

溶接技能における熟達度評価に関する研究

-溶接動作の筋活動と熟達度との関係性-

A Study of Estimation Proficiency of Welding Skill

- Relationship of Muscular Activity and Proficiency of Welding Motion-

松浦 慶総¹ 高田 一¹

Yoshifusa Matsuura¹, Hajime Takada¹

¹ 横浜国立大学

¹ Yokohama National University

1. はじめに

昨今の急激な円高により製造拠点の海外移転，サプライチェーンのグローバル化がより進み，国内製造業の空洞化が懸念されている．さらにこれまでものづくりを支えてきた，いわゆる“町工場”といわれる中小企業では，重要な役割を果たしてきた熟練技能者の高齢化，若者の製造業離れによる後継者不足にともなう製造技術・技能の継承問題が深刻化している．特に団塊世代が2007年以降に大量退職する「2007年問題」は，日本の工業に大きな影響を与えているといわれており^[1]，早急な対策が必要となっている．

しかし，製造業における教育はベテランの熟達者が現場で若手を直接指導するOJT（On the Job Training）などの手法に依存したままである．このことは，熟達者が教育者としてもベテランであることが前提であると考えられるが，実際には教育を意識しながら技能習得を行っているわけではないため，すぐれた教育者とは限らない．特に技能動作では熟達者ごとに指導方法が異なる，若手のモチベーション維持が困難である，効果的かつ適切な教育指導を十分に行うことが難しいといった問題が生じる．したがって，製造技術や技能の保存技術とその教育支援システムの開発が強く望まれている．

本研究では溶接技能のうち，溶接実技に関する技能動作を対象とする．溶接は溶接過程での品質判定や製品での破壊検査が困難といったことから，「特殊工程」と呼ばれている．例えば原子力発電所の配管溶接の場合では極めて高い品質管理が求められ，実際に溶接作業を行う技能者の高度な技能レベルが要求される．

この溶接技能動作の学習で通常用いられる主な情報は，溶接棒の角度，運棒動作，アーク長，アークの状態，熔融池の状態である．この中で溶接棒の角度は定量的であるが，その他の情報は定性的である．また溶接棒の角度と運棒動作は直接身体動作にかかわる情報であり，その他の情報に影響を及ぼしていると考えられる．しかし，これまで行われている溶接技能教育では，各情報の関係をあまり明示的に指導せずに個別に評価し，また指導する熟達者ごとに指導するポイントが違ふことが多く，未習熟者が戸惑い，また習熟に時間がかかってしまう．

したがって，技能プロセス情報や技能レベルを定量化し，それらを基にした教授システムの開発がきわめて重要である．また熟練技能者が無意識で行っている溶接作業において，品質を左右するポイント，また技能向上のためのコツといった，これまで「暗黙知」として作業経験のみで獲得していた知識を構造化し，誰もが理解できる表現手法で提示する，「暗黙知の可視化」が必要である．これにより，学習過程において未習熟者が動作の注視点を認識し，同時に熟練技能者が未習熟者の学習状況を把握することが可能となる．

本研究では溶接技能動作の熟達度評価システムの開発を目指し，既報のとおりまず品質工学手法の一つであるRT法^[2]を用いた溶接技能動作の判定システムの説明を行った^[3]．しかし，技能動作の向上には身体の動かし方，すなわち身体部位のどこに注意を向けることで無理のない姿勢，動作が実現できるかという筋活動と熟達度との関係についてはほとんど研究がされていない．したがって，今回は熟達度と筋活動の関係性について解析を行った．

2. 学習のための溶接技能情報

溶接の品質に関わる重要な技能情報として、(1) 溶接棒の状態、(2) アークの状態、(3) 溶融池の状態が主に挙げられている。

(1) 溶接棒の状態としては、溶接面、溶接方向に対する溶接棒の角度と運棒動作に関する情報である。溶接棒の角度に関しては、溶接教習のテキスト等で溶接状態（溶接方向や溶接面の状態）に応じて定量的に明示されている。また運棒動作は主に直線的に運棒をするストリング運棒法とジグザグに運棒するウィービング運棒法があり、運棒方法についてテキストや図、動画等で紹介されている。

