ゴム配合設計における実験計画法、 回帰分析の利用

中 北 一 誠

How to Solve a Trade-off Problem Using the Design of Experiment with Orthogonal Array

Issei NAKAKITA (Momentive Performance Materials Japan LLC., Sun Mullion NBF 2-6-12 Minamihonmachi, Chuo-ku, Osaka 541-0054, JAPAN) Issei.nakakita@momentive.com

Designs of experiments with orthogonal array do not only reduce experimental numbers but also can solve trade-off problems. This paper explains how to use this type of DoE to solve trade-off by using model experiment of rubber compound. At first, experiment should be designed by orthogonal array (L8, L9, L12, L16, etc.) because many factors are needed to solve trade-off problem. Then, contribution % for all properties of each factors are important. The Trade-off problem will be solved if many factors can be used for the properties having higher % of contribution. Furthermore, a procedure of multiple regression analysis is explained. It is important to understand some phenomena.

Key Words : Design of Experiment, Orthogonal Array, L8, L9, L12, L16, Trade-off, Multiple Regression Analysis

1. は じ め に

実験計画法と聞くとおそらく皆さんのイメージは、活用した方がよいと思っているが計画や解析が面倒であったり、あるいはデータが直接見られないので信用できない、などといったマイナス面のイメージが多く、実際に日頃から頻繁に使っている方は少数ではないだろうか。しかし、今回は実験回数を減らすといったテクニックの話ではなく、現実的に性能を向上させる手法、具体的には二律背反を克服する理論的方法として実験計画法を用いた手法を紹介したい。

この二律背反とは世の多くのエンジニアの方々が取り組んでいる課題であろう。仮に、単一の機能を持った製品であったとしても、大きさや、コストといった制約が必ずあり、こちらを立てればこちらが立たない、といったバランスを求められることになる。単にバランスではなく、両方の性能を向上させることができれば、製品の性能が向上するはずである。

田口玄一のいわゆる「タグチメソッド」¹⁾の中で述べられている寄与率設計法は、まさに二律背反を克服する手法である。しかし、タグチメソッドというと、ロバストデザインといった、ノイズに対する安定性という概念は広く知れ渡っているが、寄与率設計法についてはあまり議論されてこなかったように思う。そこで今回、この寄与率設計法に

ついて紹介したい。

ところで筆者は実験計画法の数学的研究者ではない。長年ゴムメーカーに勤め、配合実験を行ってきた、実験計画法のユーザーである。そこで、ユーザーの立場から、どのようにしてこの“手法”を利用すればよいのかを、配合実験の具体例と共に説明する。一方、理論、数式の方は必要最小限にとどめている。ご専門の方から見れば不備や異論もあろうかと思う。様々なご指摘をお待ちする。

2. 配 合 実 験 (例題)

さて、本誌の読者はゴムの配合経験者が多いと思うので、ゴム配合の実験例をあげて説明してみたいと思う。表1にゴム配合の実験計画を示す。水準1が現行配合とする。表2に架空の配合実験とデータを示す。実験はランダム化して行われているので、実験番号と直交表の列番号とが異なっている。実験番号4が直交表の1列、すべての要因の水準が1になるため、現行配合のデータとなる。表3に各

中北 一誠；モメンティブパフォーマンスマテリアルズジャパン合同会社（大阪/中北阪市中央区南本町2-6-12サンマリオン17F）シランビジネスマーケティング所属アプリケーションデベロップメントマネージャー。1987年東京農工大学工学部材料システム工学科卒業。同年、横浜ゴム株式会社入社。2000年フレキシス社入社、2003年住友ゴム工業株式会社入社、2010年モメンティブ会に入社、現在に至る。専門は新規シランカップリング剤の開発・企画。

要因の水準ごとの特性値の平均値を示す．この表から要因効果図が作成できる．図1に未加硫粘度（ML1-4）の要因効果図を示す．次に各要因の特性値に対する寄与率を計算

表1 実験計画

水準	1	2
A SBR 種類	A タイプ	B タイプ
B BR 量 (phr)	30	20
C カーボン量 (phr)	50	60
D 液状ポリマー量 (phr)	0	10
E オイル量 (phr)	20	10
F 硫黄量 (phr)	2	2.5
G 促進剤量 (phr)	1	1.5

