実験計画法を用いた最適条件探索プログラムの開発

田辺 郁男^{*1}, 高橋 宗一郎^{*2}, 高橋 智^{*1}

Development of the program for searching the optimum condition using design of experiments

Ikuo TANABE^{*1}, Sohichiro TAKAHASHI^{*2} and Satoshi TAKAHASHI^{*1}^{*1} Nagaoka University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan^{*2} Nagaoka University of Technology, Master course, Dept. of Mechanical Engineering
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

Received: 29 March 2018; Revised: 30 April 2018; Accepted: 30 May 2018

Abstract

The Design of Experiments (DOE) is a method that is widely used due to its effectiveness to select optimum conditions in the design stage of product development. On the other hand, a fast, low cost, labor saving and energy-saving innovative development is also required in industry. In this research, a program for quickly searching the optimum condition using design of experiments is developed and evaluated. Relationships between each parameter and the final property are firstly cleared for each formula by using the design of experiments. Then the optimum conditions for each parameter were decided by using these formulas in a program. The optimum final property with each optimum level value were calculated. In addition, the optimum condition for cooling system using alkaline water mist was investigated for evaluating this program in an experiment. It is concluded from the result that (1) the program using the design of experiments was useful for fast development process, (2) this program could quickly and accurately decide the optimum cooling condition for cooling system using alkaline water mist.

Keywords: Design of experiments, Optimum design, Program, Optimum condition

1. 緒 言

実験計画法は、制御因子の水準値の最適組合せを効率よく決定するために産業界でよく利用されている(森他, 2016), (西岡, 伊藤, 2004). また、品質工学(静特性)は、実験計画法をベースに誤差因子の概念を組み込み、ロバスト性の高い設計手法として、多くの研究が行われている(藤川, 1999), (西岡, 伊藤, 2004), (清水他, 2016), (神蔵他, 2006), (小村他, 2012), (水谷他, 2002), (結城, 甲斐, 2013), (井山他, 2009). しかし、これらの研究の多くは、効果的な事例研究として要因効果図を求め、それを用いて2段設計を行うに留まっている.

それに対して、新たな利用法として、著者ら(Tanabe et al., 2014)は品質工学(静特性)の1回目のトライアルの結果をもとに、2回目のトライアルにおいてその制御因子の最適水準値を探索するプログラムを開発している. しかし、①このプログラムは品質工学をベースにしているため、誤差因子の数のトライアルが必要であり、最適条件探索までには長時間を有することと、②探索途中で最終特性値と各制御因子の関数関係を求める際のカーブフィット作業において、探索精度を上げるためには作業者の熟練度が必要であった.

そこで本研究では、実験計画法を使用して、品質工学(静特性)の誤差因子数分だけ実験回数を減らし、つぎに、最終特性値と各制御因子の関数関係を求める際のカーブフィット作業の自動化を行ない、さらに、最適最終特性値を得るための制御因子の水準値の組合せを1回のトライアルのみで計算できるプログラムを開発した. 最

後に、開発したプログラムを用いて、強アルカリ水ミストを用いた強制冷却システムの最適稼動条件探索を行い、開発した最適条件探索プログラムの有効性を評価した。

2. 使用する実験計画法の説明

実験計画法は、最小限の実験もしくはCAE等の解析で、想定している設計パラメータの全組合せの中から、最適な設計条件を推定する手法である。表1に示すように設計パラメータに相当するものを制御因子（A～D）、そのパラメータの種類や数値に相当するものを制御因子の水準（A₁～D₃）、その制御因子の組合せで最終的に起こる現象を数値化したものを最終特性値とそれぞれ呼ぶ。この最終特性値について、全ての制御因子の水準組合せを検討することは、実際の開発現場においてはコストと時間がかかるため困難である。そのため表2に示すように、直交表を用いて条件の割り付けを行い、制御因子の水準組合せを決定する。つぎに、この直交表の組合せに従って実験もしくはCAEを行い、その結果から最終特性値 P を把握する。

各制御因子 A, B, C, D の最終特性値 P への影響 E は、最終特性値 P を使って式(1)で計算できる。

$$\begin{aligned}
 E_{A1} &= (P_{A1 \cdot B1 \cdot C1 \cdot D1} + P_{A1 \cdot B2 \cdot C2 \cdot D2} + P_{A1 \cdot B3 \cdot C3 \cdot D3}) / 3 \\
 E_{A2} &= (P_{A2 \cdot B1 \cdot C2 \cdot D3} + P_{A2 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1} + P_{A2 \cdot B3 \cdot C1 \cdot D2}) / 3 \\
 E_{A3} &= (P_{A3 \cdot B1 \cdot C3 \cdot D2} + P_{A3 \cdot B2 \cdot C1 \cdot D3} + P_{A3 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D1}) / 3 \\
 E_{B1} &= (P_{A1 \cdot B1 \cdot C1 \cdot D1} + P_{A2 \cdot B1 \cdot C2 \cdot D3} + P_{A3 \cdot B1 \cdot C3 \cdot D2}) / 3 \\
 E_{B2} &= (P_{A1 \cdot B2 \cdot C2 \cdot D2} + P_{A2 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1} + P_{A3 \cdot B2 \cdot C1 \cdot D3}) / 3 \\
 E_{B3} &= (P_{A1 \cdot B3 \cdot C3 \cdot D3} + P_{A2 \cdot B3 \cdot C1 \cdot D2} + P_{A3 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D1}) / 3 \\
 E_{C1} &= (P_{A1 \cdot B1 \cdot C1 \cdot D1} + P_{A2 \cdot B3 \cdot C1 \cdot D2} + P_{A3 \cdot B2 \cdot C1 \cdot D3}) / 3 \\
 E_{C2} &= (P_{A1 \cdot B2 \cdot C2 \cdot D2} + P_{A2 \cdot B1 \cdot C2 \cdot D3} + P_{A3 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D1}) / 3 \\
 E_{C3} &= (P_{A1 \cdot B3 \cdot C3 \cdot D3} + P_{A2 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1} + P_{A3 \cdot B1 \cdot C3 \cdot D2}) / 3 \\
 E_{D1} &= (P_{A1 \cdot B1 \cdot C1 \cdot D1} + P_{A2 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1} + P_{A3 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D1}) / 3 \\
 E_{D2} &= (P_{A1 \cdot B2 \cdot C2 \cdot D2} + P_{A2 \cdot B3 \cdot C1 \cdot D2} + P_{A3 \cdot B1 \cdot C3 \cdot D2}) / 3 \\
 E_{D3} &= (P_{A1 \cdot B3 \cdot C3 \cdot D3} + P_{A2 \cdot B1 \cdot C2 \cdot D3} + P_{A3 \cdot B2 \cdot C1 \cdot D3}) / 3
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、制御因子 A の影響 E_A を計算しているときは、その他の制御因子 B, C, D の影響は平均化され、影響 E_A の中に含有される。これは、制御因子 B, C, D の各影響 E_B , E_C , E_D についても同様である（ここで、環境変動等で制御因子と最終特性値の間でばらつきが生じた場合には、その影響は上記の平均化された影響内にも含有されることになる。本報では、3.3 節に各制御因子の誤差の影響として検討する）。

