溶接作業の熟練技能伝承

－最適化シミュレーション技法の適用*－

奥本 泰久**

Skill Transmission of Welding Work

- Application of Simulation Technology of Optimization* -

by OKUMOTO Yasuhisa**

So-called "baby-boom generation", who was born just after the World War II, will retire soon, starting at March 2007 in many manufacturing industries, and the young successors who have less experience will not follow them to the fullest extent. Since the transmission of the work skill is greatly doubted, this is the hot topic at present in Japan as so-called "2007 problem" as an issue to be solved urgently. There will be two approaches for the solution: One is to introduce the education and training system by effective and systematic supporting tools using IT fully subject to approving the present skill as it is. The other is to study the ambiguity (tacit knowledge) of present skill systematically, and replace it to the explicit knowledge by finding the rule and principle, and then create the new system. The latter is called technologization of the skill. This paper took up the digital manufacturing as the latter example, and one application was introduced for the pipe unit fabrication. Next, it was explained that the skilled workers judged the work procedure heuristically like a combinatorial optimization. The simulation example using "reinforcement learning method", one of the heuristic combinatorial optimization technique, was introduced for the welding sequence of the ship hull block.

Key Words: Shipbuilding, Welding works, Skill, Technology transmission, Tacit knowledge, Explicit knowledge

1. 緒 言

戦後生まれのいわゆる「団塊の世代」が2007年で初めて定年を迎えることになり、多くの製造業では長引いた不況の影響で後続の世代の雇用が少ないこともあり、若い後継者を早急に育成する必要に迫られている。これが今話題の「2007年問題」であり、特に熟練技能の伝承が大きく問題視されている。本稿は造船の中心業務であり、熟練技能を要す溶接作業に焦点を当てながら、熟練技能伝承の問題点を整理・指摘した上で、解決策として二つのアプローチを示した。

一つの案は、現状の技能をそのまま是認し、システムティックな教育訓練やITを使った教育支援システムの構築である。他の一つは、現状の技能の曖昧さ（暗黙知）をシステムの的に考究し、その原理原則を掴んで形式知に置き換え、新たなシステムを創成するというものである。これは別名、技能の技術化ともいわれている。本稿は後者の例として、まず、デジタルマニファクチャリングを採り上げその適用を提案し、実際に溶接組立に適用した事例を紹介した。次いで、熟練技能者の行動様式は組合せ最適化をヒュ

ーリスティック（経験的、発見的）に行っていることを述べ、船体ブロックの溶接順序をヒューリスティックな組合せ最適化手法である「強化学習法」を適用してシミュレーションし、これらの最適化手法が生産分野での技能を技術化するのに効果的であることを示した。

2. 2007年問題

既に数年前から、巷間「2007年問題」として熟練技能者・技術者の後継難が問題視されてきたが、いよいよその時期が迫ってきた。2007年問題とは、戦後の1947年（昭和22年）生まれから1949年（昭和24年）生まれのいわゆる「団塊の世代」（700～800万人）が2007年に60歳の定年退職を迎えるということで、2007～2009年で105万人の雇用減となり、それに伴って各種の社会問題が生じるというものである。

団塊の世代が高校や大学を卒業し実社会に入った昭和40年代前半は、国内産業ではコンピュータの黎明期に相当し、高度経済成長の波にも乗って彼らが基幹情報システムの開発や導入・運用に当たり、各分野で技術・技能の発展を支えてきた。高度経済成長はその後減速し長引く不況時代を迎えることになるが、各産業ではその間社員の新規採用を長期に亘って押さえてきたこともあり、情報システムの開発・運用に当たった団塊世代の後継が十分育っていない、景気が回復しつつある現在、世代間ギャップが大きな問題になってきた。

*受付日 平成18年10月25日 受理日 平成19年4月24日 平成18年11月 溶接構造シンポで発表

**正 員 近畿大学工学部 Member, Kinki University, School of Engineering

この問題は情報システムに限らず、もの作りの現場でも、高度経済成長時代に新しい技術開発や運用に携わり、高度の技術や技能を経験した団塊世代のノウハウや知恵がうまく伝承されていないという深刻な事態になっている。特に溶接に関連する重厚長大産業では顕著である。

Fig. 1 に昭和25年（1950年）と平成17年（2005年）の我が国の年齢別・性別人口分布を示す²⁾。戦後間もなくは同図(a)に見られるように典型的なピラミッド型であったが、2005年の時点では逆ひょうたん型となりこの傾向はここ数年続いている。Fig. 2 は製造業A社の社員年齢構成である。50歳代が圧倒的に多く、この世代に続く40歳代、30歳代後半が谷になって20歳代につながっている。

