摩擦圧接工程設計支援エキスパートシステムの構築*

(第2報, ファジィ推論による候補圧接条件の修正システム)

ス ヨ ト^{*1}, 黒 沢 敏 朗^{*2}
小 川 恒 一^{*3}, 竹 原 明 伸^{*4}

Development of Expert System for Assisting Process Planning of Friction Welding

(2nd Report, Modifying System of Candidate Welding Conditions Using Fuzzy Reasoning)

SUYOTO, Toshiro KUROZAWA,
Koichi OGAWA and Akinobu TAKEHARA

The conditions for friction welding are determined based on trial and error. Even an expert often needs a large amount of time to determine the optimum conditions. Hence, we have developed an expert system which selects the proper welding conditions for various materials. To store and access complex data based on experiments and literature, knowledge of friction welding is represented in production rules which are extended to the frame structures. This system contains the case-based reasoning method which utilizes selecting and modifying functions. In the case in which the input factors do not correspond to the observed data, this system selects the candidate welding conditions automatically and modifies those conditions based on the difference between input and observed data. Modification quantities are estimated by fuzzy reasoning; thus the estimates can be derived from the minimum number of parameters for all input factors. By some experiments, the system is proven to be capable of assisting process planning of friction welding for joining of carbon steel.

Key Words: Pressure Welding, Friction Welding, Process Planning, Expert System, Knowledge Base, Case-Based Reasoning, Fuzzy Set Theory

1. はじめに

摩擦圧接法は、摩擦熱を有効に利用して固体を接合する方法であり、多くの機械部品の接合に採用され、さらに増加すると予想されている。接合工程は単純であるが、被圧接材の種類、寸法、形状などの圧接要因が多様であるので、工程設計を行うには専門家による過去の経験と多数の実験が必要で、多大の時間と労力を必要とする。このような試行錯誤的な工程設計では、圧接要因の種類の増加への対応が非常に困難である。また、専門家の数も次第に減少しつつある。

そこで、摩擦圧接の工程設計が初心者でも簡単かつ確実にできることをめざして、筆者らは摩擦圧接工程設計を支援するエキスパートシステムのプロトタイプを構築した⁽¹⁾。このシステムでは知識をルール、フレームおよび実験式で表現し、推論方法として実績値による推論、拡張値による推論および実験式による圧

接条件の推定を用いた。入力要因に対応した圧接要因の実績値がない場合には、確信度を減少させて拡張して適用できる実績値をそのまま利用している。

しかし、このシステムでは(1)拡張できる範囲が狭く、(2)正確な確信度の設定が困難という問題がある。そこで、摩擦圧接工程設計に関する知識を改めて明確にし、知識ベースに必要な実績値の修正機能を加える。つまり、類似性のある実績値をそのまま利用するのではなく、適切な修正量を与えることにより、拡張できる実績値が増える。その場合には、確信度の減少量を考慮しなくてもよい。

2. 摩擦圧接工程設計に関する知識

前報と同様に、本研究では、加工手順や使用工具はあらかじめ決まっていることを前提にしているので、工程設計とは被圧接材の圧接要因に最適な圧接条件を決めることを意味する。また、入力する圧接要因の因子も同様に固定側と回転側の材料区分、材質、形状、寸法の8つのデータおよびブレーキ時間の設定値である。一方、出力される圧接条件の因子は摩擦時間、摩擦圧力、アブセット圧力および回転数である。

* 1994年10月4日 第2回機械材料・材料加工技術講演会において講演、原稿受付 1995年4月19日。

^{*1} 准員、摂南大学大学院 (〒572 寝屋川市池田中町17-8) [現：大阪府立大学大学院]。

^{*2} 正員、摂南大学工学部。

^{*3} 正員、大阪府立大学総合科学部 (〒593 堺市学園町1-1)。

^{*4} 大阪短期大学 (〒587 大阪府南河内郡美原町平尾1060-1)。

ここでは、知識とは摩擦圧接の工程設計に関する知識を指し、コンピュータの利用を前提にしたので、知識は実績値によるものと発見的なものに分ける。前者は文献や今までの実験データを基に、各被圧接材の圧接要因と圧接条件の因子、圧接要因の可能な組合せ、圧接条件の選定などの実績値の工程設計に関するデータを収集した。後者は、前者の補完として、熟練工程設計者が経験的に工程設計を決定するときの考え方や方法に関する知識であり、摩擦圧接工程設計の専門家から直接聞き取りすることによって収集した。それらから得た知識は下記のとおりまとめられる。