最後に、加法性によって全ての制御因子の水準組合せに対する最終特性値を計算できる。加法性の一例として、制御因子が A, B, C, D の 4 つで、制御因子の水準がいずれも 3 つずつであるとして、例えばトライアルでは実際に行っていない制御因子の水準組合せ $A_3 \cdot B_2 \cdot C_3 \cdot D_1$ の条件について、その最終特性値 $P_{A3 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1}$ の推定値

Table 2 Orthogonal array and final properties in an experimental design

No.	Control factors				Final properties
	A	B	C	D	
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	$P_{A1 \cdot B1 \cdot C1 \cdot D1}$
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	$P_{A1 \cdot B2 \cdot C2 \cdot D2}$
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	$P_{A1 \cdot B3 \cdot C3 \cdot D3}$
4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	$P_{A2 \cdot B1 \cdot C2 \cdot D3}$
5	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	$P_{A2 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1}$
6	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂	$P_{A2 \cdot B3 \cdot C1 \cdot D2}$
7	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂	$P_{A3 \cdot B1 \cdot C3 \cdot D2}$
8	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃	$P_{A3 \cdot B2 \cdot C1 \cdot D3}$
9	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁	$P_{A3 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D1}$

Table 1 Control factors in an experimental design

Control factors				
Name	A	B	C	D
Levels	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃

は、直交表の加法性に基づき、対応する制御因子の影響の和と最終特性値の平均値から、式(2)で計算できる。

$$P_{A3 \cdot B2 \cdot C3 \cdot D1} = E_{A3} + E_{B2} + E_{C3} + E_{D1} - (4-1)P_{ave} \quad (2)$$

ここで、 P_{ave} は最終特性値の平均値（表 2 の最終特性値の平均）である。

著者らがこの実験計画法で注目したのは、①各制御因子と影響 E_A を関数化できること（式(1)）、②ある制御因子について①を行っている際に、その対象制御因子以外の制御因子の影響が平均的に影響していること、③加法性によって全水準組合せに対してその最終特性値を推定できることの 3 つである。

3. 最適条件探索プログラムの開発

3・1 各制御因子と最終特性値の関数関係の探索方法

表 2 の結果から、式(1)を使用して各制御因子とその最終特性値への影響 E の関係のグラフを書くことができる。図 1 にその一例として、制御因子 A の水準値と最終特性値への影響 E_A の関係のグラフを示す。このとき、制御因子 A 以外の 3 つの制御因子 B, C, D の影響は平均的に影響している。同様に、各制御因子 B, C, D と最終特性値への影響 E_B , E_C , E_D の関係のグラフをそれぞれ示すことも可能である。この段階で、各制御因子が最終特性値への影響 E に対してアナログ的にどのように影響しているかが把握できる。このとき、最終特性値への影響 E に対する 1 つの制御因子の関数関係が、他の複数制御因子の平均的な影響のもとで成立していることが大きな特長である。また、入力各制御因子の各水準が等分布の値とは限らないので、この図によって各制御因子の各水準値の影響力を物理的にイメージしやすくなり、各水準値の影響の大小関係を適確な物理量として把握することができる。

つぎに、表 3 に示すように線形近似、多項式近似、対数近似、指数近似、累乗近似の 5 種類の近似方法でカーブフィットを施すことによって、対象の制御因子が最終特性値に対して最も適確にその影響を表示している関数関係を自動的に決定する。具体的には、このカーブフィットで求めた関数関係式の中から、各水準値での影響 E_x と関数関係で計算した値 E_x' の差の 2 乗和 $\sum_{x=1 \sim \text{level number}} (E_x - E_x')^2$ が最小になる関数関係を決定する。また、プログラムに汎用性を持たせるために、この関数関係をマニュアルで選択できるようにした。このときは、プログラムの操作者による直感的な判断を行うことになる。また、多項式近似では 3 次式までを標準表示し、また、設計者が任意の次数を選択できるようにもしてある。

Fig. 1 Relationship between the control factor A and the final property P in the experimental design.

Table 3 Kinds of approximate curves regarding curve fit for first data in the program

No.	Kinds of approximate curves
1	Exponential approximation
2	Linear approximation
3	Logarithmic approximation (with degree)
4	Polynomial approximation
5	Radical approximation

つぎに、カーブフィット後の各制御因子と最終特性値の関数関係の探索方法については、図 2 のフローチャートにも示すように、得られた各関数関係が、制御因子 A の水準値 A_x とその影響 E_A の関数関係を $f(A_x)$ 、制御因子 B の水準値 B_y とその影響 E_B の関数関係を $g(B_y)$ 、制御因子 C の水準値 C_z とその影響 E_C の関数関係を $h(C_z)$ 、制

御因子 D の水準値 D_w とその影響 E_D の関数関係を $i(D_w)$, 各制御因子の影響の平均値 P_{ave} とすれば, 先の加法性の式(2)は, 式(3)のように書き換えることができる.

$$P_{A \times B \times C \times D_w} = f(A_x) + g(B_y) + h(C_z) + i(D_w) - (4-1)P_{ave} \quad (3)$$

これは, 離散化している水準値による加法性の式(2)を, 連続している曲線に適用したものである. このように, 各制御因子の水準値の組合せと最終特性値 P の関数関係を明らかにすることができる. 最後に, この関数式 (式(3)) を使用して, 最適最終特性値とそれを達成するための各制御因子の最適水準値の組合せ (このとき各水準値の変動範囲はあらかじめ操作者がプログラムに入力) を, 逐次代入法で計算することができる.

Fig. 2 Flow chart of the program for calculation regarding the optimum final property with each optimum level value.