図1 要因効果図

表2 実験結果

実験番号		1	2	3	4	5	6	7	8
直交表, 列番号		7	2	4	1	5	6	8	3
配合									
SBR A		0	60	70	70	0	0	0	80
SBR B		80	0	0	0	70	60	70	0
BR		20	30	20	30	30	30	20	20
カーボン		50	50	60	50	60	60	50	60
オイル		10	10	10	20	10	20	20	20
液状ポリマー		0	10	10	0	0	10	10	0
WAX		2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD		2	2	2	2	2	2	2	2
ステアリン酸		2	2	2	2	2	2	2	2
酸化亜鉛		2	2	2	2	2	2	2	2
硫黄		2.5	2.5	2	2	2	2.5	2	2.5
促進剤		1	1.5	1	1	1.5	1	1.5	1.5
未加硫物性									
未加硫粘度	ML1 + 4	64.4	36.9	56	41.7	64.8	31.8	31.2	53.9
スコーチ	ML5UP	22.5	12.1	25.2	20.9	11.6	23.1	18.3	17.1
キュラスト	ML	0.33	0.22	0.36	0.23	0.32	0.21	0.17	0.32
キュラスト	T10	3.45	1.9	3.73	3.17	2.12	3.17	2.78	2.78
キュラスト	T95	12.87	7.4	12.73	10.88	11.6	10.15	10.5	11.85
キュラスト	MH	2.53	2.32	2.46	1.54	2.16	2.01	1.63	2.33
JIS Hardness		74	71	76	62	74	72	65	72
Tensile Test									
モジュラス	M300 (MPa)	9.4	8.8	9.6	5.4	8.6	7.8	4.8	8
破断強度	TB (MPa)	10.4	9.75	11.44	11.44	12.87	9.23	8.84	11.7
破断伸び	EB (%)	315	319	363	513	381	348	407	381
摩耗指数		100	95	94	120	131	97	96	80

(摩耗指数は値が大きい方が耐摩耗性能が良いことを示す)

表3 各要因の水準ごとの特性値の平均値

要因	A		B		C		D		E		F		G	
	SBR		BR		カーボン		液状ポリマー		オイル		硫黄		促進剤	
	A	B	30	20	50	60	0	10	20	10	2	2.5	1	1.5
未加硫物性														
ML1 + 4	47.13	48.05	43.80	51.38	43.55	51.63	56.20	38.98	39.65	55.53	48.43	46.75	48.48	46.70
ML5UP	18.80	18.88	16.91	20.77	18.43	19.24	18.02	19.65	19.83	17.84	18.99	18.68	22.89	14.78
ML	0.283	0.258	0.245	0.295	0.238	0.303	0.300	0.240	0.233	0.308	0.270	0.270	0.283	0.258
T10	2.895	2.88	2.59	3.185	2.825	2.95	2.88	2.895	2.975	2.8	2.95	2.825	3.38	2.395
T95	10.72	11.28	10.01	11.99	10.41	11.58	11.8	10.2	10.85	11.15	11.43	10.57	11.66	10.34
MH	2.16	2.08	2.01	2.24	2.00	2.24	2.14	2.11	1.88	2.37	1.95	2.30	2.14	2.11
JIS Hardness	70.3	71.3	69.8	71.8	68.0	73.5	70.5	71.0	67.8	73.8	69.3	72.3	71.0	70.5
Tensile Test														
M300 (MPa)	7.95	7.65	7.65	7.95	7.1	8.5	7.85	7.75	6.5	9.1	7.1	8.5	8.05	7.55
TB (MPa)	11.08	10.34	10.82	10.6	10.11	11.31	11.6	9.815	10.3	11.12	11.15	10.27	10.63	10.79
EB (%)	393.8	362.5	390.0	366.3	388.3	368.0	397.1	359.2	412.0	344.3	415.8	340.5	384.5	371.8
摩耗指数	97.3	106.0	110.8	92.5	102.8	100.5	107.8	95.5	98.3	105.0	110.3	93.0	102.8	100.5

