

ISSN 0386-8230

Quality

J S Q C



品質

Vol. 48, No. 1, 2018

JOURNAL OF THE JAPANESE SOCIETY FOR QUALITY CONTROL

調合ノイズと直交表ノイズの挙動比較と最適条件の差異[†]

森 輝雄^{*}/貞松伊鶴^{**}/富島 明^{***}/松浦 峻^{****}

Comparison of behaviors and difference of optimum conditions between compound and orthogonal array noises

^{*} Teruo MORI/^{**} Izuru SADAMATSU/^{***} Akira TOMISHIMA/
^{****} Shun MATSUURA

In parameter design, noise factors are often compounded to two combinations of the levels of noise factors that maximize and minimize the response, using the tendencies of the effects of noise factors on the response. Although this may enable a large reduction of the number of experimental runs, there exist some problems and risks. This report considers the following three problems: 1. Difference of optimum conditions by compound noises and orthogonal array noises. 2. Possibility of the equivalence of all SN ratios in compound noises. 3. Existence of response values using orthogonal array noises outside response values using compound noises. In this report, these problems are investigated through numerical examples using the design of the circuit of a temperature controller.

Key words: Compound noises, Orthogonal array, Parameter design, SN ratio

1. はじめに

パラメータ設計において、初期には、ばらつき低減のためのノイズ因子に、制御因子と同サイズの直交表が用いられた。次に実験数を削減するため代表的ノイズ因子に限定した小規模直交表が適用され、更に実験数を削減するためにノイズ因子を調合して正負の2条件(N_1 , N_2)で代替するようになった(田口・吉澤^[1])。

調合形式のノイズは、各ノイズ因子の応答に対する効果から、応答が最も小さくなる水準の組み合わせ

N_1 と応答が最も大きくなる水準の組み合わせ N_2 で構成される。各ノイズ因子の効果は、通常、実験基準となる初期条件あるいは現行条件に対し直交表を適用するか、または他因子を固定し逐次に水準を変更した実験を行うことで調べる。

近年、パラメータ設計の実施事例の約75%において2水準の調合ノイズが使用されていることが森、他^[2]で報告されている。

ノイズを調合することで大幅な実験回数の削減が期待されるが、一方で、いくつかの問題点が指摘されている。

その一つとして、 N_1 , N_2 の応答(y_1 , y_2)は、調合条件下では両端値であり、 $y_1 < y_2$ であるが、内側直交表での制御因子の水準組み合わせの変更によって両端値ではなくなることがあり、さらに応答反転($y_1 > y_2$)が生じることもある。Hou^[3]や松浦^[4]により制御因子(C)とノイズ因子(N)の交互作用(C×N)により応答反転が生じることが述べられており、実際のデータ例も多数ある。宮川^[5]表6.1、宮川^[6]表7.1、立林^[7]表4.4.3、田口・吉澤^[1]p.96、田口・横山^[8]p.118、杉山、

[†]平成29年3月28日 受付

平成29年6月7日 改訂

平成29年9月14日 採択(論文誌編集委員会)

^{*}森技術士事務所

連絡先: 426-0044 静岡県藤枝市大東町 871-3(自宅)

^{**}アルプス電気(株)

^{***}富島技術開発サポートセンター

^{****}慶應義塾大学 理工学部

他^[9]表1などである。

しかし他にも、調合ノイズの問題点が存在する。

まず、直交表ノイズと調合ノイズでは得られる最適条件が異なってしまうことがあり、例えば、Hou^[3]、Singh et al.^[10]、Wu and Hamada^[11]、松浦^[4]などで指摘されている。

また、直交表ノイズでは可能であるが、調合ノイズではSN比がどの制御因子の水準組み合わせでも同じ値になり、ばらつき低減ができない問題が存在する場合がある。

更に直交表ノイズの応答が調合ノイズのN₁、N₂の両端値の範囲外に出現する問題がある。

そこで、本報告では、ここで挙げた3つの問題点：

- 1：調合ノイズと直交表ノイズの最適条件の違い
- 2：調合ノイズのSN比が同じ値になる問題
- 3：調合ノイズの範囲外に出現する直交表ノイズの応答を取り上げ、これらについて具体例を通じて検証する。

2. 調合ノイズの問題点の検証

2.1 直交表ノイズと調合ノイズの最適条件の違い

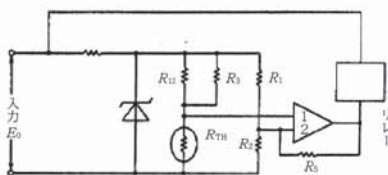
Hou^[3]、Singh et al.^[10]、松浦^[4]などで、簡単な応答モデルの想定のもと、C×Nの交互作用により、直交表ノイズと調合ノイズではしばしば異なった最適条件が選択されることが示されている。以下では、実解析事例を用いて検証を進める。

