

溶接作業における熟練技能定量化手法の研究

神生 直敏, 櫻庭 洋平, 畑沢 賢一, 万城目 聡

Study on Quantification Technique of Highly Skill in Welding Work

Naotoshi KAMIO, Yohei SAKURABA, Kenichi HATAZAWA, Akira MANJOME

抄 録

溶接技能の習得に必要な、材料、溶接機調整、溶接状況、手さばき具合などの各種判断情報は、単純に説明できるものから、説明しにくいものまで、幅広く存在する。熟練者が非熟練者に溶接技能を説明するには、高度な説明能力が求められ、技能伝承が進まない要因となっている。

そこで、熟練者の溶接技能を客観的に捉えるために、溶接作業を階層分析法（AHP）などを用いて分析することで、溶接品質の向上につながる重要項目を抽出し、さらに抽出された項目への重要な対策とされた溶接トーチの動きを6軸センサや視線計測装置で計測した。また、得られた知見をもとに、携帯端末で動作し、2つのツールで構成される溶接作業標準ガイドを作成した。

キーワード：溶接，技能伝承，階層分析法(AHP)，視線計測

Abstract

For learning the welding skills, various judgment information exists from simple explanation to complicated explanation, such as material, adjustment of welding machine, welding situation and hand working. Therefore, In order for experts to explain welding skills to unskilled workers, sophisticated explanatory abilities are required and skill transfer is not advanced.

In order to objectively analyze and evaluate the work and experience of experts, important items leading to welding quality, etc. are extracted by using skilled hierarchical skills such as Analytic Hierarchy Process (AHP), etc. Based on the analysis result The movement of the welding torch was quantified by a 6-axis sensor and eye-tracking device. Based on the obtained findings, we also created a work standard guide that works on mobile terminals.

KEY-WORDS : welding, skill transfer, Analytic Hierarchy Process (AHP), eye-tracking

1. はじめに

ものづくり産業で基盤的な技術である溶接作業は、道内の鉄骨製造業を中心に、大小様々な企業で利用されているが、多品種少量生産の工場では、手溶接（手作業）の割合が多く、また、ロボット溶接機を導入していても、トラブル発生時には手溶接が必要とされることが多い。

溶接技能の習得に必要な技術は、説明に要する難易度の幅が広く、現場で熟練者から非熟練者への技能伝承がなかなか進まないのが現状である。実際、北海道内の大手・中堅鉄骨製造業7社に溶接作業の技能伝承問題について、アンケート調査を実施したところ、5社で技能伝承問題を抱えている実態が明らかとなった（図1）。

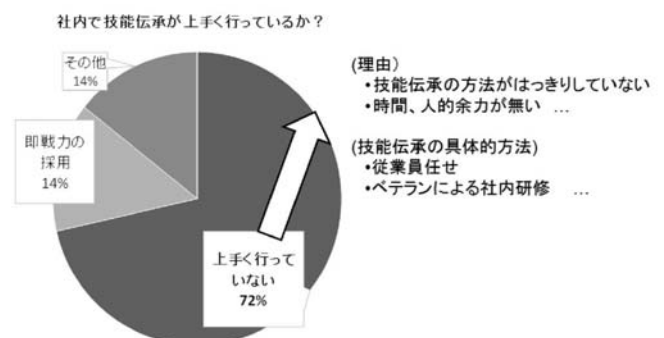


図1 溶接を扱う道内鉄骨製造7社へのアンケート結果

団塊世代の大量退職に由来した技能伝承問題は、少子高齢化が現実のものとなった道内溶接業界にとって、若年層の雇用問題とともに喫緊の課題である。約10年後の2025年の北海

事業名：経常研究

課題名：溶接作業における熟練技能定量化手法の研究

道は、人口が500万人を割り、65歳以上の高齢者人口が全体の3分の1に達する見込みとされ、技能伝承問題は、若年労働者の確保とともに早急に取り組まねばならない課題である。