上記のアルゴリズムの評価ために, 制御因子 A , B , C と最終特性値 $P_{A \times B \times C}$ の因果関係が, 式(4)で示される構造式であると仮定してデータを作成し, 本アルゴリズムでこの構造式を解明できるかどうかを評価した.

$$P_{A \times B \times C} = A^2 + 9A - B^2 - 3B + 5C - 46 \quad (4)$$

表 4 に使用した制御因子とその水準値, 表 5 にそれらを記入した L9 直交表をそれぞれ示す. 表中には, 各制御因子の各水準値組合せで構造式(4)を使用して計算した最終特性値 $P_{(4)}$ も示してある. 図 3 には, 表 5 の最終特性値 $P_{(4)}$ と式(1)から求めた最終特性値への影響 E と制御因子の水準値の関係のグラフである. 自動のカーブフィット作業によって求めた関係式も図中に示してある. また, 図 3 の題目中には図 3 中の関係式 $f(A_x)$, $g(B_y)$, $h(C_z)$

と式(3)から計算した各制御因子の水準値組合せと最終特性値 P の関数関係も示す。この関数関係は式(4)の構造式と同じであり、本手法によって使用した構造式を完全に探索できている。

つぎに、式(5)に示す指数関数を含む構造式を用いて、上記のアルゴリズムの評価を行う。ここでも、表4の制御因子とその水準値を流用した。

$$P_{A \cdot B \cdot C} = 6 e^{0.1A} + 2B^2 + 5B + 6C \quad (5)$$

表5にL9直交表に準じた各制御因子の各水準値組合せで、構造式(5)を使用して計算した最終特性値 $P_{(5)}$ も示してある。図4は、表5の最終特性値 $P_{(5)}$ と式(1)から求めた最終特性値への影響 E と制御因子の水準値の関係のグ

Table 4 Control factors

Control factors			
Name	A	B	C
Level 1	40	8	5
Level 2	50	12	5.5
Level 3	60	16	6

Table 5 Orthogonal table and final properties

L9	A	B	C	$P_{(4)}$	$P_{(5)}$
1	40	8	5	1851	525.589
2	40	12	5.5	1761.5	708.589
3	40	16	6	1640	955.589
4	50	8	5.5	2843.5	1091.479
5	50	12	6	2754	1274.479
6	50	16	5	2625	1512.479
7	60	8	6	4036	2624.573
8	60	12	5	3939	2798.573
9	60	16	5.5	3817.5	3045.573

$$\ast P_{(4)ave} = 2807.5 \quad P_{(5)ave} = 1615.214$$

Fig. 3 Relationship between the control factors A, B, C and the final property P using the experimental design

$$\text{Structural formula (5)} : P_{A \cdot B \cdot C} = A^2 + 9A - B^2 - 3B + 5C - 46,$$

$$\text{Calculated formula (5')} : P_{A \cdot B \cdot C} = A^2 + 9A - B^2 - 3B + 5C - 46$$

Fig. 4 Relationship between the control factors A, B, C and the final property P using the experimental design

$$\text{Structural formula (6)} : P_{A \cdot B \cdot C} = 6 e^{0.1A} + 2B^2 + 5B + 6C, \quad \text{and } P_{(6)ave} = 1615.214$$

$$\text{Calculated formula (6')} : P_{A \cdot B \cdot C} = 47.12 e^{0.067A} + 2B^2 + 5B + 6C - 402.337, \quad \text{and } P_{(6)ave} = 1605.753$$

Table 6 Evaluation results using 1st model

	No.	Structural formula of relationship between the final property and the control factors. $P_{\text{structural formula}}$	Calculated formula using our algorithm. P_{A-B-C}	Error %	Error % (level value $\times 0.1$)	Error % (level value $\times 10$)
Simple Equation	1	$P_{A-B-C}=4.32A-2.83B+0.334C-31.57$	$P_{A-B-C}=4.32A-2.83B+0.334C-31.57$	0.00	0.00	0.00
	2	$P_{A-B-C}=16.43 \ln(A)-8.823 \ln(B)+C^2+0.838$	$P_{A-B-C}=16.43 \ln(A)-8.823 \ln(B)+C^2+0.838$	0.00	0.00	0.00
	3	$P_{A-B-C}=2.68\exp(0.097A)+3.54B-1.2\exp(0.96C)-42.1$	$P_{A-B-C}=2.57\exp(0.098A)+3.54B-458\exp(-0.0006C)-498.9$	0.13		
	4	$P_{A-B-C}=1.89A^{1.32}+3.2B^{0.73}-0.27C^{3.02}+4.32$	$P_{A-B-C}=1.158A^{1.425}+276.8B^{0.044}+668.7C^{-0.45}-308.9$	0.37	0.00	
	5	$P_{A-B-C}=1.71A^2-12.76A+5.223B^2-12.11B-21.9C^2+1.02C+3.18$	$P_{A-B-C}=1.71A^2-12.76A+5.223B^2-12.11B-21.9C^2+1.02C+3.18$	0.00	0.37	0.00
Reciprocal control factor interaction A and C	6	$P_{A-B-C}=AC+3A-5B+C^2$	$P_{A-B-C}=8.5A+0.156B^2-9.375B+C^2+50C-246.713$	0.59	0.19	0.73
	7	$P_{A-B-C}=C \ln(A)-15B^2+1000$	$P_{A-B-C}=5.5 \ln(A)-2.997B^2-0.081B+3.898C+979.1$	0.01	0.00	0.00
	8	$P_{A-B-C}=-A^2+12AC-10B+\exp(C/A)$	$P_{A-B-C}=-A^2+98.99A+2.812B^2-82.74B+900C-4438.52$	1.77	2.08	1.74
	9	$P_{A-B-C}=4B^2-32A/(C+15)-\ln(B)+5C$	$P_{A-B-C}=-1.561A+4.015B^2-0.514B-0.185C^2+10.85C-523.5$	0.05	0.47	0.00
	10	$P_{A-B-C}=C^3/4A-3B+AC+240$	$P_{A-B-C}=5.482A+0.155B^2-7.343B+0.084C^2+0.155C-5.338$	0.48	0.01	0.83
	11	$P_{A-B-C}=1.5^CA+\exp(B/2)-5A+C^2-75$	$P_{A-B-C}=4.428A+70.18B^2-1321B+39.35C^2-232C+6176$	2.24	0.10	0.00
	12	$P_{A-B-C}=\ln(AC)+C^2/A-\sqrt{AC}-4B+125$	$P_{A-B-C}=-7.82\ln(A)-0.002B^2-3.919B-6\ln(C)+154.8$	0.20	0.00	0.09
	13	$P_{A-B-C}=(A/10)^{C/3}+A/C+(A-2C)-\ln(5B)-25$	$P_{A-B-C}=0.006A^2+5.775A+0.232B^2-6.569B+1.227C^2+23.09C-213.6$	1.99	0.36	9.0×10^6
	14	$P_{A-B-C}=\exp(3C/A) \times A/5+7B+AC-0.5B^2$	$P_{A-B-C}=5.653A-0.344B^2+2.644B+0.026C^2+50.55C-245.3$	0.87	0.18	1.18
	15	$P_{A-B-C}=AC^{1.85}-15A+(B-10)^2+130-\ln(A/C)$	$P_{A-B-C}=8.485A+2.183B^2-53.38B+0.655C^{3.95}-121.9$	3.49	0.02	1.54
Large Error %	16	$P_{A-B-C}=\exp(A/C)-0.7A^2+13.4B+55C-211$	$P_{A-B-C}=0.359\exp(0.025A)-2347B^2+5.8 \times 10^4B+5.7 \times 10^4C^2-6.8 \times 10^4C-5.1 \times 10^4$	1017	501.0	2×10^{47}
	17	$P_{A-B-C}=0.05A^C-2B^2-11B+0.5A^2-32C+1205$	$P_{A-B-C}=8205A^2-8.7 \times 10^5A+5.1 \times 10^4B^2-1.4 \times 10^6B+3.2 \times 10^6C^2-3.6 \times 10^7C+1.4 \times 10^8$	85.8	0.55	1.0×10^{118}
	18	$P_{A-B-C}=5AC^{A/2C}-12AC-35B^2+420$	$P_{A-B-C}=1.2 \times 10^4A^2-1.0 \times 10^6A-3.4 \times 10^4B^2+8.6 \times 10^5B+3.5 \times 10^5C^2-4.8 \times 10^6C+1.7 \times 10^6$	130.9	0.10	7.8×10^4