2.1.1 温度調節器の回路による検証事例

富島^[12]によって報告された温度調節器の回路の設計を取り上げる。温度調節器(図・1)において、リレーがオンであるときの抵抗xおよびリレーがオフであるときの抵抗yは、素子R₁、R₂、R₃、R₅、R₁₂、Ez、E₀の関数としてそれぞれ(1)式、(2)式で与えられる。

$$x = \frac{R_3 R_{12}}{R_3 + R_{12}} \frac{R_2 (Ez R_5 + E_0 R_1)}{Ez (R_1 R_2 + R_1 R_5 + R_2 R_5) - R_2 (Ez R_5 + E_0 R_1)} \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{R_1} \frac{R_3 R_{12}}{R_3 + R_{12}} \frac{R_2 R_5}{R_2 + R_5} \quad (2)$$



図・1 温度調節器(田口・吉澤 [1] p. 238 より引用)

現在の素子の中心値定数をR₁：3.9 kΩ、R₂：7.5 kΩ、R₃：1.0 kΩ、R₅：360 kΩ、R₁₂：3.3 kΩ、Ez：5.3 V、E₀：10.1 Vとし、抵抗Rのノイズを±10%、Ezのノイズを±0.3 V、E₀のノイズを±0.5 Vとする。

抵抗Rを制御因子とし、第1水準を中心値の半分、第3水準を中心値の倍としL₁₈の4-8列に割り付けて内側直交表とする。ノイズRは4-8列、ノイズE₀とノイズEzを2、3列とし外側直交表L₁₈に割り付ける。内側と外側の直交表を直積とした結果を表・1に示す。ベンチマーク(BM)として基準条件(全て第2水準)の結果も合わせて示した。

表・1 x(オン)：直交表ノイズの結果

内/外	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.691	0.770	0.850	0.864	0.889	0.580	0.756	0.627	0.946
2	1.382	1.541	1.700	1.729	1.778	1.161	1.513	1.254	1.891
3	2.765	3.082	3.401	3.457	3.556	2.322	3.026	2.508	3.782
4	3.051	3.394	3.739	3.800	3.995	2.531	3.348	2.771	4.157
5	3.530	3.967	4.413	4.472	4.322	3.068	3.809	3.181	4.937
6	0.198	0.220	0.243	0.244	0.260	0.165	0.216	0.179	0.270
7	1.369	1.524	1.680	1.715	1.757	1.150	1.501	1.243	1.867
8	0.342	0.381	0.420	0.429	0.439	0.287	0.375	0.311	0.467
9	5.874	6.593	7.327	7.254	7.654	4.926	6.345	5.293	8.208
10	1.167	1.305	1.445	1.467	1.466	0.997	1.271	1.056	1.609
11	2.177	2.421	2.665	2.777	2.704	1.852	2.392	1.978	2.962
12	0.871	0.974	1.079	1.064	1.168	0.721	0.948	0.789	1.201
13	1.548	1.725	1.903	1.923	2.033	1.285	1.695	1.405	2.117
14	0.415	0.464	0.513	0.507	0.549	0.348	0.453	0.376	0.569
15	3.224	3.592	3.961	4.163	3.883	2.794	3.530	2.925	4.408
16	1.214	1.360	1.509	1.513	1.530	1.043	1.319	1.098	1.676
17	3.381	3.775	4.173	4.158	4.517	2.788	3.686	3.060	4.654
18	0.547	0.608	0.670	0.697	0.680	0.466	0.601	0.497	0.744
BM	1.382	1.541	1.700	1.729	1.778	1.161	1.513	1.254	1.891
内/外	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.752	0.822	0.730	0.774	0.645	0.893	0.753	0.882	0.672
2	1.503	1.644	1.460	1.549	1.289	1.786	1.505	1.763	1.343
3	3.007	3.287	2.920	3.097	2.578	3.572	3.010	3.526	2.686
4	3.346	3.675	3.140	3.394	2.810	4.028	3.348	3.821	3.003
5	3.743	4.037	4.076	4.046	3.402	4.294	3.735	4.805	3.291
6	0.217	0.237	0.205	0.219	0.183	0.260	0.218	0.247	0.194
7	1.487	1.629	1.441	1.536	1.277	1.767	1.491	1.745	1.332
8	0.372	0.407	0.360	0.384	0.319	0.442	0.373	0.436	0.333
9	6.429	6.943	6.347	6.532	5.472	7.630	6.387	7.532	5.668
10	1.255	1.362	1.283	1.320	1.107	1.464	1.256	1.530	1.113
11	2.324	2.561	2.344	2.485	2.051	2.728	2.332	2.856	2.088
12	0.968	1.048	0.903	0.955	0.803	1.166	0.966	1.078	0.859
13	1.701	1.862	1.601	1.719	1.427	2.045	1.700	1.940	1.522
14	0.459	0.494	0.436	0.456	0.388	0.546	0.460	0.516	0.406
15	3.387	3.724	3.614	3.738	3.090	3.907	3.400	4.379	3.031
16	1.310	1.409	1.345	1.366	1.161	1.519	1.314	1.585	1.155
17	3.746	4.082	3.482	3.722	3.098	4.533	3.733	4.195	3.338
18	0.584	0.643	0.590	0.624	0.516	0.685	0.587	0.717	0.524
BM	1.503	1.644	1.460	1.549	1.289	1.786	1.505	1.763	1.343

