アーク溶接におけるエキスパートシステムの構築 —熟練作業者の作業特性に関する知識獲得—*

福岡 俊道** 中川 義夫***

Development of Expert System for Arc Welding
—Knowledge Acquisition from Skilled Worker—

By Toshimichi Fukuoka, Yoshio Nakagawa

Although most of welding works have been automated recently in a sophisticated manner especially for large structures, a manual welding is still conducted for welded joints with complex configuration and for welding works consisting of various welding conditions. Formerly, skilled workers, who had undergone a special training course for a long period, have been engaged in such manual welding works. It is considered, however, that welding works of less important structures with regard strength, though being with complex configuration, could be done by semiskilled workers.

The primary concern in this paper is to develop an expert system for training semiskilled workers in arc welding in a short period. In the first place, attempts are made to acquire the knowledge of skilled worker through arc welding experiments using video systems, and the knowledges so obtained are evaluated numerically. The objective knowledges here are welding speed and crater treatment procedures, which skilled workers seem to have in their minds unconsciously. The validity of the welding works conducted by an expert is substantiated by 3-dimensional finite difference analysis concerning crater treatment form a viewpoint of cooling cycle.

1. はじめに

近年溶接作業の自動化はかなり進んでおり、とくに大量生産の対象となる製品に対してはほとんど自動化されているといえる。しかしながら溶接作業全体で見ると、手溶接で行なわれているケースは依然として非常に多い。同一条件で溶接するケースが少なく自動化するメリットがない場合、接合部分の形状から自動化しにくい箇所については手溶接で行な

われている。このような場合、従来はかなりの時間をかけて養成された作業者が作業にあたっていた。しかしながら、この作業者の中でも特に技術の優れた熟練者（エキスパート）の養成には大変な費用と時間がかかるために、溶接作業の対象となる構造物の強度がさほど問題とならない部分については、ある程度の溶接作業をこなすことのできる作業者（以下中級者と呼称する）で十分であると考えられる。したがって、アーク溶接作業全体から見て、中級者を短時間に低コストで養成する教育方法の確立が望まれる。本研究では、その手段として他の分野でも広く用いられているエキスパートシステムの考え方^{1)・2)}に着目する。まず第一段階として、溶接作

*原稿受付 平成4年11月30日

平成4年秋季学術講演（平成4年11月12日）

**正会員 神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

***神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

業におけるエキスパートの作業特性を明らかにし、エキスパートシステムの基本構成要素のひとつである「知識ベース」に関して、獲得すべき知識の種類とその手法について検討する。具体的には、エキスパートによる平板のビード溶接作業をビデオを通して取り込むことによって、溶接速度、クレータ処理について、その大きさおよび作業手順の数値化を試みる。また、同じ作業を初心者にも実施させることにより、両者の作業特性の違いを数値的に比較し、「知識獲得」に関する問題点をより詳細に検討する。さらに、エキスパートによるクレータ処理時の母材のボンド部の冷却速度については、三次元非定常温度場の問題として差分法により解析し、その作業の有効性を評価する。

2. 溶接作業におけるエキスパートの知識³⁾

表1は手溶接による被覆アーク溶接に限定して、作業前に決定する事項と作業中に作業者が無意識に用いていると推察される知識に分けて示したものである。作業前に決定する事項は数値的に示すことが比較的容易な項目である。これらの知識はエキスパートとのインタビューを通して知識獲得できるので、いわゆる標準条件が様々な形で提供されている場合が多い。これに対して作業中の項目は、作業者がアークの発生状況を視認しながら判断したり、経験上無意識のうちに知識として蓄積されるという性質を有しており、エキスパートの技量がもっとも発揮される項目であると考えられる。具体的には、溶接速度、アーク長、クレータ処理時の操作などが考えられるが、かならずしも数値的に知識ベース化されているとはいえない。また、エキスパートが同じ形状を有する箇所溶接作業をした場合でも、上で述べた項目については、数値的にある程度のばらつきが存在する。そのばらつきは、対象としている溶接作業における許容範囲に相当すると考えられる。したがって、エキスパートによる溶接作業から、従来

明確な数値化が困難であった項目について、その標準値と許容範囲を求めることは重要であると考えられる。以上述べたように、溶接作業の中級者を養成することを目的としたエキスパートシステムを構築する場合、エキスパートが無意識のうちに使用している知識の獲得手法と、その知識を数値化あるいは視覚化に関する表現方法の確立は重要な項目である。