一方で技能伝承問題は、業種・業態・規模・社員構成・社風・資金など、企業の環境によって解決策が異なる。そのため、すべての問題を一つの手法で解決することは困難であり、状況にあった手法を検討する必要がある。

そこで本研究では、溶接作業における熟練技能伝承を支援することを目的に、熟練者の作業方法や経験などの主観的情報から溶接品質の向上につながる重要項目を抽出し、その重要度を非熟練者へ説明できる情報として定量化した。さらに、熟練者の視線や溶接トーチの動きを計測し、溶接品質の向上につながる重要項目と併せて携帯端末で視聴できる作業標準ガイドを作成した。

2. 階層分析法による溶接技能の定量化

2.1 熟練技能における定量化手法の検討と必要項目の抽出

技能伝承問題に取り組んできた元富士通総研の野中氏によると、「技能伝承における5つの誤解」¹⁾として、

- ① 経験を積みれば、誰でもノウハウ継承できる
- ② 熟練者は積極的に伝承を支援してくれる
- ③ 若手は意欲的にノウハウを吸収する
- ④ 仕組みを作れば、後はうまく行く
- ⑤ 職場は、伝承の取り組みをサポートしてくれる

というおもに会社側の思い込みが挙げられている。①に関して取り上げると、非熟練者には熟練者の「背中を見て覚えさせる」のではなく、作業で重要となる項目(ポイント)を絞ってノウハウを継承させることが必要である。数多くある項目の重要性を定量化(数値化)することができれば、合理的な絞り込みが可能となる。

次に最近の代表的な技能伝承の手法を表1に示す。

表1 最近の技能伝承分析手法

	特徴	重要度の定量化	中小企業での実施
作業分析	映像から作業時間と内容を集計	○	△
クドバス CUDBAS	ブレインライティング +技能マップ化	△	○
モーション キャプチャ	作業映像を 画像解析	○	△
階層分析法 (AHP)	一対比較調査結果 から重要度などを 数値化	○	○

作業分析は、作業映像から作業毎の所用時間などを計測し評価する手法である。作業改善などで多く利用されているが、ノウハウ抽出という技能伝承目的での利用には、必ずしも適

切とは言えない。

CUDBAS(クドバス)は元職業能力開発総合大学の森教授が開発した手法であり、熟練者のグループ作業を経て技能マップを作成し作業マニュアルなどを構築するものである。技能マップ等の作成には、社内体制の準備が必要となる。

モーションキャプチャは、作業動作の姿勢・関節角などを作業映像から画像処理ソフトで分析し数値化する手法である。動作が伴うノウハウは数値化しやすいが、思考が伴うノウハウでは数値化は難しい。

階層分析法(Alytic Hierarchy Process;以降、AHPと表記)は、米ピッツバーグ大のSaaty教授が提唱した手法で、目的・重要項目(評価基準)・対策案(代替案)の階層構造をもとに、一対比較調査を行い、重要度分析などを行う手法であり、乗り心地評価の研究²⁾ほか、アルミ溶接の技能分析³⁾や、国会等移転問題で利用された例⁴⁾がある。

各手法とも長所・短所があるが、本研究では、

- ・作業項目を重要度として定量化しやすい
- ・中小企業でも容易に活用できる

などの点で各手法を検討した結果、AHPを利用することとした。

なお、溶接作業は多岐にわたる作業のため、本研究では、溶接作業の基本に当たる「水平すみ肉溶接」と協力企業で作業回数が多い「完全溶け込み突き合わせ溶接(以降、単に突き合わせ溶接と表記)」の2種類について、調査及び分析をすることとした(図2)。

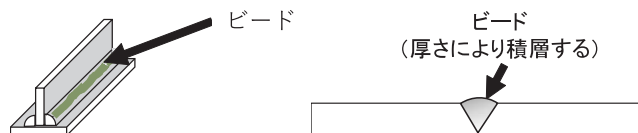


図2 水平すみ肉溶接(左)と
完全溶け込み突き合わせ溶接(右)