(2) アークの状態としては、アーク長とアークの状態、アーク発生時の音に関する情報である。アーク長は溶接状況に応じて長さを定量的に明示している。アークの状態はアーク光の明るさや広がり具合といった視覚的情報であり、アーク発生時音と同様に擬音等により抽象的に表現されている。

(3) 溶融池の状態は、アークにより溶接棒と母材（接合する金属）が溶けている部分の状態であり、溶けている部分と固まり始めている部分がどのような形状になっているか等、抽象的に表現されている。

このように、溶接学習のために非常に重要な技能情報ではあるが、溶接棒の状態以外は定性的、抽象的な表現で、しかも情報量は極めて少ない。またこれらの情報は本来相互に関係をし、溶接品質に影響を及ぼしているが、各技能情報の相互関係と溶接技能に関しては全く議論されていないのが現状である。さらに身体動作に関する情報がほとんど提供されていない。このことは、基本的に技能習得は経験を重視するという考えが根本にあると考える。では、経験による習得とは何かを考えてみる。

W・エドワーズ・デミングが提唱した PDCA サイクルの概念を当てはめてみると、まず技能動作を始める前にイメージにより計画（P：Plan）をし、その後実際に動作をした（D：Do）後、結果を評価（C：Check）して改善（A：Act）する。これを繰り返すことで計画と実際の結果（事例）とのデータベースを自分の中に構築し、よりよい結果を得ることができる計画を導き出す、というプロセスと考えることができる（図 1）。このデータベースが経験に相当し、規模と構造が技能の熟達度に影響し、同様のデータベースを持つことでイメージの共有が可能となると考える（図 2）。このデータベースの構造や構築のプロセスという概念が技能動作の教育にほとんどなかったため、反復学習による気づきに依存した教育になっている。したがって、熟達者の持つデータベースの構造から熟達度に応じた学習計画を作成でき

ば、効果的な技能学習の実現が期待できる。

今回はこの技能情報のうち、身体動作のとくに上腕の使い方が溶接の熟達度とどのように関係しているかを筋電位から評価する。

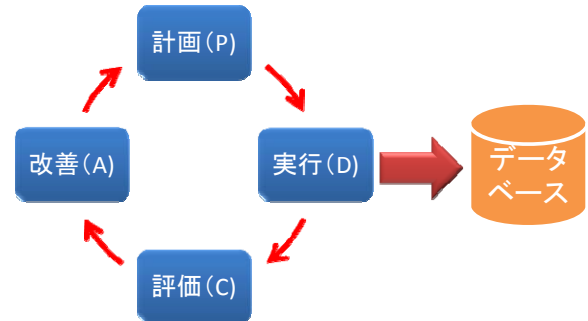


図 1 技能データベース構築プロセス

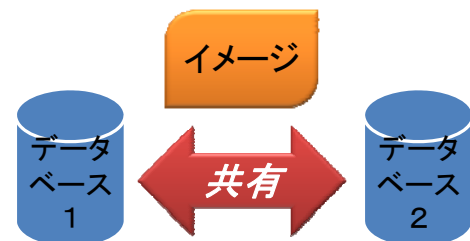


図 2 イメージの共有

3. 解析方法

動作解析システムでは、まず赤外線透過フィルタを用いた 2 カメラ同期撮影システムで、溶接時の動作を撮影する。撮影した溶接動作からモーションキャプチャシステムにより 3 次元時系列位置情報を取得する。取得した位置情報から、動作習得の際に重要となる要素動作の分類、および評価項目データの算出を行う。これらのデータから品質工学の一手法である RT 法により、熟練者技能の模範動作データを「良品」として単位空間を作成し、学習者の動作データとのマハラノビス距離を求めて正誤判定を行う。

3. 1 システム概要

3. 1. 1 2 カメラ同期撮影システム

3 次元時系列位置情報を取得するには、2 方向から同期して撮影した動画像が必要となる。また今回はアーク溶接の技能動作を測定対象としているため、非常に強いアーク光が撮影時に白飛びを引き起こし、マーカを撮影することが困難になってしまう。したがって、本研究では IEEE1394 カメラ（PGR 社製 Flea2 カメラ白黒 VGA モデル）2 台と PC を用いて、30fps