※Error % = $(\sum_{L=1}^{L=9} |P_{\text{structural formula}} - Eq_{(4)}| \div P_{\text{structural formula}} \times 100) \div 9$

■ : Error% > 50% ■ : Error% > 1% □ : Error% ≤ 1%

ラフである。自動のカーブフィット作業によって求めた式も図中に示してある。また、図4の題目中には図4中の各関係式 $f(A_x)$, $g(B_y)$, $h(C_z)$ と式(3)から計算した各制御因子の水準値の組合せと最終特性値 P の関数関係と、それを使用して計算した最終特性値の平均値 $P_{(6)ave}$ も示してある。これらの関数式には指数関数が含まれているので、指数関数の中に含まれる各制御因子の影響の平均値 E_{ave} の影響を分離することが困難であったため、式(5)と計算された関数式では指数関数の部分では多少異なる形となっているが、定数値が指数関数内で処理されているだけなので、式(5)と計算された関数式でそれぞれ計算した最終特性値の平均値 $P_{(6)ave}$ と $P_{(6)ave}$ 'の間で0.6%以下の違いであり、大きな影響はなかった。

その他の複雑な構造式を使用した評価結果を表6に示す。表4の制御因子とその水準値、および表5のL9直交表を使用した。誤差Error %は、評価のために使用した構造式 $P_{structural formula}$ と計算で求めた関係式 P_{A-B-C} 'の差を構造式 $P_{structural formula}$ で除し、それを百分率で表し、さらに、同様の計算を表5のL9直交表に従って9通りの計算、平均した値である(誤差Error % = $(\sum_{L1 \sim L9} |P_{structural formula} - P_{A-B-C}| \div P_{structural formula} \times 100) \div 9$)。また、表6には、表4の各水準値を全て1/10倍にした場合と、全て10倍にした場合のError %の計算結果も示してある(これは、高精度な計算結果を得るためのスケーリングではなく、制御因子の水準値の大小関係が計算結果に与える影響を検討するために行った)。構造式の中に、指数関数もしくは累乗関数が含まれ、さらに、定数値が含まれている場合には、本報のアルゴリズムでは各関数と定数値を分離することが困難であるため、最初に使用した構造式と計算した制御因子と最終特性値の関係式は多少係数値が異なっている。しかし、それを使用して計算した最終特性値の誤差は1%以下であり、実用的に利用可能であると考えられる。また、構造式中に交互作用(Tanabe, 2017)があり、その交互作用の項の影響が大きい場合には、各制御因子の水準値の組合せと最終特性値 P の関数関係を明らかにすることが困難であった。そのため、本手法は交互作用がない場合を前提条件として使用することにする(本手法は交互作用がある場合には困難である)。

3・2 最適最終特性値を得るための各制御因子の最適水準値の決定

式(3)を使用して最適な最終特性値 P を得るための制御因子A, B, C, Dの各水準値を決定する。図5に示すように、最適最終特性値を得るために、各制御因子の最適水準値を決定する。具体的には、①各制御因子の関数式の決定、②所望の最終特性値の入力(大, 小, 所望値)、③物理的, 時間的, 地理的, 金銭的等の条件や, 特許や作業的制約等を鑑み, 制御因子の可能変動範囲の入力、④逐次代入法による各制御因子の最適水準値の決定、⑤式(2)を用いて各制御因子の各最適水準値を用いた場合の最適最終特性値を計算する。この計算は、他の制御因子を固定し、1つの制御因子を変化させ、最終特性値を計算している。同様の計算を各制御因子について行い、その中から最終特性値の影響を調べている。また、これは交互作用がない場合を想定した場合の手順である。

これらのアルゴリズムを使用して、先の図2のフローチャートに従って、「最適条件探索プログラム」のプログラムをC言語で開発した。

Fig. 5 Procedure for calculation regarding the optimum final property with each optimum level value

3・3 各制御因子と最終特性値の関数関係の探索精度

ここでは、前節で使用した構造式(式(5))をベースにし、式(6)のように各制御因子の水準値の中に誤差 $\pm \Delta A_s$,

$$F_L = 6 e^{0.1(A_S \pm \Delta A_S)} + 2(B_T \pm \Delta B_T)^2 + 5(B_T \pm \Delta B_T) + 6(C_M \pm \Delta C_M) \quad (\text{Where } L = 1 \sim 9; S, T \text{ and } M = 1, 2 \text{ or } 3) \quad (6)$$