2.1.2 x(オン)におけるSN比最大条件

素子の R, Ez, E₀ の中心値組み合わせに対し, x(オン)で1因子ごとに水準を変更し応答が低下する組み合わせ N₁, 上昇する組み合わせ N₂とし, 2個の調合ノイズを作成した. これを表・2に示す.

内側直交表に対し表・2の調合ノイズを外側条件とした結果を表・3に示す. 表・3には, 比較のため, 表・1から計算した直交表ノイズにおけるSN比も記した. x(オン)の直交表ノイズと調合ノイズの要因効果図を図・2に示す. 直交表ノイズ(上)と調合ノイズ(下)の要因効果に違いがある. まず, 第1段階では各制御因子についてSN比が最大となる水準を選択する. 表・4にSN比最大水準を示す. 5個の制御因子のSN比最大水準について直交表ノイズと調合ノイズで, 3個が異なっている.

2.1.3 y(オフ)におけるSN比最大条件

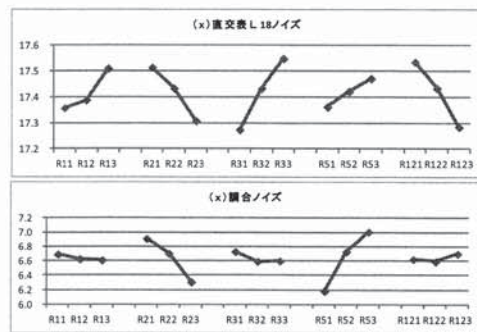
y(オフ)に対する直交表ノイズの応答を表・5に示す. x(オン)と同一回路であるためxを優先し表・2

表・2 x(オン)における調合ノイズ

水準比2 1因子法	x(リレー:ON)	
	N ₁ (-)	N ₂ (+)
R ₁	3	1
R ₂	1	3
R ₃	1	3
R ₅	3	1
R ₁₂	1	3
Ez	3	1
E ₀	1	3

表・3 x(オン):調合ノイズの結果とSN比の比較

No	制御因子						調合ノイズ			直交表ノイズ
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₅	R ₁₂	N ₁	N ₂	SN比	SN比	
1	1	1	1	1	1	0.560	1.045	6.981	17.487	
2	2	2	2	2	2	1.121	2.089	6.981	17.487	
3	3	3	3	3	3	2.241	4.179	6.981	17.487	
4	1	2	2	3	3	2.486	4.582	7.149	17.268	
5	2	3	3	1	1	2.792	5.519	6.172	17.420	
6	3	1	1	2	2	0.160	0.298	7.042	17.361	
7	2	1	3	2	3	1.114	2.059	7.103	17.525	
8	3	2	1	3	1	0.278	0.515	7.103	17.525	
9	1	3	2	1	2	4.654	9.165	6.226	17.214	
10	3	3	2	2	1	0.937	1.786	6.676	17.631	
11	1	1	3	3	2	1.777	3.261	7.210	17.660	
12	2	2	1	1	3	0.700	1.333	6.676	17.069	
13	2	3	1	3	2	1.256	2.338	7.011	17.245	
14	3	1	2	1	3	0.334	0.631	6.810	17.407	
15	1	2	3	2	1	2.616	4.868	7.011	17.593	
16	3	2	3	1	2	0.971	1.864	6.568	17.728	
17	1	3	1	2	3	2.723	5.156	6.763	17.004	
18	2	1	2	3	1	0.446	0.820	7.195	17.678	
BM	2	2	2	2	2	1.121	2.089	6.981	17.487	



図・2 x(オン):直交表ノイズと調合ノイズの要因効果

表・4 x(オン)におけるSN比最大水準

因子	直交表	調合	一致性
R ₁	3	1	×
R ₂	1	1	○
R ₃	3	1	×
R ₅	3	3	○
R ₁₂	1	3	×

の調合ノイズをy(オフ)に適用する. これを表・6に示す. また, y(オフ)の直交表ノイズと調合ノイズの要因効果図を図・3に示す. 図・3から最大のSN比水準を選択し, 表・7に示す.