(1) 圧接要因の値をみて、圧接条件を決める。その際、過去の実績値がある場合、そのまま利用する。

(2) 過去の実績値がない場合、新規に圧接条件を決める。その際、「近いデータ」を参考にして圧接条件の値を大きくしたり小さくしたりする。「近いデータ」は被圧接材の圧接要因の値に比較して類似性があるとみる実績値のことである。その圧接条件の値を修正するとき、両方の圧接要因の値の差を考慮する。

(3) 「近いデータ」がない場合は、作業標準⁽²⁾などに定められた基準を参考にして圧接条件を決める。この場合は理論式を用いて圧接条件を推定することになるが、とりうる圧接要因の値の幅が限られているうえ、近似的な圧接条件の値が得られるに過ぎない。

(4) 求めた圧接条件に対しては実験を行って確認する。妥当であれば新規の実績値として扱い、妥当でない場合は工程設計を変更する。

それらの知識によれば、前報のシステムには実績値の修正機能を整備する必要があることがわかる。つまり、ユーザが入力した圧接要因に対して、それに適する候補となる実績値を検索し、必要に応じて修正する機能が要求される。

3. システムの概要

本システムは事例ベース推論(CBR)システム⁽³⁾の考えを基に開発された。CBRシステムは事例の検索機能と修正機能から構成されるが、本システムの構成は図1に示すとおりである。太い矢印は圧接条件の推論や推定の流れを示し、細い矢印はデータの交換の方向を示している。また、点線はシステム外でのデータの整理やその流れ方向を示している。

ユーザから入力したデータは、まず、検索用のデータに変換され、材料の組合せ、寸法およびブレーキ時間の設定値になる。その圧接要因の値を基に、実績値の有無を確認し、一致する実績値があれば、そのまま出力されるが、存在しない場合は圧接要因の類似度を参考にして候補圧接条件の実績値が実績値ベースの中から自動的に検索される。類似度は数値化された材料の組合せ、寸法およびブレーキ時間といった圧接要因の入力値と実績値との差(以下、圧接要因の値の差という)に基づいて計算される。次のステップは、その候補圧接条件の値をより適切な値に修正するが、修正量は圧接要因の値の差を考慮してファジィ推論⁽⁴⁾によって決める。

Fig. 1 Structure of entire system

上記の推論は実績値あるいは候補実績値が存在する場合に有効であるが、それらのデータは必ず存在するわけではないので、この場合は、実験式を用いて圧接条件を推定する。

このように、本システムでは実績値の検索・修正機能と圧接条件の推定機能を整備することによって、入力した圧接要因の値に一致する実績値がない場合でも可能な圧接条件が推論される。

システムから出力された圧接条件の妥当性は実験で確認し、妥当であれば新規の圧接条件の実績値として実績値ベースに格納するが、妥当でない場合はそれらのデータを参考にして知識ベースを修正する。その際、フレーム構造での知識表現を用いるため、知識ベースの変更が容易である。

4. 候補圧接条件の求め方とその修正方法

4・1 実績値ベースの構成 実績値ベースには検索される実績値が格納され、表1に示すフレームで表現した。

Table 1. Frame of the observed-data

No	Welding Factors	C	D	B	t1	P1	P2	N
1	S45CS0 15 Brake_S	0.45	15	0.3	5.5	10	18	2500

ここで、第1列はデータのレコード番号であり、データの検索やソートに用いられる。第2列は材料の組合せ、寸法およびブレーキ時間の値を示したものである。C列には材料の組合せを数値化したものを記入するが、ここでは、含有炭素量の平均値を採用した。D列には寸法の値を、Bの列にはブレーキ時間の値をそれぞれ記入する。それらの値は候補実績値の決定に用いられる。最後の4列は圧接条件の実績値である。すなわち、t1列には摩擦時間、P1列には摩擦圧力、P2列にはアプセット圧力、N列には回転数が格納され、候補圧接条件のデータとして用いられる。表1の例ではS45Cの中実材あるいはそれとほぼ同じ材料の組合せ (S45CS0) で、直径15mm、ブレーキ時間0.3秒以上0.6秒未満に対応した実績値があることを示す。