AHPを実施する際には、「目標」、「重要項目(評価基準)」、「対策案(代替案)」で構成される階層図を作成し、作業ノウハウである重要項目と対策案を十分に検討しておく必要がある。今回対象とする2種類の溶接作業において、目標を「半自動溶接を行う際に、良好なビード外観と溶接欠陥を生じないこと」と設定し、「重要項目」は7種類を、「対策案」は水平すみ肉溶接で7種類、突き合わせ溶接で8種類を選定した(表2)。AHPの方法により作成した階層図の例として、水平すみ肉溶接用を図3に示す。

表2 選定した重要項目(上)と対策案(下)

重要項目(7種類)	
割れ、ブローホール、融合不良、溶け込み不良、アンダーカット、ビード外観、熱変形	

溶接作業	(不良)対策案
水平すみ肉(7種類)	溶接機の電流電圧調整、前段取り(酸化膜はぎ取り清掃)、シールドガスの流し方、トーチ角度と位置、トーチ移動速度、運棒(ワイーピング)、作業姿勢
突き合わせ(8種類)	溶接機の電流電圧調整、前段取り(酸化膜はぎ取り清掃)、シールドガスの流し方、トーチ角度と位置、トーチ移動速度、運棒(ワイーピング)、作業姿勢、端部処理(スタート・エンド)

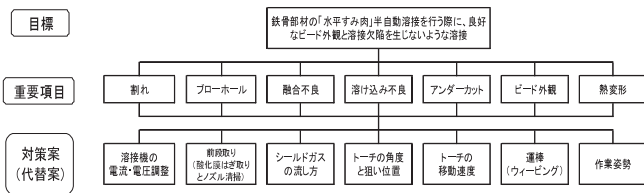


図3 水平すみ肉溶接における階層図

2.2 AHPによる重要度分析結果

前節で作成した階層図をもとに、AHPの手法に従い、図4のような一対比較調査票を作成し、分析を行った。なお、AHPの詳細手順については、文献2)を参照されたい。

鉄骨部材の「完全溶け込み突き合せ」半自動溶接を行う際に、良好なビード外観と溶接欠陥を生じないような溶接に関する一対比較										
	左の項目が圧倒的に重要 (中間)	左の項目が若干重要 (中間)	左の項目がかなり重要 (中間)	左の項目が少し重要 (中間)	左右同くらい重要 (中間)	右の項目が少し重要 (中間)	右の項目がかなり重要 (中間)	右の項目が若干重要 (中間)	右の項目が圧倒的に重要 (中間)	
割れ										ブローホール
割れ										融合不良
割れ										溶け込み不良
割れ										アンダーカット
割れ										ビード外観
割れ										熱変形
ブローホール										融合不良

図4 一対比較調査票の例

分析用データとして、協力企業から選任された熟練者(水平すみ肉溶接4名、突き合わせ溶接3名。いずれも経験年数20~40年)及び非熟練者(比較用)3名のデータを収集した。また、調査票作成及び分析ツールには、専修大学 高萩教授が作成したツール³⁾を一部修正して使用した。

以下に2つの溶接作業における、重要項目の重要度分析結果(表3及び図5,6)を示す。熟練者の分析の結果、水平すみ肉溶接では、「アンダーカット」と「ビード外観」、突き合わせ溶接では「融合不良」と「溶け込み不良」が重要という結果となった。なお、熟練者の傾向はほぼ同じであった。また、比較用として非熟練者のデータも収集したところ、特に水平すみ肉溶接作業での重要項目について、熟練者と非熟練者に違いが見られた。