3. 実験方法

3.1 実験装置概要 本研究では、エキスパートが無意識のうちに使用している知識であると考えられる項目のうち、溶接速度、クレータ処理に着目する。アーク長については、たとえば溶接棒の心線の直径程度、あるいは2ないし3mm程度という指針もあるので、今回は対象項目から省いた。溶接速度、クレータ処理についてもおよその指針はあるが、許容範囲も含めてその適正值を求めることは実

図1 実験装置概要

表1 溶接作業における判断項目の例

Novice	1	2	3	4	5	6
Plate Thickness (mm)	6	6	9	12	16	19
No. of Experiments	5	8	17	11	6	10

用上重要であると考えられる。そこで本実験では、ビデオに取り込んだエキスパートの溶接作業からその作業特性を検討する。また、初心者にも同じ作業を実施させ、両者の作業特性の違いを明らかにする。図1は実験装置の構成を示している。作業台の前面に大型の遮光板を置くことにより、アークの動きをビデオカメラに取り込むことが可能となる。また、遮光板の前にはスケールとストップウォッチが設置されている。その結果、ビデオの静止画像からアークの動きの時間変化を測定することにより、今回の対象項目である溶接速度とクレータ処理操作を数値化することが可能となる。

3.2 実験条件と手順 実際の溶接では母材に開先が設けられているが、本研究ではエキスパートの作業特性を明らかにすることを第一の目的としているので、もっとも単純な場合として下向きのビード溶接を行った。溶接電源は交流で電流120A、電圧約30Vとし、直径3.2mm、長さ350mmのイルミナイト系の溶接棒を使用した。試験片はSS41を用い、長さ250mm、幅100mm、板厚dは6、9、

12、16、19mmと5通りに変化させる。エキスパートは、すべての実験条件について1名が実験にあたる。初心者は板厚6mmのみ2名、その他の板厚については1名ずつ、のべ6名が実験を行った。表2は、各初心者が担当した板厚と実験回数をまとめたものである。表中Noviceが初心者を指しており、ここではすべて学生である。Noviceは溶接作業が全く初めてというわけではなく、数年前にのべ数時間の溶接作業実習を経験している。実験は各板厚ごとにエキスパート、初心者の順に行う。エキスパートは各板厚に対して6回ずつ実験を行う。初心者も数回以上実験を行うが、その際エキスパートが初心者の実験に立ち会い、適宜アドバイスを与える。

3.3 溶接速度とクレータ処理の評価方法

図2(a)は、一回のパスに対するアークの移動距離と時間の関係の一例を示したものである。両者の関係を直線で近似すると、その傾きが溶接速度になる。ビード終端部では、クレータ処理によりアークが前後に移動するので、波形を呈している。ビード始端部付近では、アークが定常状態になるまで若干の時間を要するが、終端部ほどの乱れはない。そこで、溶接速度はビード始端部のデータを除いて、最小二乗法を用いて直線近似することにより求める。クレータ処理は、ビード終端部が急冷されることを避けるために、アークをビード終端部で円または橢円状の軌跡で前後させる操作である。ここではアークの軌跡が直線状であると仮定して、クレータ処理時におけるアークの速度と移動量を求める。図2(b)

表2 各初心者の実験条件

作業前に決定する事項	作業中に判断する事項
溶接棒の選定	溶接速度
開先の形状	アーク長
溶接電源（交流・直流）	クレータ処理手順
電流・電圧値	溶接姿勢
ビードの層数・パス数	ウィービング幅・速度
etc	etc

(a)

(b)

図2 溶接アークの移動とクレータ処理

は、ビード終端部においてクレータ処理した場合のビードの形状を示したものである。アークの移動量を仮にストロークと呼ぶと、クレータ処理時の平均溶接速度は、ストロークに移動回数を乗じて、その値を全所要時間で除すことにより求められる。したがって、本研究において得られる数値データは、各実験におけるビード中央部の溶接速度およびクレータ処理時のストロークと溶接速度である。

4. 実験結果

4.1 溶接速度 図3は、エキスパートによる実験結果の例で、アークの移動距離と時間の関係を、板厚 d を変化させて示したものである。なお、図中の数字は実験回数である。図4は同じく初心者による実験結果であり、エキスパートと比較して、実験の繰り返しに伴うばらつきが大きくなっている。また、Novice 5はNovice 1と比較して、もともとばらつきが少ないというように、初心者の間でもかなりの個人差がみられる。図5は、3.3節で述べた手法を用いて、エキスパートと初心者の溶接速度を各実験ごとに求めて比較したものである。これらの図より、エキスパートは各実験において安定した溶接