で同期撮影が可能なシステムを作成した。また、通常 CCD カメラには赤外線カットフィルタが CCD 素子に取り付けられているが、今回使用したカメラは脱着可能であり、それを取り外してレンズに光吸収・赤外線透過フィルタ（富士フィルム製）を装着した。これは、アーク光の影響を最小限にし、さらに後工程のモーションキャプチャの時にマーカ追尾を容易にするために、マーカのみを撮影するためである。そのため、マーカには 6V 電球を使用した（図 3）。

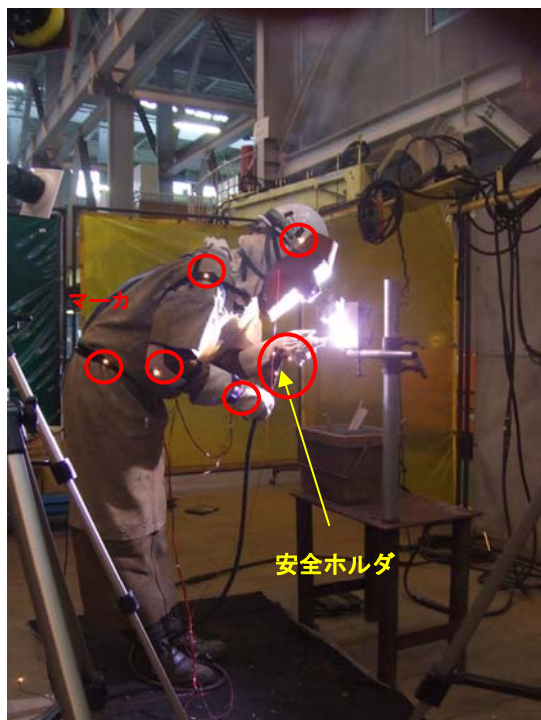


図3 撮影結果例

3. 1. 2 モーションキャプチャシステム

モーションキャプチャシステムは、2カメラ同期撮影システムで撮影した動画データを DippMotionPro（ディテクト社製）により計測ポイントの3次元位置の時系列データに変換する（図4）。なお、今回の測定は、頭部、肩部、肘部、手首部の各1か所と、安全ホルダ部3か所の計7か所にマーカを貼付している。

3. 1. 3 筋電位計測システム

本システムでは、溶接動作時の腕の筋電位を測定することで、溶接棒を操作する際の腕の姿勢や溶接棒の位置のだけでなく、腕の使い方、溶接棒の保持、移動の仕方のコツを抽出する。筋電計は EMG アンプ（電極・アンプ一体型）とアイソレータ（バイオメトリクス社製）、データロガー（キーエンス社製）で構成されている。EMG アンプの貼付個所は、橈側手根屈筋、上腕二頭筋、烏口腕筋、僧帽筋の4

か所である。筋電位データ 4ch とマーカ電圧 1ch をデータロガーに接続し、計測開始時にマーカを ON/OFF させることで、2カメラ同期撮影システムと同期させている（図5）。

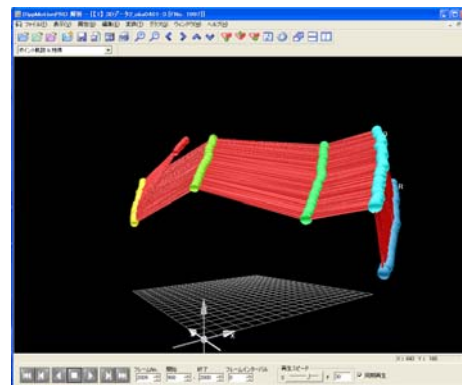


図4 溶接動作の3次元軌跡 (DippMotionPro)



図5 EMG 計測例

4. 溶接実験

4. 1 実験概要

今回の実験ではアーク溶接を対象とし、裏当て金有りの立向突合わせ溶接をウィービング運棒法で実施した。実際には溶接する板の下から上に向かって溶接棒を細かく左右に往復させながら溶接する高度な手技である。また、被験者は実務経験15年（被験者 A）と8年（被験者 B）の熟達溶接技能者、4～5年の溶接技能者（被験者 C, D, E）、4カ月の溶接技能者（被験者 F）で実施した。