表中のデータは有効数字の1桁下まで表示している

する．式 (11) にて寄与率の計算式を示す．²⁾

$$CF = (y_1 + y_2 + \cdots + y_8)^2 / 8 \quad (1)$$

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_8^2 - CF \quad (2)$$

$$S_A = ((y_1 + y_2 + y_3 + y_4)^2 + (y_5 + y_6 + y_7 + y_8)^2) / 4 - CF \quad (3)$$

$$S_B = ((y_1 + y_2 + y_5 + y_6)^2 + (y_3 + y_4 + y_7 + y_8)^2) / 4 - CF \quad (5)$$

$$S_C = ((y_1 + y_2 + y_7 + y_8)^2 + (y_3 + y_4 + y_5 + y_6)^2) / 4 - CF \quad (6)$$

$$S_D = ((y_1 + y_3 + y_5 + y_7)^2 + (y_2 + y_4 + y_6 + y_8)^2) / 4 - CF \quad (7)$$

$$S_E = ((y_1 + y_3 + y_6 + y_8)^2 + (y_2 + y_4 + y_5 + y_7)^2) / 4 - CF \quad (8)$$

$$S_F = ((y_1 + y_4 + y_5 + y_8)^2 + (y_2 + y_3 + y_6 + y_7)^2) / 4 - CF \quad (9)$$

$$S_G = ((y_1 + y_4 + y_6 + y_7)^2 + (y_2 + y_3 + y_5 + y_8)^2) / 4 - CF \quad (10)$$

$$\text{寄与率}_A(\%) = (S_A - f_A \times Se / f_e) / S_T \times 100 \quad (B \sim G \text{の寄与率も同様}) \quad (11)$$

ここで， $y_1 \sim y_8$ は列番号1～8のデータ

f_A は S_A の自由度で値は“1”

Se は誤差変動で $S_A \sim S_G$ の中で最も値が小さいものを誤差と仮定する．

f_e は Se の自由度で値は“1”

実際には実験計画法のソフトが販売されているので，それを使えばよい．市販のソフトでは各特性値毎に入力が必要で面倒なので，筆者は一般的な表計算ソフトの一つの行に計算式をすべて入力して，各行にコピーすることで入力の手間を省いている．（ご入用の方はお配りするので，連絡いただきたい．）実験計画法の手順として，表3に各要因の水準毎の特性値の平均値を，図1に要因効果図の例と

して未加硫粘度の図を示す．表4には計算された寄与率を一つの表にまとめたものを示す．これを寄与率表と呼ぶ．ここでひと工夫．配合要因の水準が1→2に変化した際に，特性値が増加する物についてプラスの符号を，逆に減少する物についてマイナスの符号をつけた．配合の方向性が見られる様にするためである．

3. 二律背反の両立方法

二律背反の例として，ゴムの硬さの向上と未加硫粘度の低減の両立について考えてみよう．考え方としては，寄与率の差を利用して二律背反を達成する．少しでも効果（寄与率）が大きい特性値に対して要因を使うことで，二つの特性値が向上することになる．理論的には，寄与率が1%でも大きい方の特性値に対して各要因を利用することで，最大の二律背反が実現する．実際には，寄与率が比較的大きい要因のみを用いて設計するのがよい．その理由はまず，寄与率も誤差を含んでいるので小さい場合は再現性が少ないこと，また，改善したい特性値はその他にもあるだろうから，全ての要因をこの2つの特性値のためだけに使うことは現実的ではないからである．

表4を見ると，要因D（液状ポリマー）は，未加硫粘度（ML1 + 4）に対する寄与率が-44%と大きい，硬さに対する寄与率は0%と小さい．つまり，液状ゴムを増量すると未加硫粘度は大きく変化するが，硬さはほとんど変化しないことになる．ここで，未加硫粘度に対する寄与率の符号がマイナスなので，液状ゴムを増量するとML1 + 4は減少することになる．つまり，液状ゴムの増量により，ゴム硬さと未加硫粘度の二律背反が克服できることになる．一方，要因E（オイル）は未加硫粘度に対する寄与率が37%と大きい，硬さに対する寄与率も44%と大きく，どちらの特性値に対しても寄与率が高いが，符号が同じで差が少ない．つまり，硬さを向上させようとオイルを減らせば（水準1→2）未加硫粘度は上昇（望ましくない方向に変化）することになり，二律背反の解決に寄与しない．