表3 水平すみ肉(左)と突き合わせ(右)における重要度分析結果

評価項目	熟練者 幾何平均	評価項目	熟練者 幾何平均
割れ	0.07	割れ	0.10
ブローホール	0.13	ブローホール	0.16
融合不良	0.09	融合不良	0.28
溶け込み不良	0.09	溶け込み不良	0.23
アンダーカット	0.20	アンダーカット	0.07
ビード外観	0.16	ビード外観	0.04
熱変形	0.10	熱変形	0.07

—熟練者幾何平均 ———非熟練者A ---非熟練者B ---非熟練者C

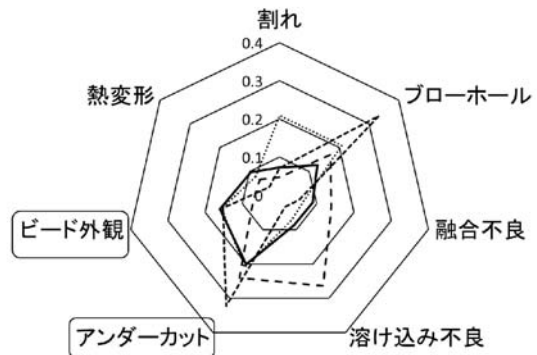


図5 水平すみ肉溶接に重要度分析結果

—熟練者幾何平均 ———非熟練者A ---非熟練者B ---非熟練者C

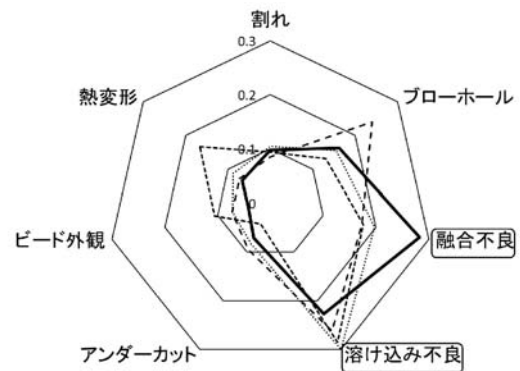


図6 突き合わせ溶接における重要度分析結果

引き続き、2つの溶接作業において、熟練者が重要項目と挙げた項目にどのような対策を採るべきかという分析結果を図7~図10に示す。

順位が前後しているところもあるが、今回調査した熟練者の考えでは、「トーチの角度と狙い位置」、「トーチの移動速度」の2つが重要という結果となり、2つの溶接作業についてAHPを適用することで、比較的容易に熟練者のノウハウ