5個の制御因子の最大水準に対して直交表ノイズと調合ノイズで, 4個が一致している.

2.1.4 x, y式の差異からみたノイズ挙動の検証

直交表ノイズと調合ノイズの式x, yのSN比最大値の水準は表・4, 表・7で異なっている. 特に, x(オン)の表・4では, 直交表ノイズと調合ノイズで大きく異なる結果になっている. 一方, y(オフ)の表・7ではほぼ同じになっている.

まず, 先にyの(2)式について考える. この式は, 以下の(3)式に書き直すことができる.

$$y = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{1/R_3 + 1/R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/R_2 + 1/R_5} \right) \quad (3)$$

この式を見れば明らかのように, 各因子の応答yへの影響は, 少なくともその正負については他の因子の値に依存しないことがわかる(yはR₁の単調減少関数であり, R₂, R₃, R₅, R₁₂の単調増加関数である). これにより, 表・7のように直交ノイズと調合ノイズで結果がほとんど変わらなかったのではないかと考えられる.

一方, xに関する(1)式を見ると, 分母は3つの因子の積からなる項の和および差によって構成されてお

表・5 y(オフ)：直交表ノイズの応答結果

内/外	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.651	0.723	0.795	0.822	0.828	0.546	0.717	0.593	0.880
2	1.301	1.446	1.590	1.644	1.656	1.092	1.434	1.185	1.759
3	2.602	2.891	3.181	3.288	3.312	2.184	2.868	2.370	3.518
4	2.975	3.306	3.636	3.721	3.877	2.469	3.276	2.707	4.031
5	2.889	3.210	3.531	3.780	3.404	2.520	3.202	2.645	3.857
6	0.186	0.207	0.227	0.233	0.242	0.154	0.205	0.169	0.252
7	1.315	1.461	1.607	1.660	1.677	1.102	1.448	1.196	1.781
8	0.329	0.365	0.402	0.415	0.419	0.276	0.362	0.299	0.445
9	4.904	5.449	5.994	6.229	6.164	4.140	5.437	4.490	6.548
10	1.035	1.149	1.264	1.327	1.272	0.883	1.143	0.944	1.393
11	2.144	2.382	2.621	2.742	2.657	1.824	2.360	1.950	2.908
12	0.772	0.858	0.944	0.963	1.013	0.639	0.853	0.705	1.040
13	1.472	1.636	1.800	1.843	1.915	1.223	1.623	1.341	1.990
14	0.368	0.409	0.450	0.461	0.479	0.306	0.406	0.335	0.498
15	3.066	3.406	3.747	3.991	3.658	2.659	3.379	2.792	4.145
16	1.035	1.149	1.264	1.327	1.272	0.883	1.143	0.944	1.393
17	3.089	3.432	3.776	3.852	4.053	2.556	3.412	2.818	4.158
18	0.536	0.596	0.655	0.686	0.664	0.456	0.590	0.488	0.727
BM	1.301	1.446	1.590	1.644	1.656	1.092	1.434	1.185	1.759
内/外	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.703	0.780	0.678	0.733	0.604	0.840	0.705	0.829	0.637
2	1.406	1.560	1.356	1.465	1.208	1.680	1.410	1.657	1.273
3	2.813	3.120	2.711	2.931	2.417	3.360	2.819	3.314	2.546
4	3.255	3.596	3.045	3.316	2.737	3.925	3.259	3.721	2.938
5	3.003	3.395	3.181	3.362	2.764	3.497	3.017	3.892	2.762
6	0.203	0.225	0.190	0.207	0.171	0.245	0.204	0.233	0.184
7	1.422	1.573	1.371	1.480	1.221	1.697	1.426	1.676	1.284
8	0.356	0.393	0.343	0.370	0.305	0.424	0.356	0.419	0.321
9	5.271	5.941	5.077	5.523	4.555	6.333	5.280	6.211	4.849
10	1.099	1.227	1.106	1.183	0.974	1.296	1.103	1.352	1.000
11	2.285	2.528	2.301	2.451	2.018	2.686	2.294	2.812	2.060
12	0.848	0.944	0.779	0.856	0.707	1.033	0.848	0.952	0.772
13	1.609	1.783	1.505	1.641	1.355	1.943	1.611	1.840	1.457
14	0.402	0.446	0.376	0.410	0.339	0.486	0.403	0.460	0.364
15	3.204	3.566	3.397	3.568	2.933	3.711	3.222	4.153	2.901
16	1.099	1.227	1.106	1.183	0.974	1.296	1.103	1.352	1.000
17	3.392	3.777	3.115	3.422	2.826	4.130	3.393	3.809	3.088
18	0.571	0.632	0.575	0.613	0.505	0.672	0.574	0.703	0.515
BM	1.406	1.560	1.356	1.465	1.208	1.680	1.410	1.657	1.273

