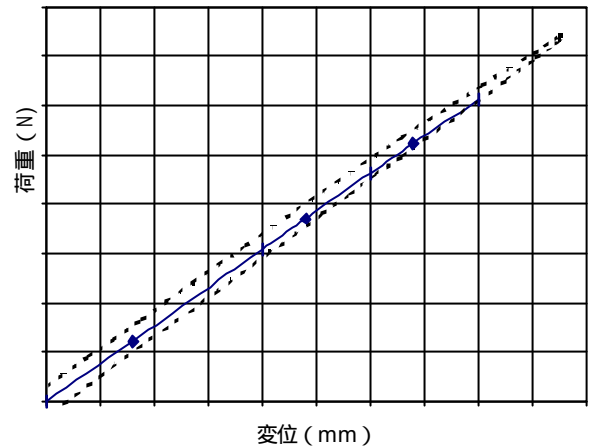


図5 荷重-変位の解析と実測の比較

エンジンマウントの上下方向、前後方向の静ばね特性に影響すると予測される因子を抽出し、それらの中から影響が大きいと予測される因子(○)すべてを取り上げ、予測式を検討することにした。

表1 因子の静ばね特性への影響

		上下方向	前後方向
因子		影響度	影響度
上金具部	金具半径		
	金具傾き		
	折れ比		
	フレットR		
ゴム本体部	ゴム幅		
	ゴム厚さ		
	断面傾き1		
	断面傾き2		
フレットR			
本体金具部	金具傾き		
	金具移動量		
	金具間位置の差		
	フレットR		

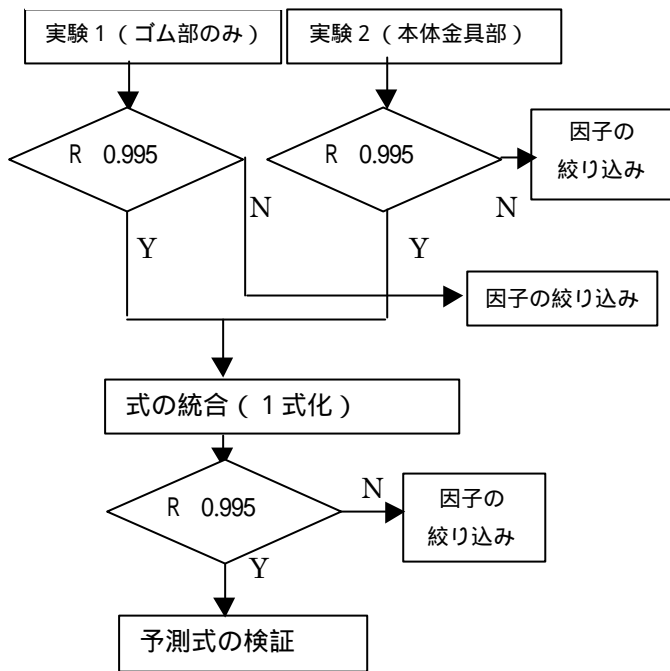
影響

○：影響大 ○：影響小

4. 予測式の検討

図6に検討ステップを示す。

【(1)上下方向の静ばね特性】



【(2)前後方向の静ばね特性】

同手順

図6 検討ステップ

4-1 上下方向の静ばね特性の検討

検討する因子数は10個もある．主効果を明確にするL18 (2¹ × 3⁷) を使用したい等から実験をマウントゴム本体部のみの基本形状を構成する7因子と本体金具の形状を特徴づける3因子を別々に実験することにした．

図7に実験形状、表2に実験水準を示す．7因子(AからG)をL₁₈に割り付け、FEM解析にて静ばね特性を計算しこれを実測値とした．

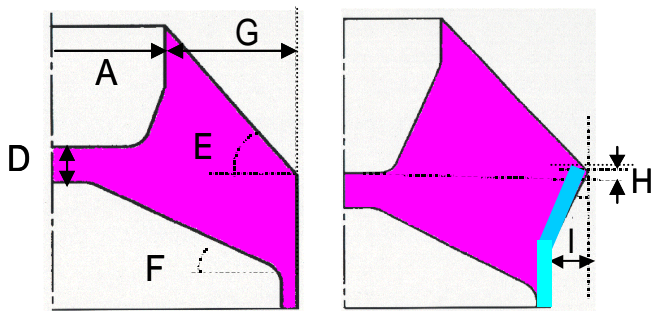


図7 実験1形状

実験2形状

表2 実験水準

	因子	水準1	水準2	水準3
実験1	A 金具半径	a-3	a	a+3
	B 金具傾き	b-30	b	b+30
	C 折れ比	c-30	c	c+30
	D ゴム厚さ	d-4	d	d+4
	E 断面傾き1	e-10	e	e+10
	F 断面傾き2	f-10	f	f+10
	G ゴム幅	g-5	g	g+5
実験2	H 金具間位置の差	h-10	h	h+10
	I 金具傾き	i-10	i	i+10
	J 金具移動量	j-4	j	j+4

