

アーク溶接におけるセンシング -外乱要因の影響と回避方法-

久貝克弥* 辰巳智基** 吉岡竜也**

Sensing on Arc Welding

-Effects of Disturbance Factors and their Avoidance Methods-

Katsuya KUGAI* Tomoki TATSUMI** Tatsuya YOSHIOKA**

The arc sensor is considered as a mature technology. It detects the aiming deviation on arc welding by using arc phenomenon itself, and excellent for maintenance free under spatter and fume circumstances of arc welding. But this technology is not popular even now for automatic arc welding. The considered major reason is miss sensing because of disturbance factors on arc welding. In order to popularize arc sensors, this research will reconsider the arc sensor detection method. The aim is also to find a reliable signal extraction method.

In this paper, we prepared 6 kinds of situation under which the arc phenomenon will become unstable. These are lack of sealed gas, magnetic blowing, unstable welding wire feeding, consumption of electric power feeding tip, oil applicated workpiece, rusted workpiece. Under these disturbances, we investigated how arc phenomena disturbed. And form these knowledges, the countermeasures so as to avoid miss sensing were proposed.

Keyword Arc welding, Arc sensor, Robotic welding

1. 序章

1. 1 緒言

アークセンサは古くから利用されている技術であり、数多くの研究がなされてきたが、主にセンサの検出感度向上を目的としていた。また近年においてアークセンサは成熟した技術であると考えられており、新たな研究も少ない。しかし、溶接ロボットの出荷台数に対するアークセンサの搭載率は現在でも高くない。本研究ではその原因がセンシングの信頼性にあると考え、誤検出を回避するための手法について検討している。本報告では炭酸ガス溶接における短絡移行において故意にアークを乱して、その際のアークセンサの検出がどのようにばらつくのか、或いは誤検出するのかについて調査し、その回避方法について考察する。

1. 2 アークセンサとは

アーク溶接の自動化を可能にするためには溶接状態をリアルタイムに検出するセンサが重要となる。しかし、アーク溶接環境において狙いずれ検出を行う等のセンシングは容易ではなく、高い輝度のアークによりワークを撮像する技術や、溶接時に発生するスパッタやヒュームからレンズを保護する技術が必要となり定期的なメンテナンスが必須となる。また、狭隘部を溶接せねばならないケースも多いことからカメラとワークの干渉も問題になる。

それに対してアークセンサはアーク現象そのものを利用して溶接線に対するトーチの狙いずれを検出する方法であるため、溶接トーチ周りに装置を必要としないため溶接環境下においてメンテナンスフリーを実現でき、ワークとの干渉も考慮しなくてよい。しかしその反面、アーク現象を不安定にする要因にセンシングを乱されやすく、信頼性を確保するために、溶接品質の必要性以上にアーク現象の安定化に努めなければいけないという欠点を持つ。

アークセンサの検出原理を Fig.1 に示す。母材開先内でトーチをウィービングさせることにより、アークと母材の

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

**近畿大学工業高等専門学校 専攻科

生産システム工学専攻 機械系

間の距離が変化し、それに応じて電圧や電流の変化が起きる。ウィービング左右における電圧や電流が対称になっていればトーチは開先の中心と判断されるが、非対称であれば溶接の狙いずれが生じていると判断し、対称になるようトーチを移動させる。これからもわかるように、アークセンサにおける溶接現象が詳細に解析されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾のに対して、センサの検出原理⁽⁴⁾は解析結果を応用したのではなく、経験的に生み出されたアルゴリズムとなっている。

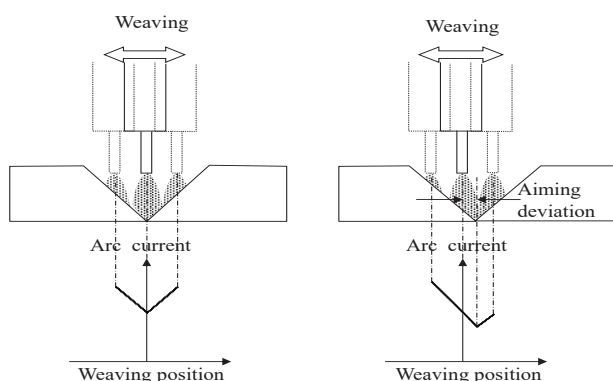


Fig.1 Principle of Arc Sensor

溶接中に起こりうるアークを乱す要因に対してアークセンサが誤検出を起こしやすいのは、複雑なアーク溶接現象に対してセンシングアルゴリズムが十分にそれらを考慮されたものになっていないことが挙げられる。また、アークの状態がどの程度不安定な状況で、アークセンシングにどれだけの誤検出をもたらすのかを自己評価する機能が不足していると考えられる。