造船業に於ける作業員の職種別構成では溶接作業員が最

も多いが、国内の全造船所作業員について、正社員と協力会社社員（Sub-contractor）とを合わせ Fig. 3 に示す²⁾。同様に50歳以上と35歳以下が圧倒的に多く、ワイングラス型となっている。この傾向は造船所の正社員が特に顕著で、協力会社の溶接作業者は比較的各年齢に分布している。

3. 熟練技能の伝承

3.1 技能伝承の問題点

製造業の中でも特に造船業は労働集約型といわれ、作業者の個人的な経験や能力に依存する度合いが高く、優秀な熟練技能者が、これまでの造船業を支えてきたといっても過

Fig. 1 Age-classified population in Japan

Fig. 2 An example of age composition of employee

言ではない。前述のごとく、これら50歳代の熟練技能を後継である次世代の若者にいかにうまく伝えるかが、造船業発展の鍵となる。現状での問題点をまとめると

1) 世代間ギャップ

伝承する世代は50歳代で、彼らはやや回復したとはいえ戦後の貧しい時代に育ち、製造業に入社し継続して勤務した社員は総じて勤勉で真面目で優秀な人材であった。一方、伝承される側の20歳代は、一般的に、豊かな物余りの世の中で、少子化の影響もあり甘やかされて育った、心は優しいが意欲と気概に乏しい社員である。50歳代の物の考え方、人生観、職業観を押しつけても通じる筈もない。彼らにど

のような態度で接し、自分の持つ技術や技能をどのように異質な人種に伝えるか、難しい問題である。

2) OJT

通常、技術や技能の伝承はOJT (On the Job Training)で行われる。すなわち、日常のライン業務をしながら先輩が後輩に勘所を教えるというものであるが、長引いた不況のため自ら忙しく働き、同じ職場に長い間後輩がいなかったこともあり、多年OJTが組織的になされなくなっている。今後は前記1)と合わせ、新たに教育訓練のシステム化が必要である。

3) システム化、機械化

昭和40年代は経済成長のさなか、コンピュータシステムを導入し、自社で積極的にそれぞれの業務に合ったソフト開発を実施してきたが、不況時代は更新・開発する体力も弱くなり、古いソフトを継ぎ当てしながら使ってきたというケースが多い。また、コンピュータの飛躍的な性能向上(ハード、ソフトとも)により、汎用市販ソフトを購入して使うという形も定着しつつある。機械化、自動化も長い間停滞している。

ただし、ソフトもハードも市販のものをそのまま導入してもうまくいかない場合が多い。特に熟練技能の場合、単に機械化しても投資効果が低く、過去に多くの失敗を経験したことから「羹(あつもの)に懲りて膾を吹く」の諺通り、その後の投資意欲を著しく欠いている。

3.2 技能伝承の方向

日本造船学会数値制御委員会が実施した調査によれば、造船技能の代表的な職種である取付け、溶接、板曲げについてその熟練度と経験年数との関係がFig. 4に示されている³⁾。図によれば、溶接で技術レベルを満点にするには20年の年数がかかることになる。これをいかに短縮するかが今後の鍵となるが、Fig. 5に示すように2種の方策が考えられ

Fig. 3 Age composition of welding workers in shipyards

Fig. 4 Length of experience to acquire skill

Fig. 5 Methods to shorten the term to acquire skill

る。一つの A 案は、現在の熟練技能者が持っている技能（知識、経験、問題処理能力、判断力など）をそのままは認しこれを直接次世代の人に伝承する立場で（守旧型と呼ぶ）、マニュアルや指導補助によって実体験で覚えさせるのが基本である。これをより効率的にするため、指導計画の改善、マニュアルの整備さらに IT を大幅に取り入れ（知識のデジタル化、ビジュアライゼーションなど）、これにより技術習得に要する期間を大幅に短縮しようとする方法である。他の案 B では、現在作業員によって実施されている熟練技能（暗黙知）を理論的・系統的に分析し体系化し、これを形式知として別の技術に置き換え（離旧型と呼ぶ）、システム化や機械化、自動化を図ろうとするもので、これによって技能の作業員依存度を低減しようとする方法である。