4. 2 EMG 解析結果

各被験者の測定をした EMG 解析結果を示す。なお、溶接実験は1枚につき3層、合計5枚実施し、実験後に自らの溶接結果を判定し一番良いものと悪いものを選定してもらった。今回は一番良い結果のデータをそれぞれ比較した。またグラフでは肘から手首のデータとして橈側手根屈筋、肘から肩部にかけてのデータとして上腕二頭筋、烏口腕筋、肩から首のデータとして僧帽筋をグラフ化した。

その結果、溶接時間は1分30秒から2分近くかか

り姿勢も中腰姿勢であるが、被験者 A, B は開始から終了までほぼ一定でかなり低い筋活動であった (図 6, 7). この 2 名は熟達者であり、溶接時の姿勢を見ると力が程よく抜けた楽な姿勢で溶接をしており、実験後のアンケートでもあまり疲労感はなかった。

被験者 C, D に関しては肘から手首は一定かつ低い筋活動であったが、肘から肩付近の筋活動で顕著な活動が見られた (図 8, 9). 被験者 C では溶接棒を支持するために肩付近に力が入ってしまい、被験者 D ではウィービングを肩で動かすようにしている。これにより溶接結果自体は良好なのだが、疲労しやすい傾向にある。

被験者 E は上腕部に力が入ってしまい肘で動かし、被験者 F は一番経験が浅いため肩付近に非常に力が入ってしまっているのが分かる (図 10, 11)。

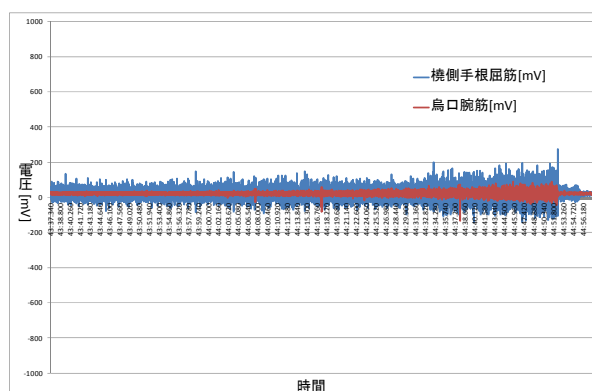


図 6. 1 EMG 解析結果 (被験者 A)

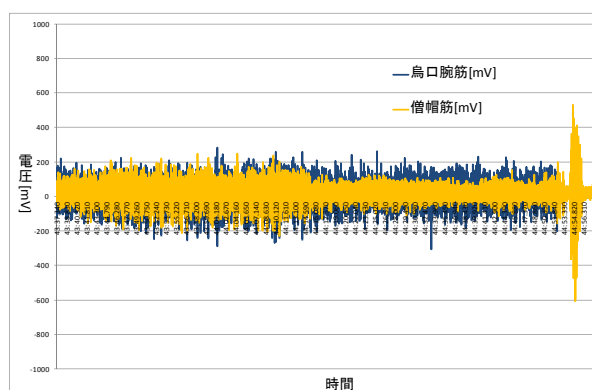


図 6. 2 EMG 解析結果 (被験者 A)

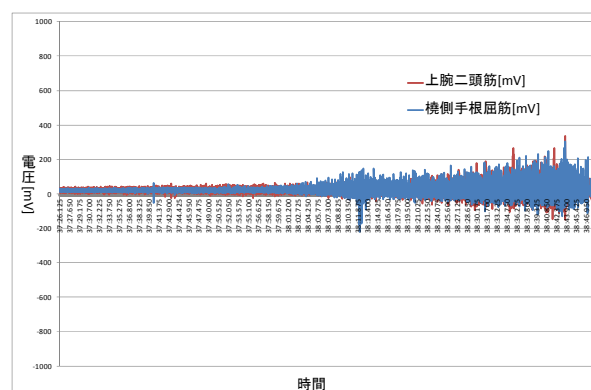


図 7. 1 EMG 解析結果 (被験者 B)