a から j は値を示す。

実験1の結果について分散分析を実施したその結果について表3に示す。

表3 分散分析表

列、因子	S	f	プール	V	F	検定
1列、-	11	1	P	10.9		
2列、A	3066	2		1532.9	24.1	**
3列、B	292	2	P	146.0		
4列、C	163	2	P	81.7		
5列、D	1496	2		747.8	11.8	**
6列、E	655	2		327.5	5.2	*
7列、F	3544	2		1771.8	27.9	**
8列、G	104	2	P	52.1		
残りe	1	2	P	0.6		
e'	572	9		63.5		
T	9332	17				

表3で有意になった4因子の主効果の値を用いて18条件の推定値(予測値)を求めた．その値と実測値との関係を図8に示す．

実験計画法で求めた予測式の相関係数は0.969と高いが目標とした0.995には達しなかった．

検討ステップでは因子の絞り込みを実施したが因子の絞り込みで予測式の範囲を限定しなく実験結果を活かし精度を上げることを検討した．

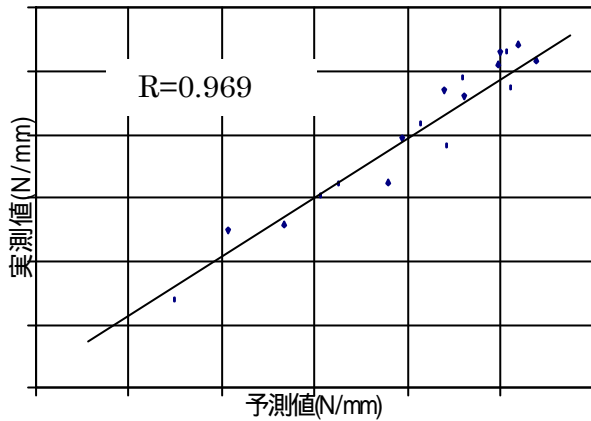


図8 予測値と実測値の関係 (実験計画法)

全因子について1次項, 2次項それに1次×1次項に分解して重回帰分析を用いて式化を検討することとした。

変数増減法による重回帰分析の結果を表4, 表5に示す。表4は自由度調整済み重相関係数が増加している間の説明変数取込み結果である。重相関係数は0.999となり, 目標を満足する。

表4 説明変数取込み結果 (実験1)

	追加変数	除去変数	調整済重相関係数
ステップ1	F1		0.583
ステップ2	A1		0.818
ステップ3	D1		0.916
ステップ4	E1		0.956
ステップ5	B1		0.978
ステップ6	C1		0.989
ステップ7	G1		0.993
ステップ8	A1F1		0.998
ステップ9	D1E1		0.999

記号の見方: (例)F1はF因子の1次項、

A1F1はAの1次項とFの1次項の交互作用を示す

得られた偏回帰係数の±符号と固有技術での静ばね特性の増減は同じ傾向である。交互作用項も納得できる。これらから精度の高い予測式はできたと考えた。

表5 解析結果 (実験1)

	偏回帰係数	t値	p値	検定
定数項	101.139	416.1	0	**
A1	6.550	50.7	0	**
B1	0.152	14.1	0	**
C1	-0.211	-13.1	0	**
D1	2.979	36.3	0	**
E1	1.747	21.5	0	**
F1	1.733	53.6	0	**
G1	0.734	10.5	0	**
A1F1	0.146	6.6	0.0002	**
D1E1	0.103	4.1	0.0033	**

実験2も同様な考えで重回帰分析を実施した。実験形状を図7に実験水準は表2に示す。A~Gの水準は2水準に固定し, H~Jの因子を L_{18} に割り付けFEM解析を行った。重回帰分析を実施した結果を表6, 表7に示す。

実験1と同様に精度の高い予測式を得ることができた。

表6 説明変数取込み結果 (実験2)

	追加変数	除去変数	調整済重相関係数
ステップ1	H1		0.8903
ステップ2	J1		0.9877
ステップ3	I1		0.9950
ステップ4	I1J1		0.9973
ステップ5	H1J1		0.9994
ステップ6	H1I1		0.9997

表7 解析結果 (実験2)