ところで、これまで技能伝承に関して幾つかの議論がなされている。それらは、技能とは何か、そもそも（そのままの形で）伝承すべき技能があるのか、何をどの様に伝承するのか、などの本質論から、技能の暗黙知を形式知化すること、デジタル化・システム化の方法、IT 利用の具体的事例まで、広範囲に亘っている。守旧型の立場では

- ① マニュアルの整備、映像利用など教育・訓練の高度化
- ② CAI (Computer Aided Instruction), e ラーニングなどの利用
- ③ ナレッジマネジメント、エキスパートシステムの併用
- ④ バーチャルリアリティ (VR) の利用

などの試みが提唱されている。現在、日本造船工業会、日本中小型造船工業会、日本造船協力事業者団体連合会の 3 団体で組織する「造船技能開発センター」では、ぎょう鉄（加熱による板曲げ）、艀装工事など造船固有の職種の教育映像を制作、もしくは制作準備中である。

一方離旧型の立場では、現在行われている技能をそのままの形で後輩に伝えるのではなく、このプラクティスを仔細に観察整理し、原理原則を見出し、そこから現在に最も適した新しい形を創造するのがその本質で、線状加熱曲げの自動化はその一成功例である⁹⁾。現在に適したとは、人的には新規採用者である若者の資質の変化、社会的にはデジタル化の急速な普及・適用などを考慮した形と考えられる。その点で現在デジタルマニファクチュアリングが叫ばれ、一部その試みもなされている⁹⁾。本稿では、離旧型の実施例について以下に報告する。

4. 溶接技能のシステム化・最適化

前章 A 案（守旧型）で述べた教育訓練の強化、組織化は当面十分な成果を収めることができるが、根本的な解決としては第二のアプローチである B 案（離旧型）が必要であり、将来、機械化、自動化、ロボット化を計るための、その前段階のステップとしても重要である。現状分析に基づいた熟練技能のシステム化や数値化が行われないと、機械化が効果を発揮しないことは既に多くの失敗例が物語っている。

4.1 デジタルマニファクチュアリング

もの作りには多くの曖昧さすなわち暗黙知が存在し、これが自動化や IT の導入効果を阻害させていることが近年指摘され、この解決策としてデジタルマニファクチュアリングが提唱されている。すなわち、「もの作りの曖昧さである暗黙知を形式知化（数値化・定量化）するとともに、デジタル値に変換して、IT を最大限に活用するモノづくり変革」とする仕組みである⁶⁾。具体的な形態として、

- 1) 技術・技能の数値化
- 2) データ（数値集合）から情報（意志決定や判断に利用可）へ
- 3) 仮想設計・製造：コンピュータシミュレーションによる事前予測
- 4) データの一貫・一括活用：上流から下流まで多部門での利用
- 5) グローバル遠隔管理：ネットワークの活用

これらは熟練技能の伝承としてそのまま活用できる。現在、溶接組立に際して、コンピュータシミュレーションによる作業評価が行われている⁷⁾。Fig. 6 はその一例で、組立現場にパソコンを設置し、無線 LAN で中央のコンピュータに接続し作業手順をアニメーションで確認しながら組立てていくシステムである。これによって初心者でも容易に組立作業を行うことができる。

4.2 作業の最適化

熟練技能者の判断や行動様式を考えると、Fig. 7 に示すように、現在の状態 P_0 に対してとりうる、またはとるべき幾つかの選択枝の中から、各枝を辿った場合の結果 $P_1, P_2, \dots$ を過去の経験から予測し（頭の中でシミュレーションし）、

Fig. 6 Assembly simulation of pipe unit

ベストとはいえないまでもベターな解を選択して実行する、というプロセスである。このような意志決定はヒューリスティックと呼ばれるが、未熟練者はこのような判断が難しく、非最適解を選ぶ可能性が非常に高い。このような問題の扱いはいわゆる「組合せ最適化問題」として数理的またはシステム工学的に取り扱われる。近年は、旧来の組合せ最適化手法である分枝限定法などに加え、メタヒューリスティックあるいはモダンヒューリスティックと呼ばれる手法が適用されている。これには、シミュレーティッドアニーリング、タブー探索、遺伝的アルゴリズム、ニューラルネットワークなどが使われており、著者らは、生産分野の最適化にこれらの手法を適用し、既に多くの成果発表を行っている。各手法は一長一短あるが、今回は近年提案された「強化学習」を使って複数溶接箇所の溶接順序の最適化について検討した結果を報告する⁹⁾。