り、yの式のように単調な構造にはなっていないため、複雑な交互作用が生じ、各因子の応答xに対する影響は、他の因子の値によって大きく変わる可能性がある。このことが、表・4のような結果が得られた一因になっていると考えられる。

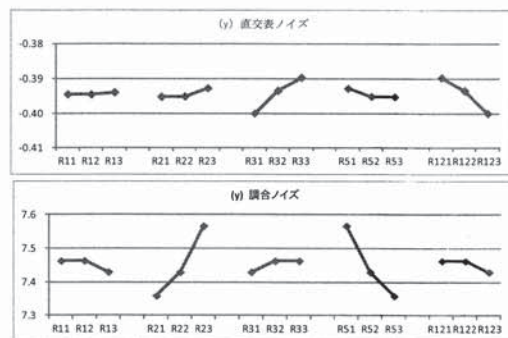
2.2 調合ノイズのSN比が同じ値になる問題

2.1節では、ON(オン)機能を優先するために、yにおいてもxの調合ノイズを適用した。

これに対し、本節では、yに対する現行条件(第2水準)のノイズ傾向から調合することを考える。調合

表・6 y(オフ)：調合ノイズの結果とSN比の比較

No	制御因子						調合ノイズ			直交表ノイズ
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₅	R ₁₂	N ₁	N ₂	SN比	SN比	
1	1	1	1	1	1	0.534	0.967	7.411	17.568	
2	2	2	2	2	2	1.069	1.935	7.411	17.568	
3	3	3	3	3	3	2.137	3.870	7.411	17.568	
4	1	2	2	3	3	2.439	4.434	7.350	17.323	
5	2	3	3	1	1	2.397	4.243	7.760	17.875	
6	3	1	1	2	2	0.152	0.277	7.350	17.323	
7	2	1	3	2	3	1.078	1.959	7.350	17.534	
8	3	2	1	3	1	0.269	0.490	7.350	17.534	
9	1	3	2	1	2	4.070	7.203	7.760	17.751	
10	3	3	2	2	1	0.853	1.532	7.531	17.798	
11	1	1	3	3	2	1.756	3.199	7.319	17.678	
12	2	2	1	1	3	0.636	1.143	7.531	17.256	
13	2	3	1	3	2	1.209	2.190	7.411	17.357	
14	3	1	2	1	3	0.302	0.547	7.411	17.357	
15	1	2	3	2	1	2.518	4.559	7.411	17.692	
16	3	2	3	1	2	0.853	1.532	7.531	17.798	
17	1	3	1	2	3	2.546	4.574	7.531	17.256	
18	2	1	2	3	1	0.439	0.800	7.319	17.678	
BM	2	2	2	2	2	1.069	1.935	7.411	17.568	



図・3 y(オフ)：直交表ノイズと調合ノイズの要因効果

表・7 y(オフ)におけるSN比最大水準

因子	直交表	調合	一貫性
R ₁	3	1	△
R ₂	3	3	○
R ₃	3	3	○
R ₅	1	1	○
R ₁₂	1	1	○

ノイズを表・8に示す。

表・8の調合ノイズでN₁、N₂を計算しSN比を求めた結果を表・9に示す(比較のため、直交表ノイズによるSN比もそのまま載せてある)。調合ノイズのSN比は全て同じ値になった。値が同じであるとSN比の最大水準を選ぶことはできない。

この現象が生じた要因について、以下で考察する。(3)式より、R₁を大きくするとyは小さくなり、ま

表・8 y(オフ)における調合ノイズ

因子	N ₁ (y)	N ₂ (y)
R ₁	3	1
R ₂	1	3
R ₃	1	3
R ₅	1	3
R ₁₂	1	3

表・10 y(オフ)における調合ノイズ(N₁, N₂)