速度で作業しているが、初心者については、作業ごとに溶接速度がかなりばらついている様子が認めら

図4 溶接アークの移動距離と時間(初心者)

図3 溶接アークの移動距離と時間(エキスパート)

図5 溶接速度と実験回数

れる。しかしながら、実験回数が増加するに従って、溶接速度のばらつきは改善される傾向にある。さらに特筆すべき点は、図4でもばらつきが小さいと評価されたNovice 5の実験回数と溶接速度の関係である。図5(b)に示すように、2回目以降の実験で溶接速度はほぼ一定になっている。1回目の実験で、エキスパートから少し遅くするようにという指示があり、それが確実に実行されているといえる。また3回目の実験を終了した時点で、エキスパートから「もうこの程度で十分」という評価が得られており、4回目以降の実験結果から、その時点でNovice 5の作業が満足のいくレベルに達したことをエキスパートが的確に判断したといえる。図6はNovice 3による実験結果を示しており、実験回数の増加にともなってばらつきが小さくなっている。これは、各実験が終了するごとに、エキスパートから初心者に対して適当なアドバイスが与えられたことの効用であると判断される。エキスパートシステムを実用化する段階では、ビデオに取り込んだ初心者の作業をコンピュータで処理して、その結果に基づいてシステムからアドバイスが与えられることが期待される。

4.2 クレータ処理 クレータ処理は3.3

図6 初心者の作業特性の改善

節で述べたように、クレータ処理時のストロークと溶接速度という2つの因子により評価する。図7は

図7 クレータ処理時の溶接速度

図8 クレータ処理時のストローク

クレータ処理時の溶接速度と実験回数の関係を示している。エキスパートを例にとると、クレータ処理時の溶接速度は20～30mm/sec付近の値であり、ビード中央部に比較して数倍大きくなっている。初心者の値は、エキスパートに比較して全般に低くなっている。すなわち、クレータ処理時の溶接速度は、一般に初心者が考えているより大きな値であるといえる。図8は、クレータ処理時のストロークと実験回数の関係を示したものである。エキスパートの場合、5～7mm程度の値であり、ここでも初心者の実験値のばらつきはかなり大きい。すなわち、クレータ処理時には溶接速度とストロークという二つの因子があるために、それらを同時に適正な範囲の値にすることは、初心者にとってかなり困難であるといえる。

4.3 溶接作業のばらつきと許容範囲 溶接作業がたとえエキスパートにより行なわれたとしても、作業の繰り返しにともなって、例えば溶接速度、クレータ処理操作にある程度のばらつきは存在する。しかしながら、接合部の仕上がりをエキスパート自身がよいと判断したものであれば、そのばらつきはある種の許容範囲に相当すると考えられる。図9は許容範囲に対する一つの考え方として、図3に

図9 溶接速度の許容範囲

示したエキスパートの作業の中で、もっとも溶接速度が大きい場合と小さい場合の結果に対して、初心者の作業結果を重ねて示した例である。溶接速度に関して、Noviceはやや大きめであるといえる。このように表示することにより、ある初心者の溶接速度に関する作業特性を判断でき、それに基づいて的確なアドバイスが与えられる。また、初心者の作業をエキスパートの作業におけるばらつきと比較することにより、実用的な意味での可否が判断できる。図10は、溶接速度とその標準偏差に対する母材板厚の関係を示している。エキスパートによる作業では、溶接速度は3.5～4mm/secの間の値であり、特に

図10 溶接速度の平均値と標準偏差

図11 クレータ処理時の作業のばらつき

板厚の影響は見られない。このことは、本研究におけるアーク溶接実験が、板厚にかかわらず電流、電圧を一定にして、開先を設けないビード溶接であることに起因していると考えられる。各板厚はそれぞれ別の初心者が担当したが、板厚の薄い場合と厚い場合に標準偏差が大きくなっている。図11では、クレータ処理時の溶接速度とストロークについて、同様に示したものである。この場合、溶接速度に比べてばらつきは大きいものの、エキスパートによる作業では板厚の変化による顕著な影響は見られない。