(1) 強化学習法の概要⁹⁾

強化学習とは動物の学習過程を模擬した手法で、ある課題や目的の達成に成功すると報酬が与えられ(餌にありつければ)、失敗すると罰を受けることによって、次第に環境に適した行動を学んでいく最適化の過程を、コンピュータで繰り返し計算しながらシミュレーションする方法である。本方法は、若者がいきなり生産現場に入り、(必ずしも体系的・技術的な教育を受けないまま)見よう見まねで長い間かけて技術を習得していきベテラン技術者に育っていく過程に酷似していると考え、ここでは採用した。

Fig. 7 Decision tree

Fig. 8 Mechanism of reinforcement learning method

強化学習法はこれまでは、迷路問題や移動経路問題などのルート最適化分野で、OR関係の研究者が扱ってきたが、今回これを生産分野に適用しその有効性を確認した。これまでそのような適用例は見あたらない。

強化学習の具体的な処理は、学習と意思決定を行うエージェント(今回は作業者)が、ある環境Eの状態s(State)に対してある行動a(Action)をとった時に環境から与えられる報酬r(Reward)をもとに、Fig. 8に示すように初期状態からゴール状態にわたって受け取る報酬が最大になるような行動戦略を学習する過程である。強化学習はいわゆる「教師なし学習」であり、環境に関する正しい知識をあらかじめ準備する必要がなく、行動とその行動の評価を繰り返しながら学習していくため、環境が緩やかに変化する動的な状況に対応できる最適化技法である。

学習にはQ学習という方法を使った。これは強化学習のアルゴリズムの代表的なものの1つで、エージェントが環境に対し試行錯誤を繰り返し、行動価値関数 $Q(s, a)$ を推定するアルゴリズムである。 $Q(s, a)$ とは状態sで行動aを選択した後、常に最適行動をとり続けるときの利得の期待値を表す。 $Q(s, a)$ が与えられた場合、それが最大となる行動aが最適行動である。状態sで行動aを選択した後の報酬をr、状態遷移後の状態をs'とすると、Q値は(1)式のように更新される。

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha \left\{ r(s, a) + \gamma \max_{a' \in A(s')} Q(s', a') - Q(s, a) \right\} \quad (1)$$

$Q(s, a)$: 現在の状態sにおける行動 $a \in A(s)$ の価値

$Q(s', a')$: 遷移後の状態s'における行動 $a' \in A(s')$ の価値

α : 学習率 ($0 < \alpha \leq 1$)

γ : 割引率 ($0 \leq \gamma \leq 1$)

学習率 α は現在のQ値と、行動によって得られた結果のどちらを重視するかを表している。これが1に近いほど新しく得られた結果を重視しQ値の変化が大きくなり、0に近づけると現在のQ値を重視しQ値の変化が小さくなる。割引率 γ は現在の報酬と将来の報酬(推定値)のどちらを重視するかを表し、1に近いほど将来の報酬を重視し、0に近いほど現在の報酬を重視することになる。一般に α は0.1が、 γ は0.9~0.99が使われている。ここで、ある状態で実

行可能な行動は複数存在するため、可能な行動の中から実際に実行する行動の一つを選択する必要がある。行動選択方法はいくつか提案されているが、ここでは ε -greedy法を用いる。これは、解が局所最適解に陥るのを防ぐ為報酬の少ない行動にも確率的に敗者復活を認めようとするものである。 ε -greedy法は(2)式に示すような確率 $1-\varepsilon$ でQ値が最大のものを選択し、確率 ε ($0<\varepsilon<1$)でランダムに選択する。今、状態 s のときに行動 $a \in A(s)$ を選択する確率を $p(s, a)$ とすれば

$$p(s, a) = \begin{cases} 1-\varepsilon & Q(s, a) \text{が最大の時} \\ \varepsilon & \text{それ以外} \end{cases} \quad (2)$$

Q学習は次の順序で学習を行う。

1. $Q(s, a)$ を初期化する。
2. 状態 s を初期状態にする。
3. 行動選択法により行動 $a \in A(s)$ を選択する。
4. 行動 a を実行し、次の状態 s' を観察する。
5. 報酬 r を受け取る。
6. (1)式より $Q(s, a)$ を更新する。
7. 次の状態 s' がゴールであれば終了し、そうでなければ $s \leftarrow s'$ として3.に戻り行動を繰り返す。