因子	N ₁	N ₂
R ₁	α 倍	β 倍
R ₂	β 倍	α 倍
R ₃	β 倍	α 倍
R ₅	β 倍	α 倍
R ₁₂	β 倍	α 倍

表・9 y(オフ) : 調合ノイズの結果とSN比の比較

No	制御因子						調合ノイズ			直交表ノイズ	
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₅	R ₁₂	N ₁	N ₂	SN比	SN比		
1	1	1	1	1	1	0.532	0.972	7.287	17.568		
2	2	2	2	2	2	1.065	1.944	7.287	17.568		
3	3	3	3	3	3	2.129	3.887	7.287	17.568		
4	1	2	2	3	3	2.434	4.444	7.287	17.323		
5	2	3	3	1	1	2.364	4.315	7.287	17.875		
6	3	1	1	2	2	0.152	0.278	7.287	17.323		
7	2	1	3	2	3	1.076	1.964	7.287	17.534		
8	3	2	1	3	1	0.269	0.491	7.287	17.534		
9	1	3	2	1	2	4.013	7.326	7.287	17.751		
10	3	3	2	2	1	0.846	1.545	7.287	17.798		
11	1	1	3	3	2	1.754	3.203	7.287	17.678		
12	2	2	1	1	3	0.632	1.154	7.287	17.256		
13	2	3	1	3	2	1.205	2.199	7.287	17.357		
14	3	1	2	1	3	0.301	0.550	7.287	17.357		
15	1	2	3	2	1	2.508	4.580	7.287	17.692		
16	3	2	3	1	2	0.846	1.545	7.287	17.798		
17	1	3	1	2	3	2.527	4.615	7.287	17.256		
18	2	1	2	3	1	0.439	0.801	7.287	17.678		
BM	2	2	2	2	2	1.065	1.944	7.287	17.568		

た, R₂, R₃, R₅, R₁₂を大きくするとyは大きくなる
ことがわかる. 従って, αを1より大きい(α>1)定
数, βを1より小さい(β<1)定数とし, 以下の表・
10のように調合する(なお, 以下の式展開は, 必ずし
もα>1, β<1である必要はなく, α≥1, β≥1の場合
やα≤1, β≤1の場合でもα≠βでありさえすれば成
立するが, 調合の際はα>1, β<1とするのが自然で
あると考えられる).

このとき, N₁のときの応答をy₁, N₂のときの応答
をy₂とおくと, そこから得られるSN比は以下の手
順で計算できる.

$$y_1 = \frac{1}{\alpha R_1} \left(\frac{1}{1/\beta R_3 + 1/\beta R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/\beta R_2 + 1/\beta R_5} \right)$$

$$= \frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{1/R_3 + 1/R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/R_2 + 1/R_5} \right) \right\}$$

$$y_2 = \frac{1}{\beta R_1} \left(\frac{1}{1/\alpha R_3 + 1/\alpha R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/\alpha R_2 + 1/\alpha R_5} \right)$$

$$= \frac{\alpha^2}{\beta} \left\{ \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{1/R_3 + 1/R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/R_2 + 1/R_5} \right) \right\}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{\beta} \right) \left\{ \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{1/R_3 + 1/R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/R_2 + 1/R_5} \right) \right\}$$

$$V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2 \left\{ \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{1/R_3 + 1/R_{12}} \right) \left(\frac{1}{1/R_2 + 1/R_5} \right) \right\}^2$$

$$SN \text{ 比} = 10 \log_{10} \frac{S}{V_e} = 10 \log_{10} \frac{(\bar{y})^2 - \frac{V_e}{n}}{V_e}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{\left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{\beta} \right) \right\}^2 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\beta} \right) \right\}^2}{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{4} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2}{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{2\alpha\beta}{\left(\frac{\beta^2}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{\beta} \right)^2}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{2\alpha^3\beta^3}{(\alpha^3 - \beta^3)^2}$$

以上より,

$$SN \text{ 比} = 10 \log_{10} \frac{2\alpha^3\beta^3}{(\alpha^3 - \beta^3)^2}$$

となる.

この結果で重要なのは, SN比がR₁, R₂, R₃, R₅, R₁₂の値に全く依存しないことである. 従って, この
場合, SN比は制御因子R₁, R₂, R₃, R₅, R₁₂の水準
の組み合わせがどんなものであっても常に同じ値にな
ることがわかる.

なお、本節の数値例では、調合の際の値の変化を1.1倍と0.9倍にしていることから、 $\alpha=1.1$, $\beta=0.9$ を代入すると、

$$\text{SN比} = 10 \log_{10} \frac{2 \times 1.1^3 \times 0.9^3}{(1.1^3 - 0.9^3)^2} = 7.287$$

となり、確かに表・9の結果と一致していることがわかる。

なお、調合の際、 R_2 と R_5 の調合の方向を逆にすれば、あるいは、 R_3 と R_{12} の調合の方向を逆にすれば、このような結果にはならないことに留意する。実際、2.1節で用いた調合ノイズ(表・2)では、 R_2 と R_5 の調合の方向が逆になっているため、制御因子の水準の組み合わせによってSN比は異なる結果(表・6)になっている。