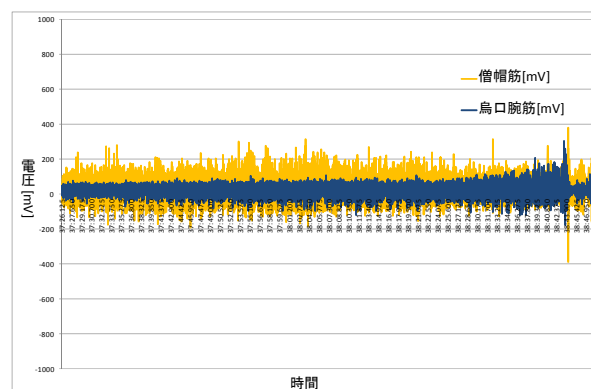


図 7. 2 EMG 解析結果 (被験者 B)

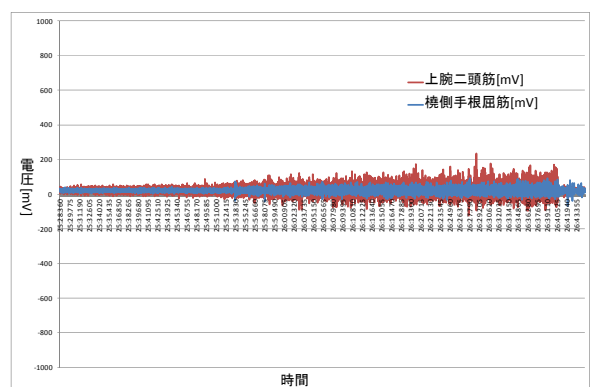


図 8. 1 EMG 解析結果 (被験者 C)

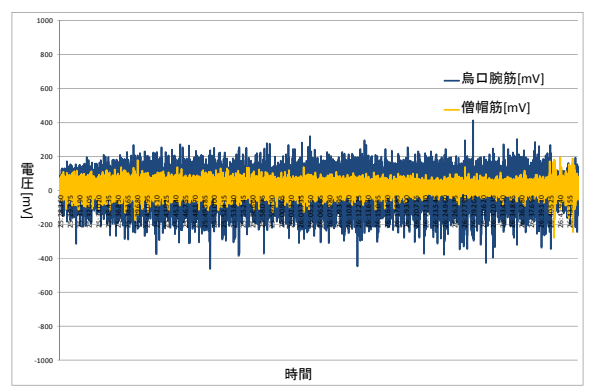


図 8. 2 EMG 解析結果 (被験者 C)

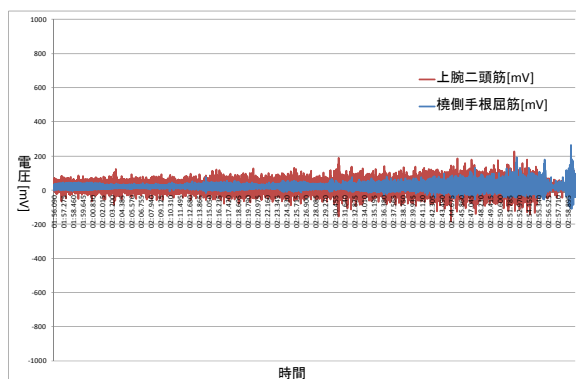


図 9. 1 EMG 解析結果 (被験者 D)

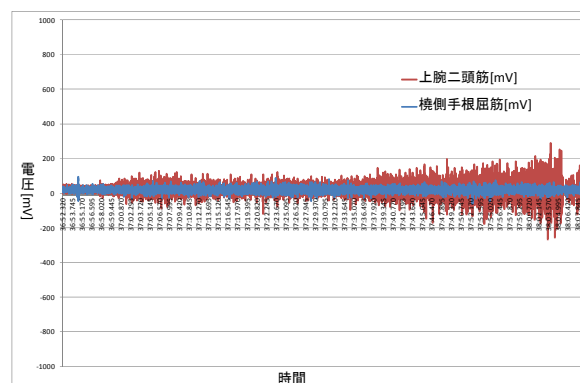


図 11. 1 EMG 解析結果 (被験者 F)