Fig. 9 Welding machine

(2) シミュレーション

船殻ブロック組立ての代表的なパターンであるロンジとトランスに囲まれた区画を想定し、Fig. 9に示す簡易自動溶接機でロンジとトランスの足下を順次溶接するケースを想定する。Fig. 10に示すように10区画（各区画に溶接ラインは4本）に設定し、その区画ごとの接点を x 軸は0から19, y 軸は0から1のように座標として定義した。その接点ごとに、次の行動で上下左右の4方向の内どの方向に移動できるかは次の3ケースのいずれかを判断しながら進む。

- 0: トランスで行き止まり
- 1: 溶接ラインあり
- 2: ロンジを跨ぐ

一つの行動をとった後に受け取る負の報酬を本研究ではペナルティとし、角度変更を行った時には（溶接機を手で回転させるため）-1, ロンジを跨いだとき（溶接機を手で持ち上げ隣の区画に移すため）-3と仮定した。ここでペナルティの絶対値が最小となる作業順序を最適解とする。計算では学習率 α を0.1, 割引率 γ を0.99に設定し、パソコン上でプログラムを作成した。シミュレーションは溶接電源が中央付近であると仮定し、溶接開始位置 (x, y) が $(6, 0)$ とした。

溶接機の行動パターンの繰返し計算を500回行い学習した結果をFig. 11に示す（図は400～500回の値のみ掲載）。ここでは493回目で最適値を得ることができた。パソコンでの実行時間は瞬時であった。このときの移動経路をFig. 12に示す。最初に、左右どちらかのロンジを跨いで区画を

Fig. 10 Welding route

Fig. 11 Calculation results

Fig. 12 Optimum route

移動しなければならないが、そのどちらかを選択する際に、残りの区画が少ない方に移動し、作業を行う方が少ないペナルティで溶接を行えることがわかった。このときにかかったペナルティの総数は-86である。

5. 結 言

本稿はいわゆる「2007年問題」として話題となっている熟練技能の伝承について、造船の溶接を中心にして考察した。主な論点は

- (1) 熟練技能の伝承には2種類のアプローチがある。一つは、現状の技能をそのまま是認し、システムティックな教育訓練やITを使った教育支援システムの構築である。他の一つは、現状の技能の曖昧さ（暗黙知）をシステムの的に考究し、その原理原則を掴んで形式知に置き換え、新たなシステムを創成するというものである。
- (2) 当面、前者のアプローチを計としても、根本的な解決としては後者のアプローチが必要であり、いずれ機械化、自動化、ロボット化を計としてもその前段階のステップとしても必要である。
- (3) 後者の例として、実際の現場で実施したデジタルマニユマニファクチュアリングの例と、組合せ最適化の技法の一つである強化学習法を使った溶接順序最適化のシミュレーション結果を示した。
- (4) 強化学習法は、ベテラン技能者の学習過程をよく再現し、熟練技能をコンピュータシミュレーションで置換させるのに効果的であることを示した。

これらのアプローチによってこれまで築いてきた造船溶接技能ひいては製造技術が次世代に効率よく伝承されるとともに、新たな創造と近代化の礎となることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) Statistics of Ministry of Internal Affairs and Communications, 2000, 2005 (in Japanese).
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/sokuhou/01.htm>,
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/sokuhou/01.htm>
- 2) Age Distribution of Welding Workers, Data of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Research Committee of Production (in Japanese).
- 3) Fujita et al.: Systematization of Shipbuilding Skills and their Knowledge Representation, ICCAS89, (1989), pp.313-321.
- 4) Tango Y. et al.: Automated Line Heating for Plate Forming by IHI-ALPHA System and its Application to Construction of Actual Vessels, Journal of the Society of Naval Architects of Japan 193, (2003), pp.85-95 (in Japanese).
- 5) Okumoto Y. and Hiyoku K.: Digital Manufacturing of Pipe Unit Assembly, Journal of Ship Production, Vol.21, No.3, (2005), pp.141-145.
- 6) Seino, T and Ikeda, Y.: Digital Manufacturing for Innovative Manufacturing Management and Engineering, Toshiba Review, Vol.50, No.7, (2003), pp.2-6 (in Japanese).
- 7) Okumoto Y., Hiyoku K. and Uesugi N.: Simulation Based Production Using 3-D CAD in Shipbuilding, ICCAS2006, (2006), pp.649-656 (in Japanese).
- 8) Okumoto Y. and Oda T.: Optimization of Welding Route by Automatic Machine Using Reinforcement Learning Method, Conference Proceedings, Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineering, Vol.2W, (2006), pp.55-56 (in Japanese).
- 9) Araya S.: Artificial Intelligence (2nd Edition), (2004), pp.113-117, (in Japanese).