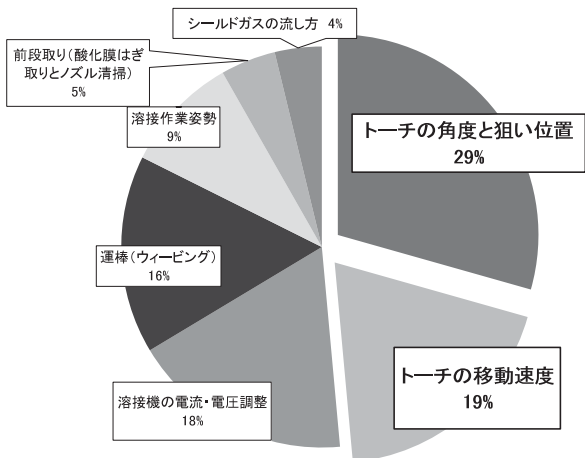


図7 水平すみ肉溶接におけるアンダーカット対策の分析結果

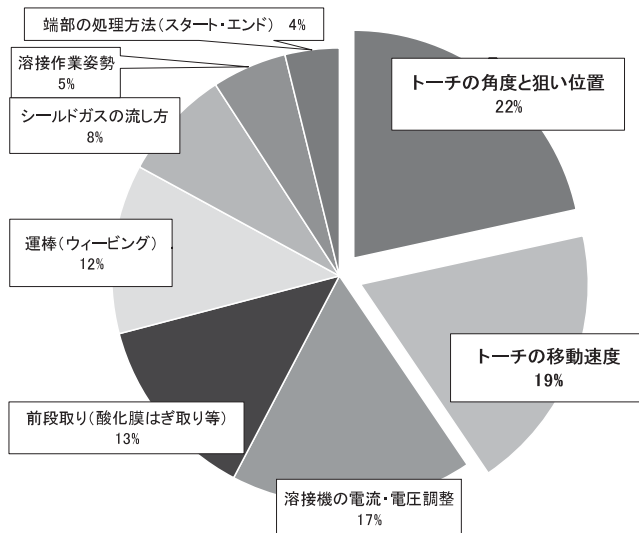


図10 突き合わせ溶接における溶け込み不良対策の分析結果

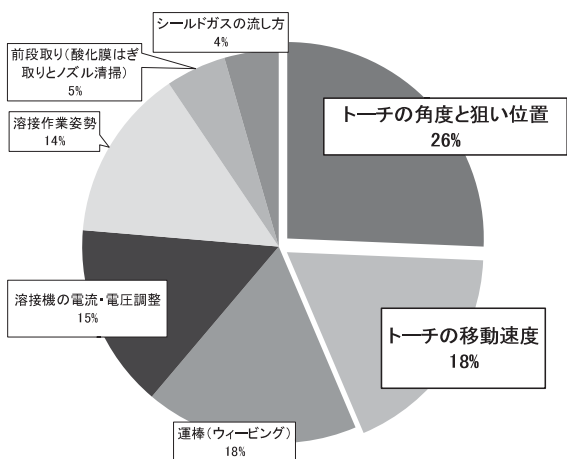


図8 水平すみ肉溶接におけるビード外観対策の分析結果

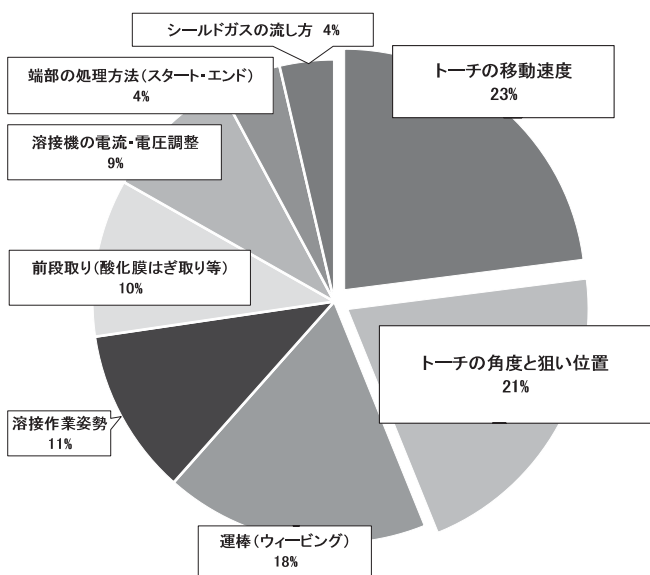


図9 突き合わせ溶接における融合不良対策の分析結果

につながる重要項目及び対策案について、分析・定量化できることが確認された。

分析結果は、協力企業で溶接作業に長年携わってきた熟練者の経験をもとにしたものであり、必ずしもすべての企業で当てはまるものではない。そのため、分析を要望する企業ごとに調査・分析する必要がある。

3. 溶接トーチの動きと視線速度による熟練技能の計測

前章までに、溶接作業における熟練者のノウハウにつながる重要項目及び対策案について階層分析法による分析を行い、定量化できることがわかった。

その結果を踏まえ、今回対象とした2つの溶接作業で重要な作業とされた「溶接トーチ速度」及び「溶接トーチの角度と狙い位置」について、さらに熟練者と非熟練者が数値的に比較できるかを検討した結果、作業中の溶接トーチの動きを多軸センサ及び視線計測装置を利用して計測し、分析することとした。