表4 寄与率表

寄与率 (%)		A	B	C	D	E	F	G
		SBR	BR	カーボン	液状ポリマー	オイル	硫黄	促進剤
水準 1		A	30	50	0	20	2	1
水準 2		B	20	60	10	10	2.5	1.5
未加硫粘度	ML1 + 4	0	8	9	- 44	37	0	0
スコーチ	ML5UP	0	17	1	3	- 5	0	- 75
キュラスト	ML	- 4	15	25	- 21	33	0	- 4
キュラスト	T10	0	26	1	0	- 2	- 1	- 70
キュラスト	T95	2	36	12	- 23	0	- 6	- 15
キュラスト	MH	- 1	11	12	0	50	26	0
JIS Hardness		1	5	37	0	44	11	0
モジュラス	M300 (MPa)	- 1	1	18	0	61	18	- 2
破断強度	TB (MPa)	- 8	0	21	- 47	9	- 11	0
破断伸び	EB (%)	- 6	- 3	- 2	- 9	- 32	- 40	0
摩耗指数		8	- 36	0	- 16	4	- 32	0

また，本例題では要因C（カーボン）も寄与率の差が大きかった．カーボン増にて硬さが上昇する（寄与率37%）．未加硫粘度も上昇するが，寄与率が小さく（9%）少しの粘度上昇で済む．この場合，カーボンという因子は寄与率のより大きい，硬さという特性値の向上に用いる方が有利である．未加硫粘度は上昇という望ましくない方向に向かうが，寄与率が小さいため，上昇は大きくはなく，全体から見れば二律背反が克服されたことになる．

4. 実際の配合設計例

実際の配合設計は三律背反，四律背反，いやもっと多くの特性値を両立させてゆくバランスである．この複雑な問題の解が寄与率表から導き出せる．優先順位の高い特性値から，寄与率の大きい要因を使って，特性値を満足させる様に値を決めて行けばよい．表4の寄与率表につけた符号はここで威力を発揮する．優先順位の高い特性値に対して望ましい方向の配合変更が他の特性値に対して，望ましい方向なのか，望ましくない方向なのかが一目でわかるため，簡単にバランス（最適化）をとることができる．実際にもう少し複雑な例を考えてみよう．

例題

現行配合（表2の実験番号4）の硬さは62であるが，向上させたい．目標値65以上とする．未加硫粘度は，現行41.7であるが，目標45以下．摩耗は現行120であるが，10%の向上，目標値は132以上とする．破断強度，伸びは現行以上を目指す．優先順位としては硬さと未加硫粘度，次に摩耗，破断強度と伸びとする．

そこで，寄与率表を見て硬さの向上を目指す．硬さに対する寄与率が高い要因とその方向性は，E：オイル減，C：カーボン増，F：硫黄増．ただし，寄与率表の符号から，E：オイル減は未加硫粘度の上昇，F：硫黄増は摩耗の低下を招くことがわかる．未加硫粘度の上昇に対してはD：液状ポリマー増の寄与率が十分に高いことから，両立ができそうである．しかし，F：硫黄増は硬さに対する寄与率が11%なのに対して，摩耗に対する寄与率が-32%もあるので，摩耗の悪化が大きいこともわかる．摩耗の向上も今回の目的なので，硫黄量はなるべく増量しない方向，という方針が決められる．摩耗に対してはB：BR増量の効果が高い．まとめると次のような方針となる．B：BR増，C：カーボン増，D：液状ポリマー増，E：オイル減そしてF：硫黄は硬さと摩耗のレベルを見て，達成困難な方に使う．