2.3 調合ノイズの範囲外となる直交表ノイズの出現

調合ノイズは、基準条件の第2水準に対しノイズ幅を変更し応答傾向から降下・上昇方向の水準を組み合わせ N_1 , N_2 を作成する。 N_1 , N_2 は、基準条件での両端値となるが制御因子が組替わると応答はしばしばこの両端値の範囲外に出現する。この検証に実験数が多い L_{36} を選択し、制御因子を L_{36} の1-5列に割り付けた。2.1節、2.2節では、内側直交表において水準比を2とした(制御因子の第2水準を基準として、第1水準は第2水準の1/2倍の値、第3水準は第2水準の2倍の値とした)が、本節ではまず水準比を5とする。

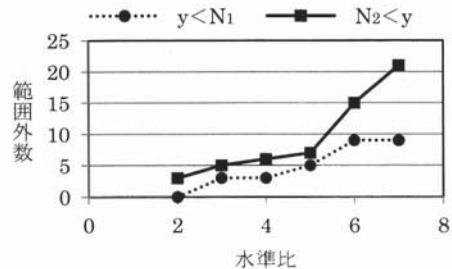
ノイズ抵抗(± 0.1)については、直交表ノイズでは L_{36} の1-5列とし、調合ノイズでは表・2の調合を適用した。これをもとに、直交表ノイズと調合ノイズにおける y (オフ)の値を求め、直交表ノイズの最小・最大と調合ノイズ N_1 , N_2 を比較した。その結果、内側直交表におけるNo. 9, 12, 20, 23, 25, 32, 34において、 N_1 以下が5個、 N_2 以上が7個存在した。範囲外の値が生じたNo.と、参考までにNo. 1, 2, 3とNo. 36の結果を合わせて表・11に示す(No. 32の差0.000は負側にある)。

さらに、制御因子の交互作用の大きさを変更するために水準比を2-7に変更したときの結果を図・4と表・12に、また、水準比は5のままノイズ幅を ± 0.01 から ± 0.4 まで変更した結果を図・5と表・13に示す。表・12、表・13には基本統計量を併記した。

図・4、表・12より、水準比が上がると因子間の交互作用が上昇し範囲外値は多くなるが、特に応答が大きい N_2 側が増加する。これは、 y の存在範囲が y

表・11 調合ノイズ範囲外数(水準比5, ノイズ幅 ± 0.1)

実験No	直交表ノイズ(y)		調合ノイズ		差:負が範囲外値あり		枠外値数	
	最小y	最大y	N_1	N_2	$y - N_1$	$N_2 - y$	$y < N_1$	$N_2 < y$
1	0.218	0.380	0.214	0.387	0.005	0.007	0	0
2	1.092	1.900	1.069	1.935	0.024	0.035	0	0
3	5.461	9.498	5.343	9.675	0.118	0.177	0	0
9	0.256	0.462	0.258	0.453	-0.002	-0.009	1	1
12	0.914	1.594	0.936	1.490	-0.022	-0.104	1	1
20	1.981	3.188	1.974	3.141	0.007	-0.047	0	1
23	2.905	4.671	2.895	4.605	0.011	-0.065	0	1
25	18.939	31.876	19.051	30.310	-0.112	-1.565	1	1
32	0.055	0.100	0.055	0.100	0.000	0.000	1	1
34	6.404	11.554	6.446	11.330	-0.043	-0.224	1	1
36	0.548	0.878	0.519	0.912	0.029	0.034	0	0
範囲外値の合計							5	7



図・4 水準比変更と範囲外数(ノイズ幅 ± 0.1)

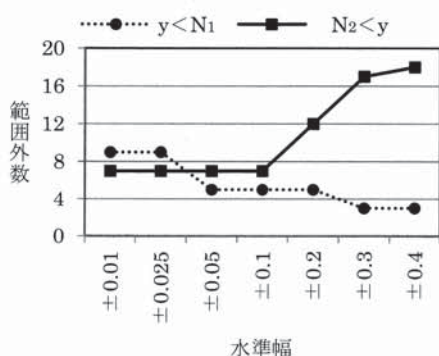
表・12 水準比ごとの範囲外数と基本統計量

水準比	$y < N_1$	$N_2 < y$	平均	中央値	尖度	歪度	最小	最大
2	0	3	2.013	1.452	5.005	2.088	0.154	12.157
3	3	5	3.183	1.434	11.380	3.182	0.123	34.192
4	3	6	4.743	1.331	15.623	3.766	0.021	69.468
5	5	7	6.770	1.243	18.616	4.143	0.011	118.721
6	9	15	9.228	1.177	20.783	4.406	0.006	182.355
7	9	21	12.114	1.078	22.400	4.598	0.004	260.615

>0 であり、中央値より平均値が大きいためから応答分布が右に歪んでいるためであると考えられる。

図・5、表・13より、ノイズ幅が大きくなるとノイズ間の交互作用が大きくなり、制御因子との交互作用も増加し、調合ノイズの範囲外数が増加する。 N_1 以下の範囲外数は減少し、 N_2 以上の範囲外数は増加している。これも、同様に、中央値より平均値が大きいためから応答分布が右に歪んでいるのが一因ではないかと考えられる。