溶接トーチの動き計測風景を図11に示す。多軸センサはBiologging Solutions社製の超小型6軸データロガーを溶接トーチに取り付けて使用した。このセンサは、6軸の加速度と角速度(X,Y,Z方向加速度+3軸周りの角速度)が測定可能である。また、視線計測装置はトビー・テクノロジー社製のGlass2 50Hzを使用した。これは眼鏡型装置であり、装着者の視点を○印で映像に記録する装置である。ただし、映像は溶接用防護面を通しての記録になる(図12)。

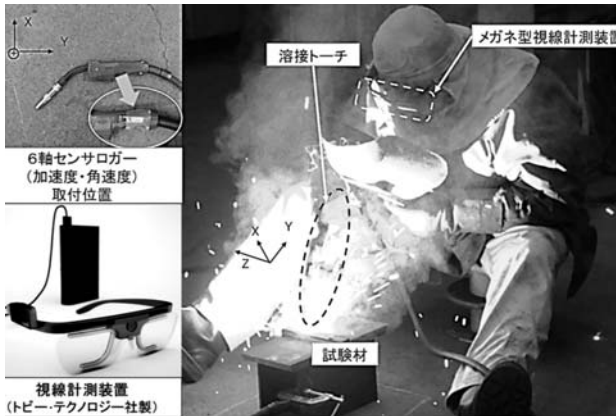


図11 溶接トーチの動き計測風景

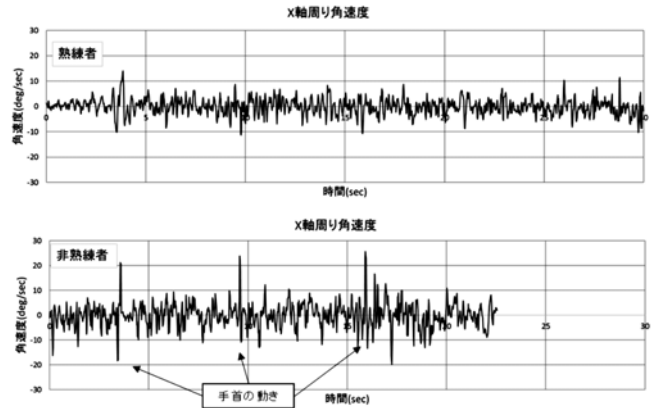


図14 溶接トーチの6軸センサ計測結果 (X軸角速度)



図12 視線計測装置による熟練者の視点 (防護面中央の○印)

トーチ速度を計測するには、理論的には6軸センサでの加速度値を積分すればよいが、センサのドリフトの影響もあり、高い精度での算出は困難であった。むしろ、作業内容からトーチ速度と視線移動速度はほぼ一致していることから、トーチ速度は視線計測装置で測定することとした。映像に○印で記録された視線情報からトーチ速度を算出するに当たって、ライセンスフリーの運動解析ツールKinovea0.8.25⁶⁾を使用した。

水平すみ肉溶接作業における、熟練者・非熟練者の視線計測装置及び6軸センサによる測定結果を図13、14に示す。今

回の測定では、熟練者と非熟練者で下記の点で特徴的な違いが見られた。

- ①非熟練者の大きな視点動揺が複数で見られた。同時に計測していた6軸センサのデータでは、溶接トーチを握る手首の動きに起因する角速度が計測された。計測後のインタビューから、非熟練者の「手首の動き」は無意識的な動きだった。なお、同時に撮影していた汎用ビデオカメラ映像では、溶接光の影響で手元の詳細な動きまで観察できなかった。熟練者では「手首の動き」は計測されなかった。
- ②非熟練者の作業に係る所要時間が熟練者に比べ短かった。すなわち、非熟練者の溶接トーチの移動速度が熟練者に比べ速いことが判明した。溶接速度は溶け込み量に大きく影響するので、速度を均一かつ熟練者の速度に近づけることが溶接品質を高めることにつながる。今後、視線計測や多軸センサなどの計測結果と非破壊検査などによる品質検査の相関性を確認できれば、品質予測にも活用できる可能性がある。