1. 3 研究の目的と進め方

筆者らは過去に同様の研究を行っていたが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、過去の成果も踏まえ、日本で一番ポピュラーに使用されているCO₂溶接に対応できるアークセンサの開発を目標とする。アーク溶接には、アークそのものの特性、ワーク溶融の影響、電極溶融の影響、溶滴移行の影響が複雑に関与するため、それぞれの要因を分離して捉えるために、研究をステップに分けて実施してきた。最初にTIG溶接を銅板ワークに行ってアーク現象単独での特性について調べ⁽⁷⁾⁽⁸⁾、次にワークを鉄板にしてワーク溶融の影響を調べ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、更にMAG溶接にて消耗電極方式による電極溶融の影響を調べていき⁽¹²⁾⁽¹³⁾、最後にCO₂溶接を使用し短絡移行の特性を調べることにした。本報では、CO₂溶接における短絡移行形態のアーク溶接において、生産現場で起こりうる各種外乱を故意に与えたときのアークセンサの狙いずれ検出について調査を行った。また、その結果に基づいて誤検出を回避する方法を提案する。

2. 生産現場で起こりうる外乱要因

実際の溶接現場で起こりうると思われる外乱要因として、ガス流量の減少、磁気吹き、ワイヤ送給の不安定、電流供給の不安定、ワークへの油付着、ワークの錆の6種類を考えた。

ガス流量の減少については、ガスボンベの交換が遅れて生じる場合や、トーチのノズルにスパッタが付着してガスの流れが悪くなった場合を想定しており、実験ではガスボンベのレギュレータを操作し、流量を通常の200/minから50/minに下げた。磁気吹きについては生産現場では大型のワークを溶接する際にクランプ部位や溶接のアース線を取り付ける位置によって生じるが、実験ではワークにネオジム磁石を取り付けることで現象を起こした。ワイヤ送給の不安定はコンタクトチップ内部にワイヤ送給の際に送給ローラで発生したワイヤの削り粉が溜まることで送給抵抗が大きくなって発生するが、実験ではワイヤリールをランダムに手で押さえつけることで発生させた。電流供給の不安定に関してはコンタクトチップの交換を怠るとワイヤを通す穴が摩耗で拡大して給電が悪くなるが、実験では直径1.2mmのワイヤに対して穴径を3mmまで拡大することで再現した。溶接ワークは前工程で切断加工されたものが多いがその際の切削油が表面に多量付着している場合があり、実験ではワークに切削油を故意に塗布することで再現した。また大型の重量物ワークは溶接工程に入る前に野外に保管されていることが多く表面が錆びている場合があるため、実験ではワークを塩水につけて数日間野外に放置して錆びを発生させた。

3. 実験装置と実験方法

Fig.2に実験装置の概要を示す。MAG トーチをロボット手先に取り付け、V継ぎ手の鉄板上をウィービングしながら溶接する。

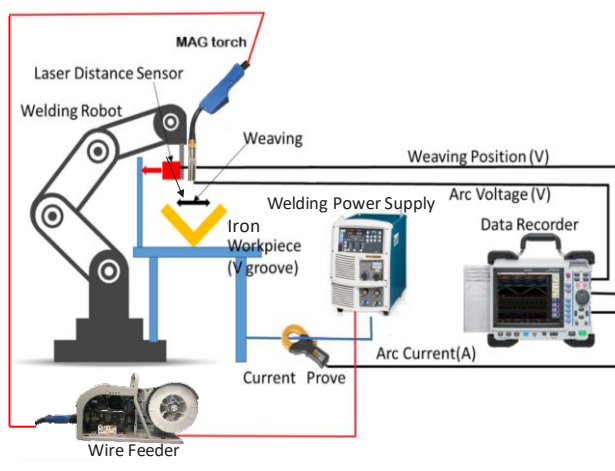


Fig.2 Experimental Apparatuses

その際の溶接電流、溶接電圧、ウィービング位置をデータレコーダに記録する。溶接電流はパワーケーブルを電流プローブで挟み込んで測定する。溶接電圧はチップ-母材間の電圧を直接測定する。ウィービング位置はロボット手先にレーザ距離センサを横向きに取り付け、ワーク台に置かれたついたてに向けてレーザを照射することで測定する。