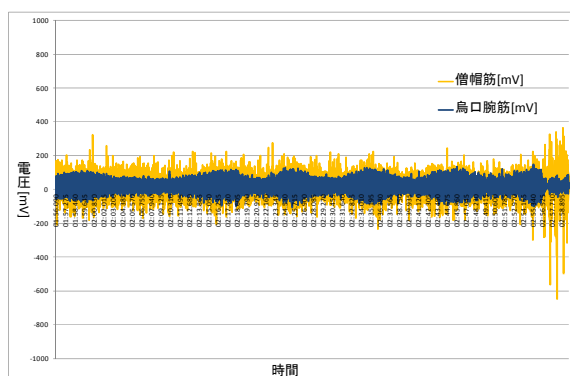


図 9. 2 EMG 解析結果 (被験者 D)

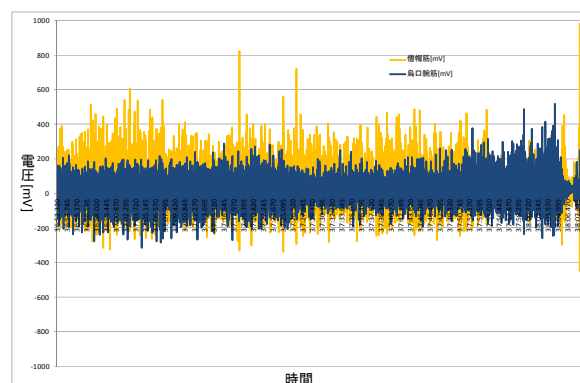


図 11. 2 EMG 解析結果 (被験者 F)

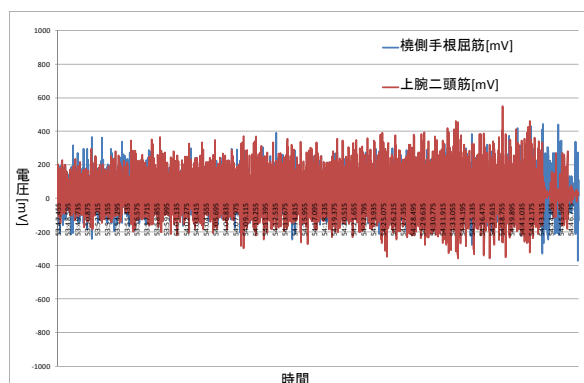


図 10. 1 EMG 解析結果 (被験者 E)

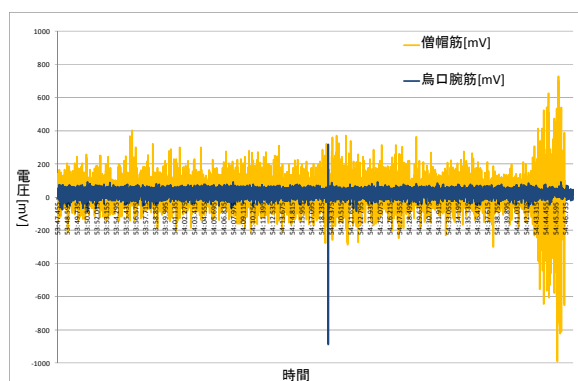


図 10. 2 EMG 解析結果 (被験者 E)

5. まとめ

本研究では溶接技能の熟達度を評価するシステム開発を目的とし、筋活動と熟達度との関係について評価を行った。その結果、熟達者は効率的な筋活動を行っているが、熟達度が下がるにつれて余計な力が働いていることが分かった。

今後はさらに各部位の挙動と筋活動との関係を解析し、技能動作と筋活動情報からの熟達度評価、さらにどの部位を意識させて動作をすれば熟達度が向上するか、といった技能教育のためのデータベースの開発を目指す。

謝辞

本研究は科研費（23501100）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 経済産業省: 2009 年版製造基盤白書, (2009).
- [2] 立林 和夫, 長谷川 良子, 手島 昌一: 入門 MT システム, 日科技連出版社, (2008).
- [3] 松浦 慶総, 高田 一: 技能継承を指向した溶接技能解析の研究, 第 9 回身体知研究会発表資料, (2010).