4. 作業標準ガイドの作成

前章までの知見を活用し、非熟練者が作業現場で参考にできるように、携帯端末 (Windows タブレット) で動作する作業標準ガイドを作成した (図15)。

ガイドは企業で平易に利用操作できるように、導入の多いマイクロソフト Office (Excel, PowerPoint) 上での動作となっている。

ガイドは、2つのツールで構成されている。一方のツールは「AHP分析ツール」で、AHPで重要度分析を行うための一対比較調査票の作成と重要度分析を行うものであり、Excel2013上で動作する (図16)。もう一方のツールは「作業ガイド」であり、AHPでの分析結果や動画なども表示できるようにしており、PowerPoint2013上で動作する (図17)。

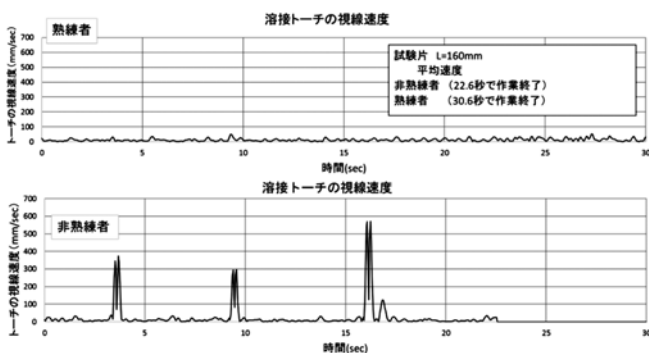


図13 視線速度計測結果

作業動画は、視線と正面・側面からの同期映像であり、作業姿勢などを確認できるほか、溶接作業音を聞くことができ、熟練者而非熟練者自身の作業音・リズムの違いを聴覚的に確認することができる。AHPの分析結果の表示では、作業における熟練者の知見による重要項目が表示されるほか、もし該当する不良を発生させてしまった場合、今後どのような対策を学習すべきか、熟練者の知見を表示させることもできる。併せて、作業後の見本（合格品、不合格品）となる写真や短文コメントも表示される。

さらに、視線及び多軸センサの波形データ（csv形式）を事前に編集し、携帯端末に読み込ませることで、熟練者を基準とした「熟練度」を表示させる機能も付加している。熟練度は、視線及び6軸センサの波形データを、ベクトル内積から算出する「コサイン（COS）類似度」を使って計算し、

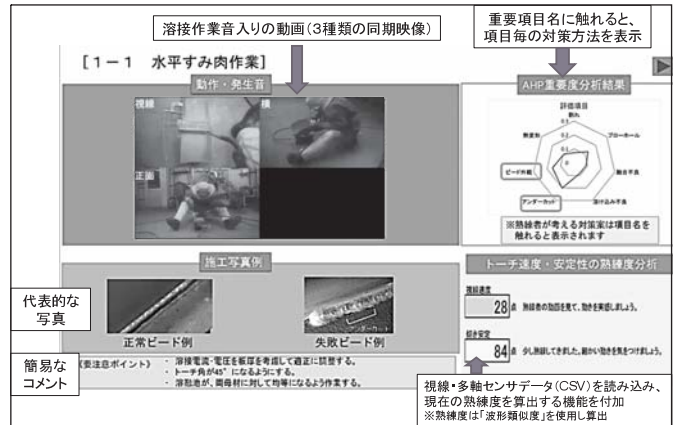


図17 作業ガイド画面例 (PowerPoint2013)

点数化した。なお、蓄積するデータ数を増加させることで、たとえば機械学習や品質工学のMTシステムなどでも熟練度が計算可能である。算出手法による熟練度の判定精度については、今後の検討課題である。