4・2 類似度の定義 入力した圧接要因の値に対して、まず、それに類似した実績値を検索する。つまり、候補実績値かどうかの判断は類似度に基づいて決める。類似度を求める際、あらかじめ圧接要因の値の差を式(1)により計算する。

$$D_i = a + b|x_{1i}| + c|x_{2i}| + d|x_{3i}| \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $i=1,2,\dots,n$ である。

ここで、 D_i は n 個ある圧接要因の実績値のうちの i 番目のものに対する圧接要因の値の差であり、 x_{1i} 、 x_{2i} 、 x_{3i} はそれぞれ材料の組合せ、寸法、ブレーキ時間の差である。 a は材料区分毎に与える定数である。 b 、 c 、 d は重み係数であり、各要因の重要性や使用する圧接機の制約などを考慮して経験的に決める。

ここで、数値型でない圧接要因の因子 (材料の組合せ) については、被圧接材の性質などを考慮して数値化する。それらは材料によって異なるので、材料区分毎に作成する。本システムでは炭素鋼、アルミニウムと合金鋼のものを格納するための枠組みを作成したが、現段階では実験で確認したのは摩擦圧接で利用頻度の高い機械構造用炭素鋼のみである。その化学成分の中で材料の強度に比例するのは含有炭素量 (C) のみであり、他の成分はほぼ一定である⁽⁵⁾。したがって、数値化する成分は含有炭素量とした。

なお、圧接要因の値の差が大きいくほど、類似度が低くなるので、 D_i を用いて式(2)で与える。

$$S_i = (100 - D_i) (\%) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S_i は i 番目の実績値の類似度である。

4・3 候補圧接条件の決定と修正 実績値の類似度がある値以上であれば候補実績値とし、その中に含まれる圧接条件を候補圧接条件とする。その候補実績値の類似度が100%未満であれば、圧接要因の入力値と実績値が一致していないという意味であるので、候補圧接条件の値を修正する。その場合、炭素含有量、直径、ブレーキ時間の差によって適切な修正量を与える。その差を記述する可能な組合せは多数存在しうが、ファジィ推論⁽⁴⁾を適用することで、最小の組合せの数ですべての実績値に対応できるようにした。

修正する圧接条件の因子は摩擦時間、摩擦圧力、アプセット圧力および回転数であるが、アプセット圧力は摩擦圧力に比例することがわかっているので、決めなければならない修正量は摩擦時間、摩擦圧力と回転数の修正量の3つである。

4・4 確信度 確信度はいくつかの候補がある場合、どの値がより妥当であるかを定める基準として不可欠な要素であるが、その値の設定はあいまいである。しかし、ファジィ推論では「近いデータ」をそのまま使うのではなく、圧接条件の値を適切に修正するので、確信度を考慮しなくてもよいという長所がある。

5. ファジィ推論による修正量の推定

5・1 入出力のパラメータ ファジィ推論の入力パラメータとしては、炭素含有量の差、直径の差、ブレーキ時間の差の3つであり、出力パラメータは摩擦時間と回転数の修正量である。

5・2 圧接要因の差のメンバーシップ関数 入力した圧接要因の値が実績値と多少異なっても、圧接条件の実績値をそのまま使えることも多いが、そのずれを許容しうる区間はいまいである。したがって、圧接要因の差はファジィ集合で表現するのが妥当である。ここでは図3に示すように、メンバーシップ関数は炭素含有量の差を3分割で、直径の差を3分割で、ブレーキ時間の差を2分割で作成した。その分割方法とグレードの与え方は、実績や経験などの知識に基づいている。たとえば、実績値より入力値の方が炭素含有量が少ない場合には、実績値をそのまま利用できるが、逆の場合はむずかしいという非対称性のあることが知られている。この場合、実績値と入力値との差はプラスであるから、図3(a)ではプラス側にはグレードをあまり減少させず、逆にマイナス側には大きく減少させることで、このような非対称性を表している。直径については対象性があるので図3(b)となり、ブレーキ時間については短い方には適用できるので図3