次に目標値をどうやって達成してゆくかについて説明する．要因の水準が，「配合 phr」など数字で表すことのできる場合，第一水準と第二水準の特性値で1次式を作って，希望の「phr」の時の推定値を計算することができる．こう聞くと難しく感じるかもしれないが，実際には足し算，

引き算の単純式でことが足りる．表3の各要因の水準ごとの特性値の平均値を利用する．例えば，BRを5 phr増量した際の未加硫粘度（ML1+4）の変化は以下になる．

$$\begin{aligned} \text{BR 変量による変化量} &= (\text{BR 30 phr の場合の特性値} - \text{BR 20 phr の場合の特性値}) / (\text{実験による BR の変量幅 phr}) \times (\text{BR の増加量 phr}) \\ &= (43.80 - 51.38) / 10 \times 5 \\ &= -3.79 \end{aligned} \quad (12)$$

同様にカーボン5 phr増，液状ポリマー5 phr増，オイル5 phr減も計算して，標準配合のML1+4値にこれらの変化を加えれば，配合案1の物性予想値が求められる．未加硫粘度（ML1+4）の場合は以下になる．

$$\begin{aligned} &41.7 + (43.80 - 51.38) / 10 \times 5 + (51.63 - 43.55) / 10 \times 5 + (38.98 - 56.20) / 10 \times 5 + (39.65 - 55.53) / 10 \times (-5) \\ &= 41.3 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで，オイルの場合，水準1→2で20→10 phrと減量している事と，配合案1は標準配合から減量しているため，符号に注意したい．すべての特性値に関して同様の計算をすれば配合案1の予想物性が求められる．表5に「配合案1」の予想物性を示す．表5には「現行配合」と目標値も同時に示した．未加硫粘度，硬さ，破断強度は目標値を満足したが，伸び，摩耗は目標を下回った．特に伸びが目標値から遠い．そこで，再度寄与率表（表4）をみて方針を考える．破断伸びの寄与率を見ると，今回変量した要因の中では，オイル（要因E）の寄与率が-32%と大きい．オイルを減量したため，破断伸びが低下したことがわかる．液状ポリマー増量も伸びの低下方向である．ちなみにBR（要因B）とカーボン（要因C）は寄与率が小さいので，議論から省く．しかし，よく見ると伸びの寄与率は硫黄（要因F）が-40%と最も高いことから，硫黄減によって伸びの向上が期待できる．また，硫黄の摩耗への寄与率も-32%と高く，硫黄減によって摩耗が向上する．そこで，配合案2では配合案1から，硫黄を減量させる事にする．0.35 phr減量すると，伸びが現行以上となり，摩耗も向上，全ての目標を達成できるため，配合案2を次回の試作候補とする．ただし，これは推定値なので，確認実験として，配合案2を混合してみて，効果を確認することが大切である．

5. 寄与率設計のポイント

さて，この様に有効そうな寄与率設計であるが，運用に

表5 推定値の計算

			目 標	現行 配 合	配 合 案 1	配 合 案 2
配合				4		
SBR A				70	70	70
SBR B						
BR				30	35	35
カーボン				50	55	55
オイル				20	15	15
液状ポリマー					5	5
WAX				2	2	2
6PPD				2	2	2
ステアリン酸				2	2	2
酸化亜鉛				2	2	2
硫黄				2	2	1.65
促進剤				1	1	1
未加硫物性						
未加硫粘度	ML1 + 4	45 以下		41.7	41.3	42.4
スコーチ	ML5UP			20.9	19.2	19.4
キュラスト	ML			0.2	0.2	0.2
キュラスト	T10			3.2	2.9	2.9
キュラスト	T95			10.9	9.8	10.4
キュラスト	MH			1.5	1.8	1.5
JIS Hardness			65 以上	62	67	65
Tensile Test						
モジュラス	M300 (MPa)			5.4	7.2	6.2
破断強度	TB (MPa)	現行以上		11.4	11.7	12.3
破断伸び	EB (%)	現行以上		513	461	514
摩耗指数			132 以上	120	125	137