$\pm \Delta B_T$, $\pm \Delta C_M$ を追加した。その後、最終特性値の関数関係がこれらの誤差によってどのような影響を受けるかを評価した。表4の制御因子とその水準値、および表5のL9直交表を使用した。制御因子A, B, Cに含まれる誤差として、式(6)の ΔA_S , ΔB_T , ΔC_M がそれぞれ $\pm 1\%$, $\pm 3\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ の範囲内であると仮定して、誤差の影響をランダムに与え(10回)、最終特性値 P' の関数関係式をそれぞれ計算し、誤差の項のない構造式(式(5))の

$$\text{Error \%} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\sum_{L=1}^{L9} |P_{(6)} - P_{(6)}'| \div P \times 100) \div 9}{10} \quad \text{or}$$

$$\text{Error \%} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\sum_{L=1}^{L9} |P_{\text{structural formula}} - P_{A \cdot B \cdot C}'| \div P_{\text{structural formula}} \times 100) \div 9}{10}$$

Fig. 6 Relationship between the control factors A, B, C and the final property P using the experimental design (Structural formula (6): $P_{A \cdot B \cdot C} = 6 e^{0.1A} + 2B^2 + 5B + 6C$, and No.1 – 15 in Table 6)

最終特性値 P と比較し、その計算誤差を求めた。精度は 10 回の計算の平均値と標準偏差で評価した。同様の作業を、表 6 に示す 15 本の構造式 $P_{\text{structural formula}}$ に対して、最終特性値の関数関係式 P_{ABC} をそれぞれ計算し、その計算誤差を各 10 回ずつ求め、平均値と標準偏差での評価した結果を図 6 に示す。制御因子の水準値に含まれる誤差が $\pm 3\%$ 以下場合には精度よく推定ができているが、その誤差が $\pm 5\%$ になると、計算誤差が 2% から 17% と大きくなっている。そのため、制御因子の水準値に誤差影響が大きく含まれる可能性がある場合には、トライアル回数を増やして (N 値を大きくして)、水準値の精度を上げることが必要と考える。

4. 強アルカリ水ミスト強制冷却システムの最適稼働条件探索 (評価)

4・1 評価に使用する強アルカリミスト強制冷却における見かけ上の熱伝達率モデルの説明

開発した最適条件探索プログラムを評価するために、著者らの先の研究 (Tanabe, 2014) 「強アルカリ水に空気を混合することによる、見かけ上の熱伝達率を向上させる研究」で、見かけ上の熱伝達率の計算式を推定するために本手法を利用し、本手法の有効性を評価した。

先の研究では、強アルカリ水ミストを作成するために図 7 に示す自作ノズルで、図 8 に示す実験装置で見かけ上の熱伝達率を測定している。

Fig. 7 Schematic view of nozzle for mist of strong alkaline water

Fig. 8 Experimental set-up for measuring heat transfer coefficient regarding mist of strong alkaline water

また、この強アルカリ水ミストの冷却能力を制御するために、見かけ上の熱伝達率モデル (式(7)) が構築されている。この見かけ上の熱伝達率モデルは、まず、ミストの粘性係数と熱伝導率を 2 成分系混合気体の粘度推算の式と Wassiljewa の式から求めた (磯村, 水巻, 1959), (日本機械学会編, 1993)。つぎに、これらの値とミストの密度および比熱容量から、動粘性係数と熱拡散率を求めた (植田, 1981)。さらに、ミストの断面積と流量から流速を求めた。以上の数値からレイノルズ数とプラントル数を算出し、円柱に対する熱伝達率の関係式に適用することで、気化熱現象を考慮した見かけ上の熱伝達率が計算できる (日本機械学会編, 1986)。最終的に見かけ上の熱伝達率 h は式(7)から算出が可能である。

$$h = 0.6 \frac{\lambda_{\text{water}}}{L} Re^{0.58} Pr^{0.4} \quad (7)$$

ただし、

$$Re = \frac{(Q_{\text{air}} + Q_{\text{water}}) \times \left\{ \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{air}} + Q_{\text{water}}} \rho_{\text{air}} + \left(1 - \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{air}} + Q_{\text{water}}} \right) \rho_{\text{water}} \right\}}{\mu_{\text{mist}} \times \pi \left\{ L \tan \frac{\phi}{2} \right\}^2}$$

$$Pr = \frac{\mu_{\text{mist}} \left\{ \frac{\Psi \rho_{\text{air}} C_{\text{air}}}{\Psi \rho_{\text{air}} + (1-\Psi) \rho_{\text{water}}} + \frac{(1-\Psi) \rho_{\text{water}} C_{\text{water}}}{\Psi \rho_{\text{air}} + (1-\Psi) \rho_{\text{water}}} \right\}}{\frac{\lambda_{\text{air}} y_{\text{air}}}{y_{\text{air}} + \phi_1 y_{\text{water}}} + \frac{\lambda_{\text{water}} y_{\text{water}}}{y_{\text{water}} + \phi_2 y_{\text{air}}}}$$

$$\mu_{\text{mist}} = \frac{\mu_{\text{air}}}{1 + \frac{y_{\text{water}} \{1 + (\mu_{\text{air}} / \mu_{\text{water}})^{0.5} (M_{\text{water}} / M_{\text{air}})^{0.25}\}^2}{4 y_{\text{air}} \{2 + 2 (M_{\text{air}} / M_{\text{water}})\}^{0.5}}} + \frac{\mu_{\text{water}}}{1 + \frac{y_{\text{air}} \{1 + (\mu_{\text{water}} / \mu_{\text{air}})^{0.5} (M_{\text{air}} / M_{\text{water}})^{0.25}\}^2}{4 y_{\text{water}} \{2 (M_{\text{water}} / M_{\text{air}})\}^{0.5}}}$$

$$\Psi = \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{air}} + Q_{\text{water}}}$$

$$y_{\text{air}} = \frac{Q_{\text{air}} \rho_{\text{air}} / M_{\text{air}}}{Q_{\text{air}} \rho_{\text{air}} / M_{\text{air}} + Q_{\text{water}} \rho_{\text{water}} / M_{\text{water}}}$$

$$y_{\text{water}} = \frac{Q_{\text{water}} \rho_{\text{water}} / M_{\text{water}}}{Q_{\text{air}} \rho_{\text{air}} / M_{\text{air}} + Q_{\text{water}} \rho_{\text{water}} / M_{\text{water}}}$$