Fig. 3 Membership function of differences of welding factors

(c)のような非対称に設定している。

5・3 ルール ファジィ推論は図4に示すような if-then 形式のルールに基づいて行う。前件部には炭素含有量の差 (x_1)、寸法の差 (x_2) およびブレーキ時間の差 (x_3) を記述する。 A_{1i} , A_{2i} , A_{3i} はそれぞれのファジィ分割変数である。一方、後件部には式を3つ記述し、圧接条件の修正量を推定する。 y_i' は i 番目のルールに用いられる候補摩擦時間の修正量を示す変数で、 a_i' , b_i' , c_i' , d_i' はそれに必要な係数である。 y_i'' は候補摩擦圧力の修正量を示す変数で、 a_i'' , b_i'' , c_i'' , d_i'' はそれに関する係数である。同様に、 y_i^N は候補回転数の修正量で、 a_i^N , b_i^N , c_i^N , d_i^N はそれに関する係数である。

if : x_1 is A_{1i} , x_2 is A_{2i} , x_3 is A_{3i}
 then : $y_i' = a_i' + b_i'x_1 + c_i'x_2 + d_i'x_3$
 $\& y_i'' = a_i'' + b_i''x_1 + c_i''x_2 + d_i''x_3$
 $\& y_i^N = a_i^N + b_i^Nx_1 + c_i^Nx_2 + d_i^Nx_3$

Fig.4 Type of fuzzy reasoning rule

なお、ファジィ数のすべての組合せを考慮すると、ルール数は18個、後件部の式に必要な係数は216個となり、それらは6章で述べる実験によって求められる。

5・4 前件部の適合度 x_1, x_2, x_3 に対して、 m 個のルールが当てはまるとすると、 j 番目のルールの適合度 ω_j を式(3)のファジィ積で定義する。ここで $A_{1j}(x_1)$, $A_{2j}(x_2)$, $A_{3j}(x_3)$ はそれぞれのファジィ分割変数である

$$\omega_j = \min \{ A_{1j}(x_1), A_{2j}(x_2), A_{3j}(x_3) \} \quad (3)$$

ただし、 $j = 1, 2, \dots, m$ である。

5・5 修正量の決定とその利用 m 個のルール全体からの推論結果を y^* (全体の摩擦時間の修正量)、 y^{P*} (全体の摩擦圧力の修正量) および y^{N*} (全体の回転数の修正量) とすると、それは式(4)～式(6)で示される重み付き平均で与えられる。

$$y^* = \frac{\omega_1 y_1' + \omega_2 y_2' + \dots + \omega_m y_m'}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m} \quad (4)$$

$$y^{P*} = \frac{\omega_1 y_1'' + \omega_2 y_2'' + \dots + \omega_m y_m''}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m} \quad (5)$$

$$y^{N*} = \frac{\omega_1 y_1^N + \omega_2 y_2^N + \dots + \omega_m y_m^N}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m} \quad (6)$$

それらの値を用いて候補圧接条件の値を次のように修正する。

- (1) 摩擦時間: $t_1' = t_1 + y^t$
- (2) 摩擦圧力: $P_1' = P_1 + y^p$
- (3) アプセット圧力: $P_2' = 1.5P_1 \sim 2.0P_1$
- (4) 回転数: $N' = N + y^N$

ここで、 t_1, P_1, P_2, N は i 番目の候補圧接条件の実績値とした t_1, P_1, N を修正した圧接条件の因子である。

以上の修正値は1つの候補圧接条件の実績値から推定したものである。一般には l 個の候補圧接条件の実績値が存在するので、同じ推論を l 回繰り返す。たとえば、摩擦時間についての最終的な圧接条件は式(7)で推定される。

$$t_1 = \frac{D_1 t_1' + D_2 t_2' + \dots + D_l t_l'}{D_1 + D_2 + \dots + D_l} \quad (7)$$

ここで、 $t_1', t_2', \dots, t_l'$ は各候補圧接条件から修正した摩擦時間であり、 $D_1, D_2, \dots, D_l$ は式(1)のそれぞれの圧接要因の値の差である。他の圧接条件の因子も同様の方法で求める。

6. 各ルールの係数を求めるための実験

6・1 実験方法 実験では圧接要因(炭素含有量、直径、ブレーキ時間)に対する圧接条件(摩擦時間、摩擦圧力、回転数)の変化を調べる。しかし、炭素鋼の摩擦圧接ではそれらの圧接条件の値がある値以上になると、接合した材料の強度は一定になり、圧接条件の変化は見られない。そこで、本実験では最小の圧接条件の値で接合したものを採用する。

(1) 炭素含有量に対する圧接条件の変化

炭素含有量の変化に伴って摩擦時間、摩擦圧力と回転数の値はどう変わるかを調べる。たとえば、ある最小の摩擦時間の値で被圧接材が接合できれば、その値を最適な摩擦時間とする。このとき、他の条件は3通りの値を設定した。それぞれの材料に対して1つ以上の最適な摩擦時間の値が得られるので、それらの平均値をとる。実験対象となる材料はS25C, S30C, S35C, S40C, S45Cである。摩擦圧力および回転数も同様な方法で最適な値の平均値を得る。