5. 数値解析によるエキスパートの作業特性の評価

本節では、エキスパートによるクレータ処理時の母材ボンド部の冷却速度を、三次元非定常温度場の問題として差分法により解析し、その作業特性を解析的に評価する。クレータ処理を行わない場合、ビード終端部での冷却速度は中央部に比較してかなり大きくなる。前報⁴⁾においては、ビード始末端部の冷却速度を差分法により解析し、その値を実験値と比較することにより解析方法の有効性を確認している。本研究では、その解析手法を用いてクレータ処理時における冷却速度を解析する。ここではアークにより発生する熱が、ビード終端部において、クレータ処理時の溶接速度に対応して前後に直線的に移動する面熱源として母材に供給されると仮定する。エキスパートによるクレータ処理では、図2(b)に示すビード終端部において、溶接棒が2回半往復している。前報においては、アークにより発生した熱が一定速度で一定方向に移動する面熱源として扱ったが、クレータ処理時には、溶接速度とその方向が時間とともに変化するので、各時間ステップにおけるアークの位置に応じて、面熱源を構成する差分格子への熱の配分を決定する⁴⁾。それ以外の点に関して、解析手法は前報と同様であるので省略する。図12は、解析に使用した差分格子を示している。対称性を考慮して、母材の半分をモデル化しており、総格子点数は11907である。なお、ビード中央部では冷却速度がほぼ一定になる⁴⁾という点と、計算時間節約の観点から、実験に用いた母材よりも短いモデル（長さ200mm）を使用する。図13は、解析結果の一例で、ビード終端部の冷却曲線と溶接線全体に対する冷却速度を、クレータ処理をした場合としない場合につ

いて比較している。母材の板厚 d は9mmで、母材端部からビード始末端部までの距離は10mmとしている。クレータ処理を施した場合、ビード終端部は緩やかに冷却されている。また、従来と同様に炭素鋼の A_1 変態点温度である723℃における冷却曲線の勾配として定義した冷却速度は、ビード終端部において中央部以下の値になっている。以上、母材ボンド部

図12 差分格子モデル

(a) Cooling cycle at the end of bead

(b) Cooling rates

図13 数値解析によるクレータ処理の効用の評価

の冷却速度の数値解析結果より、エキスパートによるクレータ処理作業の有効性が確認できたといえる。

6. 結 言

アーク溶接における中級作業者を、短時間に低コストで養成することを目的としたエキスパートシステムの構築を目的として、手溶接による被覆アーク溶接を対象として、エキスパートの作業特性の解明を中心に検討した結果、以下に示す結論を得た。

- (1) 溶接のエキスパートの有する知識のうち、経験上無意識に知識として蓄積されていると考えられる項目を数値化する手法を示した。
- (2) 溶接作業をビデオに取り込むことにより、溶接速度、クレータ処理を数値的に評価できることを示し、エキスパートの作業特性を初心者との比較を通して、より明らかにした。
- (3) エキスパートの作業特性を評価することにより、溶接速度、クレータ処理時の溶接速度、ストロークに対しては、推奨される平均値とそれに対するある許容範囲が存在することを示した。
- (4) エキスパートの作業特性の有効性を、クレータ処理時の冷却速度に関して、三次元非定常温度場の問題として差分法により解析することによって確認した。

今回の実験は下向きのビード溶接で実施したが、実際の溶接作業で開先が存在する場合、ウィービング溶接、あるいはより複雑な横向き、立向き溶接についても、本研究で示した手法によりエキスパートの有する知識を獲得し、知識ベースを構築することが可能であると考えられる。本研究を遂行するにあたりご協力いただい

た西川清男技官、ならびに有益な助言を賜った(株)名村造船所のスタッフの方々に謝意を表します。

文 献

- 1) 佐々木・ほか3名, 精密工学会誌, 57-3, (平成3), p497.
- 2) 池西, 熊本, 井上, 舶機誌, 23-2, (昭63), p96.
- 3) 平尾, エキスパートシステム入門, (平成元), p59, オーム社
- 4) 福岡, 舶機誌, 27-8, (平成4), p562

~~~~~メッセージ~~~~~

福岡 俊道

中川 義夫

日本舶用機関学会における研究活動としては、数年前よりアーク溶接の熱サイクルの解明をメインテーマとしております。研究方法としては、三次元差分法による数値解析の妥当性を、溶接実験により確認するという手法を用いております。溶接は極めて複雑な現象ですので、到底解析ですべて解明できるとは考えておりませんが、工学的に有効な解を得ることを目的とするのであれば、理にかなった範囲で、思い切った解析条件の簡略化が望ましいという考えに基づいて研究を進めております。