調合ノイズを用いるときは、基準となる制御因子の水準組み合わせで応答が両端となるようにノイズの調合を行い、それを内側直交表の水準組み合わせに適用していくが、制御因子とノイズ間およびノイズ同士の交互作用によって、調合ノイズ条件は両端値ではなく



図・5 ノイズ幅変更と範囲外数(水準比5)

表・13 ノイズ幅ごとの範囲外数と基本統計量

ノイズ幅	y < N ₁	N ₂ < y	平均	中央値	尖度	歪度	最小	最大
±0.01	9	7	6.747	1.265	17.029	4.019	0.014	95.893
±0.025	9	7	6.749	1.259	17.111	4.026	0.013	99.389
±0.05	5	7	6.753	1.261	17.407	4.049	0.012	105.476
±0.1	5	7	6.770	1.243	18.616	4.143	0.011	118.721
±0.2	5	12	6.840	1.160	23.833	4.531	0.008	150.403
±0.3	3	17	6.970	1.090	33.617	5.201	0.006	191.438
±0.4	3	18	7.187	1.020	48.766	6.151	0.004	246.453

なり、外側に直交表ノイズを用いたときの応答がさらに外側(調合ノイズでの応答の範囲外)に出現することがある。このため、調合ノイズを用いる場合は、ばらつき低減後に、得られた条件でノイズ傾向と応答のばらつきを再度確認することが推奨される。

3. まとめと今後の課題

2水準の調合ノイズによるばらつき低減研究は、パラメータ設計の約75%^[2]に適用されているが、一方、調合ノイズに対する学術研究が、様々な観点で実施され^[3,4,10,11]、次第に問題点とリスクが明らかになってきた。本報告は、下記3点の調合ノイズの具体的問題点を検証した。

- 1: 調合ノイズと直交表ノイズの最適条件の違い
基準条件から作成した2条件の調合ノイズ(N₁, N₂)は、直交表ノイズの代替手段とされていたが、得られる最適条件は異なる可能性があることが確認された(→2.1節)。
- 2: 調合ノイズのSN比が同じ値になる問題
応答の関数形式と調合ノイズの組み合わせによりSN比が同じ値になる可能性を検証できた(→2.2節)。
- 3: 調合ノイズの範囲外に出現する直交表ノイズの応答

制御因子とノイズ因子、またノイズ因子間の交互作用により調合ノイズが設定したN₁, N₂の範囲外に直交表ノイズの応答が出現することがある(→2.3節)。

今後、設計行為の確からしさを向上させるために、数理的な観点での検討も交えながら、下記研究を継続していく予定である。

- 1: 調合ノイズに代わるノイズ挙動をシミュレートできる実験数の削減方法
- 2: 反転データがあっても最適条件を特定できる方法
- 3: 現行の調合ノイズのリスクを低減する運用方法

参考文献

- [1] 田口玄一・吉澤正孝(1988):「品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学」, 日本規格協会.
- [2] 森輝雄・林秀行・田辺総一郎・伊藤義明(2016):「ロバスト設計に対する直積から調合までのノイズ因子の変遷と課題」, 「日本品質管理学会第110回研究発表会研究発表要旨集」, 185-188.
- [3] Hou, X. S. (2002): "On the Use of Compound Noise Factor in Parameter Design Experiments", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 18, [3], 225-243.
- [4] 松浦峻(2014): "調合誤差因子実験における応答平均と応答分散の推定精度", 「品質」, 44, [1], 123-134.
- [5] 宮川雅巳(2000):「品質を獲得する技術」, 日科技連出版社.
- [6] 宮川雅巳(2006):「実験計画法特論」, 日科技連出版社.
- [7] 立林和夫(2004):「入門タグチメソッド」, 日科技連出版社.
- [8] 田口玄一・横山巽子(1988)「品質工学講座4 品質設計のための実験計画法」, 日本規格協会.
- [9] 杉山圭・森輝雄・河村敏彦(2014): "統計モデルによる半導体BGA パンプ接合のロバストパラメータ設計", 「第22回品質工学研究発表大会論文集」, 174-177.
- [10] Singh, J., Frey, D. D., Soderborg, N., Jugulum, R. (2007): "Compound Noise: Evaluation as a Robust Parameter Design Method", *Quality and Reliability Engineering International*, 23, [3], 387-398.
- [11] Wu, C. F. J., Hamada, M. S. (2009): *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization (2nd Edition)*, Wiley.
- [12] 富島明(1978): "PADの応用: 温度調節器の品質評価", QCRG資料79-47.