(2) 寸法に対する圧接条件の変化

(1)と同様に、寸法の値の変化に伴って摩擦時間、摩擦圧力と回転数の値はどう変わるかを調べる。対象となる寸法パラメータは直径であり、その値は11mm, 13mm, 14mm, 16mmである。

(3) ブレーキ時間に対する圧接条件の変化

ブレーキ時間の値の変化に伴って摩擦時間、摩擦圧力と回転数の値はどう変わるかを調べる。実験の方法は(1)と同様である。対象となるブレーキ時間の値は0.3sec, 0.6sec, 1.2secである。

6. 2 実験結果とその整理 筆者らの実験で得られたデータを表3に記入する。

Table 3. The observed-data

No.	Material	Diameter	Braking	t1	P1	N
1	S25CS0	6	0.3	2.5	25	2300
2	S25CS0	6	0.6	2.5	20	2250
3	S35CS0	9	0.3	3.0	30	2500
...						

次に、決められた範囲内の各レコード(1行のデータ)と他のレコードとの差を表4に記入する。ここに、 x_1, x_2, x_3 はそれぞれ材料の組合せ、直径、ブレーキ時間の値の差を表し、 y^t, y^p, y^N は摩擦時間、摩擦圧力、回転数の値の差とする。「Fuzzy Set」の列では当てはまるファジィ数の組合せを記入する。これらの文字は「Negative」などの該当するファジィ数の頭文字をとったものである。同じデータでも2つ以上のファジィ数の組合せが当てはまる場合があるので、「Weight」の列に式(3)の適合度を設定する。

Table 4. Data of differences

No.	Record	x_1	x_2	x_3	y^t	y^p	y^N	Fuzzy Set	Weight
1	1 2	0	0	0.3	0	5	50	Z-Z NZ	1.0
2	1 3	-0.1	-3	0	-0.5	5	200	N-N NZ	0.5
3	2 1	0	0	0.3	0	5	-50	Z-Z P	1.0
4	2 3	-0.1	-3	0.3	-0.5	10	250	N-N P	0.5
...									

最後のステップは、ファジィ数の組合せ別にまとめる。ここで、ファジィ数を示す第1文字は3種類(N, Z, P)、第2文字は3種類(N, Z, P)、第3文字は2種類(NZ, P)あるので、可能なファジィ数の組合せは18種類になり、それぞれについてルールが対応する。なお、各ファジィ数の組合せの適合度を考慮するために、各レコードのデータには適合度を乗じた。

さらに、データの整理や分析を容易にするために、同ファジィ数の組合せは1つのデータシートに記入する。たとえば、第1ファジィ数の組合せ(N-N-NZ)のデータの1部は表5に示すとおりである。

Table 5. Data per fuzzy set (in case of N-N-NZ)

No.	Record	x_1	x_2	x_3	y^I	y^P	y^N
1	1 3	0.05	1.5	0	0.25	-2.5	-100
2	2 4	0.05	-2.5	-0.3	0.25	3.5	75

6・3 各ルールの後件部の係数の推定 各ファジィ数の組合せに対して回帰分析にて正規方程式を作り、各ルール用の係数を求める。たとえば、 i 番目のルールでは摩擦時間用の正規方程式は式(8)のようになる。

$$\begin{aligned}
 na'_i + \sum x_1 b'_i + \sum x_2 c'_i + \sum x_3 d'_i &= \sum y'_i \\
 \sum x_1 a'_i + \sum (x_1)^2 b'_i + \sum x_1 x_2 c'_i + \sum x_1 x_3 d'_i &= \sum x_1 y'_i \\
 \sum x_2 a'_i + \sum x_1 x_2 b'_i + \sum (x_2)^2 c'_i + \sum x_2 x_3 d'_i &= \sum x_2 y'_i \\
 \sum x_3 a'_i + \sum x_1 x_3 b'_i + \sum x_2 x_3 c'_i + \sum (x_3)^2 d'_i &= \sum x_3 y'_i
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

摩擦圧力と回転数用の正規方程式も同様な形式で求められる。このように、各正規方程式から、各ルールの線形式に必要な係数が求められる。たとえば、1番目のルールは図5のようになる。ただし、それらの係数は実験を行って新しい値が得られる毎に修正される。