はいくつかのポイントがある。実験には直交実験を用い、すべての列に要因を割り付けるのが良い。先にも述べたが、二律背反を高いレベルで達成するためには、パラメータの数が多いほど良い。また、実際の配合設計では達成しなければならない特性値の数も多いことから、ますます要因数が多くなると達成困難となる。

次に、検定は不要である。実験計画法では一般的に誤差項を割り付けて、検定（主にF検定）することが一般的である。しかし、実験計画法を何かを設計することに用いる場合、検定しないことをお勧めする。その理由は無駄であるから。もし、検定結果が有意にならなかった場合、皆さんはどうするだろうか？ 実験データをすべて捨ててしまって、もう一度実験しなおすのだろうか？ 多くの場合、費用も時間も切り詰めている状況で実験している。たとえ有意とならなかったパラメータでも、薬をもすがる思いで、より性能の向上する方向で設計してテストしてみるのではないだろうか。それで問題ないと思う。決して間違った設計ではないはずである。とすれば検定結果が有意であろうが、有意でなかろうが、結果が変わらないことになり、やる意味は多くない。ただ、実験の精度の目安になるので、暇があったらやっておいても良い。多くのパラメータ（要因）が有意になる場合、実験自体の精度が高いことの証明となる。従って、直交実験への誤差項の割り付けは不要である。全ての列に配合実験をわりつけばよい。寄与率を求めるために誤差分散が必要であるが、分散が最も小さい要因を誤差分散と考えて計算するので十分であろう。

同様に交互作用の割り付けも不要である。田口玄一の「品質工学」¹⁾によれば、設計は効果の大きい“主効果”で行うことで、ノイズに強い設計ができる、とある。まったくそのとおりである。効果の小さい要因を使って、少しでも性能向上を目指すことは問題ないと思うが、効果の小さい要因のみを使って設計することは、安定性（ロバスト性）の意味から危険なことである。効果の小さい要因は不安定である。同様の考えから交互作用も同様に設計に用いるべきでない。交互作用とはある因子の効果が別の因子の影響で大きく変化するということである。言い換えれば非常に不安定な効果ということになる。このような効果を用いて設計すると、予想した性能が使用条件によって出の場合と出ない場合があり、不安定となるので、やめた方が良い。我々はラボ実験という、実際とは異なった製造方法で作られたサンプルを実際の商品とは異なった条件でテストしている。そのため、実際の商品が予想の性能を発揮するためには安定性の高い設計が必要となる。

直交実験において、交互作用を割り付けなくても交互作用の大きさを調べる方法はある。確認実験を行うことである。ある実験の結果をまとめて、確認実験（あるいは試作）を行った際に、予想値とかけ離れた結果になった場合、交互作用（もしくは見落としている要因の効果）が大きかったと判断できる。この場合、次の実験として交互作用を調べる実験ではなく、交互作用のない、大きな主効果を持つ要因を探す実験とすべきである。

6. 回 帰 分 析

直交実験は回帰分析用のデータとしては非常に有用である。回帰分析を行う場合、注意すべきことの一つが疑似相関であるが、直交実験のデータの場合、公平かつランダムなデータとなっているため、疑似相関が少ないからである。相関分析をお勧めする理由は、メカニズムを解析するのに有用だからである。各物性間の相関がクリアになると、何が起きているのかが考えやすい。直交実験を行ったのであればぜひ回帰分析も行うことをお勧めする。実際に例題を使って回帰分析を行ってみよう。表6にすべての特性値間の相関係数を示す。一般的な表計算ソフトであればこのレベルの回帰分析ツールがついている。いろいろな見方ができると思うが、今回は摩耗のメカニズム解明を考えてみたい。表を見ると、摩耗は破断強度との相関が最も強い。