$$\phi_1 = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left(\frac{\mu_{\text{air}}}{\mu_{\text{water}}} \left(\frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{water}}} \right)^{0.75} \left(\frac{1 + 1.5 T_{\text{bair}} / T_{\text{water}}}{1 + 1.5 T_{\text{bwater}} / T_{\text{water}}} \right)^{0.5} \right)^2 \left(\frac{1 + 1.5 (T_{\text{bair}} T_{\text{bwater}})^{0.5} / T_{\text{water}}}{1 + 1.5 T_{\text{bair}} / T_{\text{water}}} \right) \right\}$$

$$\phi_2 = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left(\frac{\mu_{\text{water}}}{\mu_{\text{air}}} \left(\frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{air}}} \right)^{0.75} \left(\frac{1 + 1.5 T_{\text{bwater}} / T_{\text{water}}}{1 + 1.5 T_{\text{bwater}} / T_{\text{water}}} \right)^{0.5} \right)^2 \left(\frac{1 + 1.5 (T_{\text{bair}} T_{\text{bwater}})^{0.5} / T_{\text{water}}}{1 + 1.5 T_{\text{bwater}} / T_{\text{water}}} \right) \right\}$$

ここで、 λ_{water} は水の熱伝導率[W/m・K]， L は代表長さ[m]， Re はレイノルズ数， Pr はプラントル数， μ_{mist} はミスト粘性係数[Pa・s]， Ψ はボイド比， y_{air} は空気モル分率， y_{water} は水モル分率， ϕ_1 および ϕ_2 は結合係数， λ_{air} は空気熱伝導率[W/m・K]， ρ_{air} は空気密度[kg/m³]， ρ_{water} は水密度[kg/m³]， μ_{air} は空気粘性係数[Pa・s]， μ_{water} は水粘性係数[Pa・s]， M_{air} は空気分子量[kg/mol]， M_{water} は水分子量[kg/mol]， C_{air} は空気比熱容量[J/kg・K]， C_{water} は水比熱容量[J/kg・K]， T_{bair} は空気沸点[K]， T_{bwater} は水沸点[K]， Q_{air} は空気流量[m³/s]， Q_{water} は水流量[m³/s]， L はノズル先端と冷却箇所との直線距離[m]， ϕ はノズル噴出角度[°]， T_{water} は水温[K]である．この式(7)の計算精度は，先の研究で，計算値と実験値の誤差は-27%~19%であった．この誤差の原因については，計算の際にノズルの噴出口においてミストの粒子が均一に分散していると仮定しているが，実際のミストの噴射については均一に分散しておらず，これにより誤差が生じたものと考えている．

本報では，この複雑な見かけ上の熱伝達率モデル（式(7)）を使用し，開発した最適条件探索プログラムを評価することにした．

4・2 本プログラムを用いた強アルカリミスト強制冷却システムの最適稼動条件の探索

本プログラムの評価のために，強アルカリ水ミスト強制冷却システムの最適稼動条件探索を行う．表7に制御因子を示す．前節の見かけ上の熱伝達率モデル（式(7)）の中で，熱伝達率に大きな影響を及ぼす制御因子として，

Table 7 Control factors for evaluation

Control factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Water flow rate ℓ/min	0.5	1.875	3.25	4.625	6
Air flow rate ℓ/min	20	25	30	35	40
Outlet area m ²	1.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.5×10^{-5}	3.0×10^{-5}
Angle of injection °	8	12	18	24	28

Table 8 Orthogonal array and final properties in an experimental design

Control factors					Heat transfer coefficient (Experimental results)	Control factors					Heat transfer coefficient (Experimental results)
No.	Water flow rate ℓ/min	Air flow rate ℓ/min	Outlet area m ²	Angle of injection °		No.	Water flow rate ℓ/min	Air flow rate ℓ/min	Outlet area m ²	Angle of injection °	
1	0.5	20	1.0×10 ⁻⁵	12	8129.042	13	3.25	30	3.0×10 ⁻⁵	15	14245.792
2	0.5	25	1.5×10 ⁻⁵	15	6690.322	14	3.25	35	1.0×10 ⁻⁵	18	11683.393
3	0.5	30	2.0×10 ⁻⁵	18	5734.165	15	3.25	40	1.5×10 ⁻⁵	21	9890.731
4	0.5	35	2.5×10 ⁻⁵	21	5049.007	16	4.625	20	2.5×10 ⁻⁵	15	16553.956
5	0.5	40	3.0×10 ⁻⁵	24	4531.111	17	4.625	25	3.0×10 ⁻⁵	18	13525.915
6	1.875	20	1.5×10 ⁻⁵	18	8483.119	18	4.625	30	1.0×10 ⁻⁵	21	11409.836
7	1.875	25	2.0×10 ⁻⁵	21	7263.390	19	4.625	35	1.5×10 ⁻⁵	24	9850.014
8	1.875	30	2.5×10 ⁻⁵	24	6358.902	20	4.625	40	2.0×10 ⁻⁵	12	22558.824
9	1.875	35	3.0×10 ⁻⁵	12	14756.968	21	6	20	3.0×10 ⁻⁵	21	12797.347
10	1.875	40	1.0×10 ⁻⁵	15	11639.933	22	6	25	1.0×10 ⁻⁵	24	11023.928
11	3.25	20	2.0×10 ⁻⁵	24	7902.456	23	6	30	1.5×10 ⁻⁵	12	25194.553
12	3.25	25	2.5×10 ⁻⁵	12	18194.806	24	6	35	2.0×10 ⁻⁵	15	19586.816
						25	6	40	2.5×10 ⁻⁵	18	15954.704

※ $P_{(8)ave}=11960.361$

(a) Control factor A (Water flow rate)

(b) Control factor B (Air flow rate)

(b) Control factor C (Outlet area)

(d) Control factor D (Angle of injection)

Fig. 9 Relationship between the control factors A, B, C and the final property P in the experiment.