本作業ガイドを協力企業で利用したところ、一定の評価を受けた。また、意見としては、

- ・「3画面の動画（特に視線）」は目新しい。新人教育に良い
- ・横動画は「腕の位置」を特に見たい
- ・様々な作業データをもっと追加したい
- ・一年毎などで熟練度がどう変化したか見たい
- ・AndroidやiPadでも動作できるようにしてほしい

など、多数が出されたため、今後、さらに利用しやすいガイドの開発を検討したい。

5. まとめ

本研究では、現場で簡便に実施できることを念頭に、溶接作業における熟練技能を、AHPを用いて定量的に表現した。また、溶接トーチの動き、作業者の視線移動をセンサなどで記録し数値化した。さらに、これらで得た知見をもとに、携帯端末で使用可能な作業標準ガイドを作成した。

本研究で使用した定量化の手法は、人的・資金的に余力の少ない場合でも現場で簡便に実施できるものである。

本研究の成果は、溶接作業だけでなく、加工・検査作業や、一次産業への展開が期待できることから、今後、様々な技術支援に活用するとともに、関係機関とも連携して、普及を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(国研)産業技術総合研究所



図15 作成した溶接作業標準ガイド (Windowsタブレット)

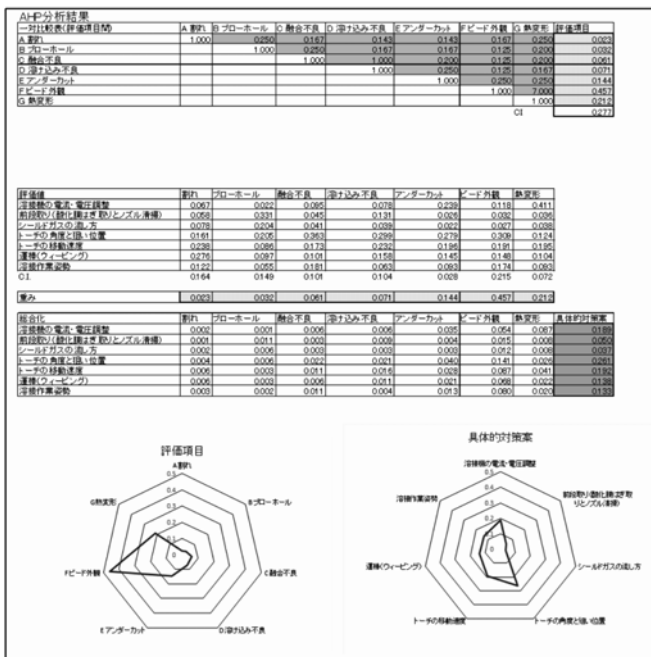


図16 AHP分析ツール画面例 (Excel2013)

瀬渡直樹主任研究員及び専修大学商学部 高萩栄一郎教授には、溶接作業での階層分析法の適用に際し、多くの助言及び分析ツールの提供を頂いた。また、株式会社 竹原鉄工所 難波常務及び結城課長はじめ社員の方々には、業務多忙の中で、熟練データ収集・作業ガイド作成などで多大な協力を頂いた。記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 野中帝二・安部純一：ものづくりと技術・技能伝承,日刊工業新聞社 工場管理 Vol.58 No.14, pp.10-23, (2012)
- 2) 神生直敏・飯田憲一：乗り心地を考慮した車両評価システムの開発,北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.313, pp.59-63,(2014)
- 3) 瀬渡直樹・森和男・廣瀬伸吾：階層分析法を用いたアルミニウム溶接熟練者の技能抽出と判断傾向の分析, (一社)軽金属溶接協会 軽金属溶接 Vol.50 No.8, pp.14-22, (2012)
- 4) 第153回国会衆議院 国会等の移転に関する特別委員会 議事録第3号, 衆議院, pp.26,(2001)
- 5) 高萩栄一郎・中島伸之：Excelで学ぶAHP入門, オーム社, pp,162,(2005)
- 6) <http://www.kinovea.org/>