Rule No.1

if x_1 is negative, x_2 is negative, x_3 is negative-zero
 then : $y^I_1 = 0.03 + 5.21x_1 - 0.10x_2 + 2.57x_3$
 $\& y^P_1 = -6.21 - 20.47x_1 + 1.19x_2 + 5.62x_3$
 $\& y^N_1 = -793.31 + 5954.17x_1 - 459.29x_2 + 44.74x_3$

Fig.5 Sample of fuzzy reasoning rule

Modification using Fuzzy Reasoning				
Input Factors	Classification	Name	Shape	Dimension
Fixed Material	Carbon Steel	S50C	Solid Bar	22
Rotated Material	Carbon Steel	S50C	Solid Bar	22
Braking Time	0.3 sec			

Table of friction welding conditions	
Item	Modified Conditions
1 Friction Time (sec)	4.8
2 Friction Pressure (MPa)	32.5
3 Forging Pressure (MPa)	48.75 ~ 65.00
4 Rotation Speed (rpm)	3100

The above value of welding conditions are modified from 5 candidate welding conditions in the observed data base

Print out
Restart
Help
End

Fig.6 Reasoning result of modified welding conditions

7. システムの実行結果とその評価

7・1 システムの実行結果 システムの出力結果の一例を図6に示す。画面の上の部分には入力した圧接要因が、下の部分にはそれに適する圧接条件が表示されている。この例では、入力した圧接要因に一致した実績値はないものの、5つの候補圧接条件の実績値が検索されたことを示している。各データには候補となる摩擦時間、摩擦圧力、アプセット圧力と回転数の実績値が含まれる。候補圧接条件の数は知識ベースのデータの数に依存し、データが多いほど検索できる候補圧接条件の実績値が多くなる。

候補圧接条件の実績値から修正した新規の圧接条件の値が求められ、図6に示されている。その他に、前報のように、実績値による推論結果および実験式による圧接条件の推定結果が表示される出力画面も用意されている。

7・2 システムの評価 エキスパートシステムの評価には、システムの機能に対する評価とシステムからの出力結果に対する評価が必要である。

本システムの場合、前者は摩擦圧接工程設計に関する知識を表現・推論するための機能が十分整備され、ユーザの要求に答えられるかどうか重要である。つまり、ユーザが入力するあらゆる圧接要因への対応が必要であるが、ここでは、適切な知識ベースと推論方法を適用により、一致する実績値がなくても適用可能な圧接条件の推論ができることを検証した。また、新規の実績値が得られる毎に知識ベースの変更が要求されることから、本システムの知識ベースの変更が容易にできるようにした。

後者については本システムにより適切な圧接条件が選定できるかを実験により確かめた。ただし、確認したのはS55C以下の炭素鋼で、直径およびブレーキ時間は無作為で決めた。引張試験の結果より、接合した材料の応力の大部分は母材の応力以上であることがわかった。したがって、上記の範囲内に限定されるが、本システムは接合可能な条件を推論できると言える。

8. おわりに

本研究では、前報を基に、摩擦圧接工程設計を支援するためのエキスパートシステムの改善を試みた。その結果は以下のとおりである。

(1) ファジィ推論による候補圧接条件の修正機能を加えた。その結果、実績値がない場合には、自動的に候補圧接条件を検索し、各因子の値を修正して新規の

圧接条件の値を推論できるシステムが構築された。それにより、確信度を考慮しなくても適切な条件を選べるようになった。システムの総合的な機能としては、実績値の検索機能、実績値の修正機能と圧接条件の推定機能が充実した。

(2) 本システムで選定された圧接条件の妥当性を実験により検証した。その結果、炭素鋼に限定された範囲内ではあるが、初心者でも簡単に適切な圧接条件をほぼ正しく選定できることが確かめられた。

参考文献

- (1) スヨト・黒沢敏朗・小川恒一・竹原明伸, 機論C編 第61巻585号, (1995 5), 399.
- (2) 日本工業標準調査会, JIS Z3607¹⁹⁹⁴ (炭素鋼の摩擦圧接作業標準), (1994 3), 日本規格協会.
- (3) 小林重信, 人工知能学会誌, 第7巻4号, (1992 7), 19.
- (4) 菅野道夫, ファジィ制御, (1988), 74, 日刊工業新聞社.
- (5) 矢島悦次郎・市川理衛・古沢浩一, 機械・金属材料 (増補版), (1979), 143, 丸善.