本実験はL8直交表を使っているので、データ数が8個。重回帰分析を行うには不十分な数であるが、考え方を示すためにやや強引に重回帰分析もしてみる。摩耗と破断強度の関係図2に示す。式で表すと、1次回帰分析結果から、以下のようになる。

$$\text{摩耗} = 5.52 \times \text{破断強度} + 42.5 \quad (r = 0.47) \quad (14)$$

相関係数がやや低い．ここで，相関係数が低いということとは，摩耗という現象を破断強度ではある程度しか説明できていない，ということであるので，別のパラメータを加えるべきである．ではどんなパラメータを加えればよいのか？そこで，上式と摩耗との残差を計算してみる．残差とは上式で計算した推定値と実測値の差であり，図2のデータの点から相関式までの距離（差）を示す．残差は，摩耗に関して「破断強度で説明できない量」と言い換えることができるので，残差と他のパラメータの相関をみることで，第二変数を決めることができる．表7に，今回の残差を含めた相関係数を示す．一番下の行に“残差”を示すが，最も相関係数が高かったのがキュラストMHであった．

一般的な表計算ソフトでも重回帰分析のツールがついて

いる場合がある．解析結果を表8に示す．これから，摩耗が以下の重回帰式で表せることになる³⁾．

図2 残差について

表6 相関係数一覧

	ML1 + 4	ML5UP	ML	T10	T95	MH	Hardness	M300	TB	EB	摩耗
ML1 + 4	1.00										
ML5UP	- 0.04	1.00									
ML	0.92	0.16	1.00								
T10	0.14	0.98	0.32	1.00							
T95	0.72	0.53	0.73	0.69	1.00						
MH	0.63	0.02	0.75	0.08	0.28	1.00					
JIS Hardness	0.61	0.05	0.73	0.09	0.34	0.91	1.00				
M300 (MPa)	0.63	0.02	0.75	0.06	0.23	0.95	0.93	1.00			
TB (MPa)	0.77	- 0.23	0.73	- 0.06	0.49	0.24	0.29	0.33	1.00		
EB (%)	- 0.21	0.08	- 0.27	0.12	0.09	- 0.81	- 0.79	- 0.76	0.27	1.00	
摩耗指数	0.26	- 0.29	0.01	- 0.23	0.06	- 0.37	- 0.21	- 0.15	0.47	0.43	1.00

表7 相関係数一覧（残差付）

	ML1 + 4	ML5UP	ML	T10	T95	MH	Hs	M300	TB	EB	摩耗	残差
ML1 + 4	1.00											
ML5UP	- 0.04	1.00										
ML	0.92	0.16	1.00									
T10	0.14	0.98	0.32	1.00								
T95	0.72	0.53	0.73	0.69	1.00							
MH	0.63	0.02	0.75	0.08	0.28	1.00						
JIS Hardness	0.61	0.05	0.73	0.09	0.34	0.91	1.00					
M300 (MPa)	0.63	0.02	0.75	0.06	0.23	0.95	0.93	1.00				
TB (MPa)	0.77	- 0.23	0.73	- 0.06	0.49	0.24	0.29	0.33	1.00			
EB (%)	- 0.21	0.08	- 0.27	0.12	0.09	- 0.81	- 0.79	- 0.76	0.27	1.00		
摩耗指数	0.26	- 0.29	0.01	- 0.23	0.06	- 0.37	- 0.21	- 0.15	0.47	0.43	1.00	
残差	- 0.12	- 0.20	- 0.39	- 0.23	- 0.20	- 0.55	- 0.39	- 0.35	0.00	0.35	0.88	1.00

表8 重回帰分析結果

SUMMARY OUTPUT

Regression	Statistics
Multiple R	0.688658
R Square	0.47425
Adjusted R	0.26395
Standard E	13.85607
Observatio	8

ANOVA

	df	SS	MS	F	ignificance F
Regression	2	865.9216	432.9608	2.255113	0.200423
Residual	5	959.9534	191.9907		
Total	7	1825.875			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	74.36768	45.74985	1.625529	0.164978	- 43.236	191.9714	- 43.236	191.9714
TB (MPa)	6.987998	3.900149	1.791726	0.133169	- 3.03766	17.01365	- 3.03766	17.01365
MH	- 22.4095	14.53316	- 1.54196	0.183723	- 59.7682	14.94915	- 59.7682	14.94915

表9 重回帰分析結果 (INDEX)

SUMMARY OUTPUT	
Regression	Statistics
Multiple R	0.688658
R Square	0.47425
Adjusted R	0.26395
Standard E	13.63451
Observatio	8