稼働条件では強アルカリ水流量と供給空気流量の2つ、ノズルの設計条件ではノズルの噴射口断面積と噴射角度の2つの合計4つを使用する。本報では、その他、ノズルと冷却箇所の距離(=50 mm)、強アルカリ水温(=20℃)は固定した。各制御因子の水準は、計算する見かけ上の熱伝達率モデルが高次になることを考え各5水準とし、その水準値は実験装置の都合を考慮しながら、物理的最大値と最小値の間を4等分して設定した。表8に示すように、表7の各制御因子の水準値をL25直交表に従って割り付け、さらに、前節の見かけ上の熱伝達率モデル(式(7))を使用して割り付けられた水準値の組合せのときの見かけ上の熱伝達率を計算した結果も示してある。カーブフィットでは、多項式の4次までを次数として選択した。

つぎに、図9に各制御因子(強アルカリ水流量、供給空気流量、ノズルの噴射口断面積、噴射角度)と最終特性値(見かけ上の熱伝達率)への影響の関係を示す。図中には自動のカーブフィットによって明らかにされた関数式(式(8))を示す。このように、各制御因子と最終特性値 P への影響の関数関係を明らかにすることができた。

$$\left. \begin{aligned} E_A &= -7.95 A^4 + 126.6 A^3 - 791.5 A^2 + 4027 A + 4196 \\ E_B &= 0.3414 B^4 - 40.66 B^3 + 1775 B^2 - 33484 B + 241247 \\ E_C &= 4.182 \times 10^{22} C^4 - 3.084 \times 10^{18} C^3 + 6.812 \times 10^{13} C^2 - 3.291 \times 10^8 C + 9922 \\ E_D &= 0.02879 D^4 - 4.885 D^3 + 256.0 D^2 - 5859 D + 59052 \end{aligned} \right\} (8)$$

これは、カーブフィットで多項式4次までを選択し、最小二乗法で計算した結果であるが、 E_A , E_B , E_D の式に関しては4次の係数が小さく、結果としてもっと小さい次数でも有効なカーブフィットが可能であると考えられる。また、 E_B は図9(b)に示すように回帰式であるため多くの変曲点を持っており、実験データの傾向を適確には表わしていない。そのため、制御因子Bの供給空気流量に関しては、この変曲点部分(21.5, 31.0, 37.0 l/min)を新たな制御因子Bの水準値として、見かけ上の熱伝達率モデル(式(7))で計算した結果を図9(b)に○印で示す。図中の○印が E_B の式に近い所にある場合は、そのまま E_B の式を使用するが、○印が E_B の式に近い所がない場合は、制御因子Bの水準数と多項式の次数を増やして、同様手順で計算を行う必要がある。本報では、このまま E_B の式を使用することにした。そのため、このことが見かけ上の熱伝達率推定の際の誤差となる。

次に、各制御因子(強アルカリ水流量、供給空気流量、ノズルの噴射口断面積、噴射角度)と最終特性値(見かけ上の熱伝達率)のそれぞれの関係を、加法性を使用して統合した関係を式(9)に示す。

$$\begin{aligned} P_{ABCD} &= -7.95 A^4 + 126.6 A^3 - 791.5 A^2 + 4027 A \\ &\quad + 0.3414 B^4 - 40.66 B^3 + 1775 B^2 - 33484 B \\ &\quad + 4.182 \times 10^{22} C^4 - 3.084 \times 10^{18} C^3 + 6.812 \times 10^{13} C^2 - 3.291 \times 10^8 C \\ &\quad + 0.02879 D^4 - 4.885 D^3 + 256.0 D^2 - 5859 D \\ &\quad + 278536 \end{aligned} \quad (9)$$

熱伝達率を物理的現象からモデル化した先の研究の見かけ上の熱伝達率モデル(式(7))に比べて、ノズルの噴射口断面積と噴射角度の4つのパラメータを使用して、構成される極めてシンプルな代数式になっている。

最後に、本節で構築した強アルカリミスト強制冷却システムの最適稼働条件の探索のための見かけ上の熱伝達率計算モデルを使用して、最適稼働条件の探索する。計算モデルは、稼働条件として強アルカリ水流量と供給空気流量の2つ、ノズルの設計条件としてノズルの噴射口断面積と噴射角度の2つの合計4つの変数で構成されているが、ここでは最適稼働条件探索のために、ノズルは図7を使用することとして、噴射口断面積 $=1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、噴射角度 $=12^\circ$ に固定する。また、現有の装置の変更範囲内で強アルカリ水流量を0.5~6 l/min、供給空気流量を20~40 l/minとして、逐次代入法を用いて最終特性値である見かけ上の熱伝達率が最大になる最適条件を探索する。表9に、「最適条件探索プログラム」を使用して計算で求めた最適条件とそのときの見かけ上の熱伝達率、また、同条件の実験で測定した見かけ上の熱伝達率をそれぞれ示す。また、先の研究の見かけ上の熱伝達率モデルで計算した結果も示した。本節で構築した強アルカリミスト強制冷却システムの最適稼働条件の探索のための見かけ上の熱伝達率計算モデルで計算した結果は、先の研究の見かけ上の熱伝達率モデルで計算した結果と比較す

Table 9 The forced cooling optimum and heat transfer coefficient using the strong alkaline water mist(at $L = 50$)

Calculation model	Water flow rate ℓ/min	Air flow rate ℓ/min	Outlet area m^2	Angle of injection $^\circ$	Heat transfer coefficient by the calculation $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Heat transfer coefficient by the experiment $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
Calculation using eq. (7)	6	40	1.66×10^{-5}	12	25673	26523
Calculation using eq. (9) (This paper)	6	40	1.66×10^{-5}	12	24014

Fig. 10 Relationship between the heat transfer coefficient and the water flow rate and the air flow rate in the experiment.

ると、誤差は6.5%となった。この結果は、本プログラムによって容易に求まる結果として、十分に機能を果たしていると考えられる。また、各計算結果と実験結果も良くあっている。

最後に、本節で構築した強アルカリミスト強制冷却システムの最適稼働条件の探索のための見かけ上の熱伝達率計算モデルと先の研究の見かけ上の熱伝達率モデルの両方を用いて、強アルカリ水流量と供給空気流量を変化させたときの見かけ上の熱伝達率の計算結果を図10に示す。このとき、噴射口断面積は $1.66 \times 10^{-5} \text{m}^2$ 、噴射角度は 12° とした。最適条件のときが見かけ上の熱伝達率が最も大きいことがわかる。このように、本手法を使用することで、各制御因子と最終特性値 P の関数関係を明らかにすることが可能であり、それを使用して最適条件を計算することも可能であり、工業的にも有効に利用可能であった。また、この各制御因子と最終特性値 P の関数関係は、管理のデータベースとしても有効に利用可能である。