	偏回帰係数	t値	p値	検定
定数項	117.039	583.1	0	**
H1	-4.168	-80.6	0	**
I1	0.241	9.3	0	**
J1	2.573	41.9	0	**
I1J1	0.059	7.4	0	**
H1J1	-0.100	-6.3	0	**

実験 1、2 それぞれで精度の高い予測式が作成できた。そこで、全てのデータで再度重回帰分析を実施し一つの予測式にまとめ上げた。予測式で使われた説明変数を表 8 に、予測値と実測値の関係を図 9 に示す。予想した通り精度の高い予測式を得ることができた。

表 8 説明変数

	説明変数		説明変数
A1	金具半径	H1	金具間位置の差
B1	金具傾き	I1	金具傾き
C1	折れ比	J1	金具移動量
D1	ゴム厚さ	A1F1	} 上記、1次項 の交互作用
E1	断面傾き 1	D1E1	
F1	断面傾き 2	I1J1	
G1	ゴム幅	H1J1	

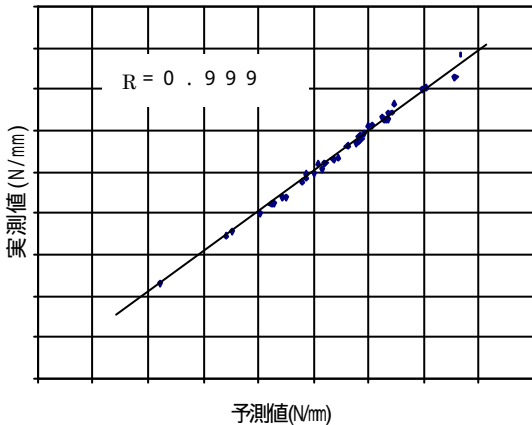


図 9 予測値と実測値（上下方向）

既存の類似形状にて、予測式の検証を実施した。FEM解析の結果と予測値の関係を図 10 に示す。予測値に対して実測値は ± 5 % 以内で予測できることが確認でき、予測式が活用できるものであると判断した。

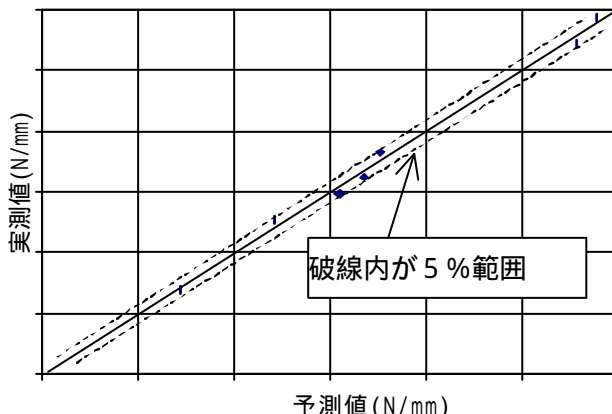


図 10 検証結果

4-2 前後方向静ばね特性の検討

前後方向の静ばね特性についても同様な手順で検討を実施した。図 11 に予測値と実測値の関係を示す。前後方向についても精度の高い予測式が得られた。

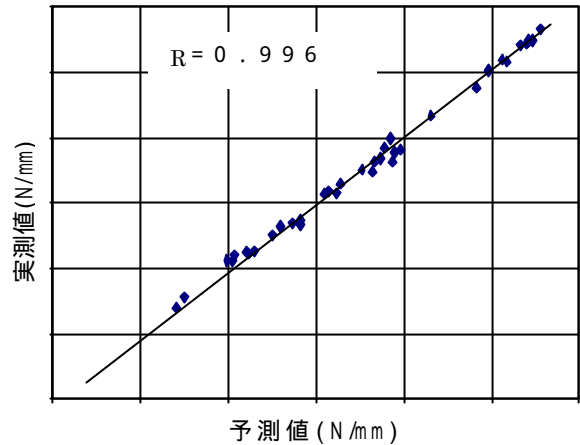


図 11 予測値と実測値（前後方向）

5. まとめ

L18の直交表を用いた静ばね特性のFEM解析データに対して、説明変数として1次項、2次項および1次×1次項を取り上げ、重回帰分析を行った。その結果、精度の高い予測式を作成することができた。従来数形状の繰り返し解析していたところを、予測式で置き換えることが可能となり設計ステップが簡略化された。このやり方を他の製品に展開して設計の簡略化を展開していく。

参考文献

- 1) 奥野、：多変量解析法、日科技連出版社（1985）
- 2) 田口：開発・設計段階の品質工学、日本規格協会（1988）
- 3) 柏村、白鳥、于：実験計画法による非線形問題の最適化、朝倉書店（1998）