ANOVA					
	df	SS	MS	F	ignificance F
Regression	2	838.4505	419.2253	2.255113	0.200423
Residual	5	929.4993	185.8999		
Total	7	1767.95			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	73.17853	45.0183	1.625529	0.164978	- 42.5447	188.9018	- 42.5447	188.9018
TB (MPa)	0.736361	0.410979	1.791726	0.133169	- 0.32009	1.792816	- 0.32009	1.792816
MH	- 0.46815	0.303605	- 1.54196	0.183723	- 1.24859	0.312296	- 1.24859	0.312296

$$\text{摩耗} = 7.00 \times \text{破断強度} - 22.4 \times \text{MH} + 74.4 \quad (r = 0.69) \quad (15)$$

本例題は架空のデータであるので、メカニズムを議論することはできないが、摩耗という現象を破断強度とキュラスト (MH) で説明できたことになる。例えば、破断強度は向上するほど摩耗は良くなるが、MHは低下するほどよい。力を逃がすようなメカニズムが摩耗に有利なのかもしれない。また、モジュラスでなく、MHに相関があったことで、摩耗の変形モード、あるいは歪率がMHに近いのかもしれない、という考察ができるかもしれない。ここで、もう一度工夫。この重回帰分析のすべてのデータを平均値を100としたINDEXにて分析しなおしてみる (表9)。

$$\text{摩耗} = 0.73 \times \text{破断強度} \times 0.47 \times \text{MH} + 73.18 \quad (r = 0.69) \quad (16)$$

仮にこの式の破断強度、とMHの今回の変動幅の“重み”が同じであるとすると、係数が寄与の比となる。寄与率%に、計算しなおすと以下の様である。

$$\text{破断強度の寄与率} = 0.73 / (0.73 + 0.47) \times 100 = 61\% \quad (17)$$

$$\text{MHの寄与率} = 0.47 / (0.73 + 0.47) \times 100 = 39\% \quad (18)$$

破断強度の方が摩耗に対する寄与率が高いことがわかる。物の設計をする場合は何の相関が高いかも重要であるが、どのパラメータの効果が大きいか、寄与率を考慮する必要がある。

7. ま と め

ゴムの配合実験から配合設計を行う際に、直交実験を用

いた実験を行い、各要因の寄与を見ることで、効率よく性能の両立・バランスが達成できることを説明した。また、直交実験を用いたデータは回帰分析に適している。回帰分析を行うことで、物理現象のメカニズム解明のヒントとなることも説明した。少し強引ではあったが、重回帰分析の進め方も説明した。日頃、配合実験を行って配合設計を行っている読者の方々の参考になれば幸いである。

今回は性能の向上をターゲットとして説明したが、特性値に「コスト」を入力すればコストと性能の両立も可能である。単価の高い配合剤は当然コストに対する寄与率が大きくなるが、性能とのバランスを寄与率という数字で表すことができる。安い配合剤の組み合わせで、高価な配合剤の性能を補完できる事がわかったり、高価な配合剤でも性能の向上に寄与していれば使うという判断も可能となった。日頃コストダウンに取り組んでいる方にも試していただきたい。

References

- 1) Taguchi, G.: "Hinshitsu Kogaku Koza 1 Kaihatsu Sekkei Dankai No Hinshitsu Kogaku", Nippon Kikaku Kyokai, Tokyo, Chapter 4, 5 and 6 (1988)
- 2) Taguchi, G.: "Jikken Keikakuhou Jo (3rd ed.)", Maruzen, Tokyo, Chapter 1 (1976)
- 3) Suga, T.: "Excel De Manabu Tahenryo Kaiseki Nyumon", Omu, Tokyo, Chapter 7 (2007)

日本語表記参考文献

- 1) 田口玄一：品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学，(財)日本規格協会，東京，第4章，第5章，第6章 (1988)
- 2) 田口玄一：実験計画法 上，第3版，丸善株式会社，東京，第1章 (1976)
- 3) 菅民郎：Excelで学ぶ多変量解析入門，オーム社，東京，第7章 (2007)