5. 結 言

実験計画法結果をもとに、各制御因子と最終特性値 P の関数関係を明らかにするアルゴリズムを構築し、最適条件を探索するプログラムを開発し、評価した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 各制御因子と最終特性値 P の関数関係を明らかにするアルゴリズムが構築できた。

- (2) このアルゴリズムを使用した計算精度は、制御因子 A, B, C に含まれる誤差 ΔA_s , ΔB_T , ΔC_M がそれぞれ $\pm 1\%$, $\pm 3\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ の範囲内で、それぞれ $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 18\%$, $\pm 47\%$ だった。
- (3) 強アルカリ水ミストの強制冷却実験では、その最適条件を容易に探索することができ、本手法の工業的有効性が評価できた。

文 献

- 藤川真一郎, 品質工学による 3 次元鍛造変形の有限要素解析パラメータの最適設計, 塑性と加工, Vol.40, No.466 (1999), pp.1061-1065.
- 井山徹郎, 田辺郁男, 高橋勉, 超硬金型の自動ラッピングシステムにおけるラップ剤の最適化とその評価, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.749 (2009), pp.210-215.
- 磯村依和男, 水巻哲, 混合ガスとして算出した湿り空気の粘度, 化学工学, Vol.23, No.7 (1959), pp.467-470.
- 神蔵一義, 大工原徹, 渡邊泰行, セミドライによる高速深穴加工条件の最適化, 品質工学, Vol.14, No.1 (2006), pp.93-100.
- 小村昭義, 小橋啓司, 岩重健五, 服部憲一, 渡辺孝, 回転通風機に関するパラメータ設計, 品質工学, Vol.20, No.3 (2012), pp.116-122.
- 水谷淳之介, 浜本智, 向山俊博, 田辺郁男, 山田泰弘, エッチングを用いた微細加工の機能性評価, 品質工学, Vol.10, No.1 (2002), pp.84-90.
- 森泰彦, 山田喜直, 杉浦晃治, 森義和, 中島建夫, 消臭不織布マスクの開発, 品質工学, Vol.24, No.1 (2016), pp.22-29.
- 西岡孝夫, 伊藤邦夫, 小径ドリル穴の高速加工の検討, 品質工学, Vol.12, No.3 (2004), pp.85-89.
- 清水裕浩, 武澤泰則, 天谷浩一, 矢野宏, マシニングセンタの工具マガジンの直行表を用いたソフトウェア評価, 品質工学, Vol.24, No.1 (2016), pp.15-21.
- Tanabe, I., Development of Forced cooling using mist of strong alkaline water for restraining thermal deformation on a machine tool, MM Science Journal, December (2014), pp.521-526.
- Tanabe, I., Sakamoto, H. and Miyamoto, T., Development of innovative tool using Taguchi-Methods, AASRI Procedia, Vol.9 (2014), pp.107-113.
- Tanabe, I., Development of a tool for the easy determination of control factor interaction in the design of experiments and the Taguchi methods, WSEAS Transactions on Electronics, Vol.8 (2017), pp.59-65.
- 日本機械学会編, 伝熱工学資料, 改訂第 4 版 (1986), p.122.
- 日本機械学会編, 伝熱ハンドブック (1993), pp.423-427.
- 植田辰洋, 気液二相流-流れと熱伝達-, 株式会社養賢堂 (1981), p.11.
- 結城宏信, 甲斐大介, マハラノビス・タグチ法の AE 波初動部同定への適用, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.797 (2013), pp.145-149.

References

- Fujikawa, S., Optimum parameter design using the Taguchi method for finite-element analysis of 3D forging deformation, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.40, No.466 (1999), pp.1061-1065 (in Japanese).
- Iyama, T., Tanabe, I. and Takahashi, T., Optimization of lapping slurry in automatic lapping system for dies with cemented carbide and its evaluation, Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.749 (2009), pp.210-215 (in Japanese).
- Isomura, I. and Mizumaki, T., The viscosity of humid air, Chemical engineering of Japan, Vol.23, No.7 (1959), pp.467-470 (in Japanese).
- Kamikura, K., Daikuhara, T. and Watanabe, Y., Optimization of high speed deep-hole drilling conditions with mist coolant, Journal of Quality Engineering Society, Vol.14, No.1 (2006), pp.93-100 (in Japanese).
- Komura, A., Kobashi, K., Iwashige, K., Hattori, K. and Watanabe, T., Parameter design for air-cooling of rotating machine, Journal of Quality Engineering Society, Vol.20, No.3 (2012), pp.116-122 (in Japanese).
- Mizutani, J., Hamamoto, S., Mukaiyama, T., Tanabe, I. and Yamada, Y., Functional evaluation of a micro-polishing process by a combined method of physical and chemical treatments, Journal of Quality Engineering Society, Vol.10, No.1 (2002),

pp.84-90 (in Japanese).

- Mori, Y., Yamada, Y., Sugiura, K., Mori, Y. and Nakajima, T., Development of the nonwoven fabric mask with a deodorant function, Journal of Quality Engineering Society, Vol.24, No.1 (2016), pp.22-29 (in Japanese).
- Nishioka, T. and Ito, K., Study of conditions for microdrilling process with high-speed spindle, Journal of Quality Engineering Society, Vol.12, No.3 (2004), pp.85-89 (in Japanese).
- Shimizu, Y., Takezawa, Y., Amaya, K. and Yano, H., Machining center tool magazine software evaluation using an orthogonal array, Journal of Quality Engineering Society, Vol.24, No.1 (2016), pp.15-21 (in Japanese).
- Tanabe, I., Development of Forced cooling using mist of strong alkaline water for restraining thermal deformation on a machine tool, MM Science Journal, December (2014), pp.521-526.
- Tanabe, I., Sakamoto, H. and Miyamoto, T., Development of innovative tool using Taguchi-methods, AASRI Procedia, Vol.9 (2014), pp.107-113.
- Tanabe, I., Development of a tool for the easy determination of control factor interaction in the design of experiments and the Taguchi methods, WSEAS Transactions on Electronics, Vol.8 (2017), pp.59-65.
- The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME data book: heat transfer, 4th edition (1986), p.122, (in Japanese).
- The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME heat transfer handbook (1993), pp.423-427, (in Japanese).
- Ueda, T., Gas-liquid two-phase flows, Yokendo Inc. (1981), p.11 (in Japanese).
- Yuki, H. and Kai, D., Application of Mahalanobis-Taguchi method to identification of the initial motion part in acoustic emission waveforms, Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.797 (2013), pp.145-149 (in Japanese).