溶接の実行は Fig.3 に示すように、溶接開始からは鉄板が加熱されるまでしばらく直線溶接を行う。その後ウィービングを開始し、+2mm ずれから-2mm ずれまで V 継ぎ手の溶接線を斜めに横切るように溶接する。このようにすることにより、各ずれ状態における溶接電流と溶接電圧の波形が一度の溶接で測定できる。測定された溶接電流及び溶接電圧は Fig.4 に代表例を示すように、横軸をウィービング位置とした図で評価する。

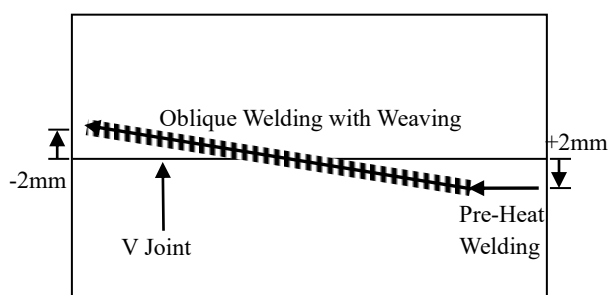


Fig.3 Top View of V Groove and How to Weld.

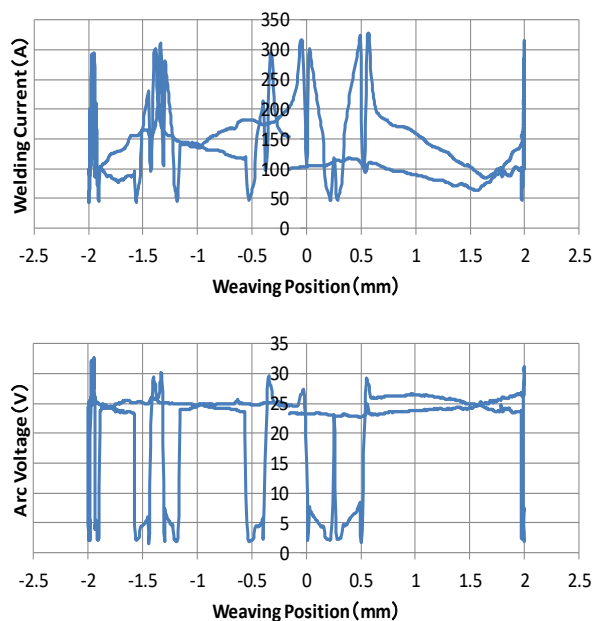


Fig.4 Measured Welding Current and Arc Voltage

実験条件について説明する。使用したシールドガスは 100%炭酸ガスで、ワークには板厚 3.2mm の軟鋼を用いた。溶接条件はもっとも一般的に使用される 150A とした。溶接電圧は溶接電流に対して適正値の 17.5V とした。ロボッ

トの溶接速度はワーク板厚に対して適正なビード幅となるよう 50cm/min と設定したところ、ビード幅 8mm が得られた。ウィービング条件としては溶接速度に対して適切な刻みで揺動するように周波数を 5Hz とした。これにより溶接進行 1.67mm でウィービングが一往復する動作となった。振幅はアークセンサの十分な性能を得るためには広い方が望ましいが、広すぎるとビード外観が悪くなるため、適正値として $\pm 2.0\text{mm}$ とした。

4. アークセンサによるずれ量検出方法の検討

この実験条件下ではアークは短絡移行と呼ばれる形態となる。溶融したワイヤは溶滴となって 10ms 程度アーク力によって持ち上げられた状態になり、その後ワイヤの溶融が進行して溶滴が大きくなることでワークと接触（短絡）してワーク側に溶融金属が流れる。これを繰り返すために、短絡時は溶接電圧が 0V 近傍まで急落し、溶接電流は逆に 350A 近傍まで上昇する。従って溶接電流および溶接電圧の波形は Fig.4 に示したように、短絡が起きている部分で大きく値が急変する挙動となる。

まずは外乱がない状況において、アークセンサによる狙いずれ量検出がどれほどの感度や精度で可能なのかを確かめる。狙いずれ量をセンシングする元データとして、Fig.5 に示す溶接電流測定値および溶接電圧測定値から以下の A～H の情報を抽出する。

- A:ウィービングが+位置において+方向に進んでいるときの平均溶接電流
- B:ウィービングが+位置において-方向に進んでいるときの平均溶接電流
- C:ウィービングが-位置において+方向に進んでいるときの平均溶接電流
- D:ウィービングが-位置において-方向に進んでいるときの平均溶接電流
- E:ウィービングが+位置において+方向に進んでいるときの平均溶接電圧
- F:ウィービングが+位置において-方向に進んでいるときの平均溶接電圧
- G:ウィービングが-位置において+方向に進んでいるときの平均溶接電圧
- H:ウィービングが-位置において-方向に進んでいるときの平均溶接電圧

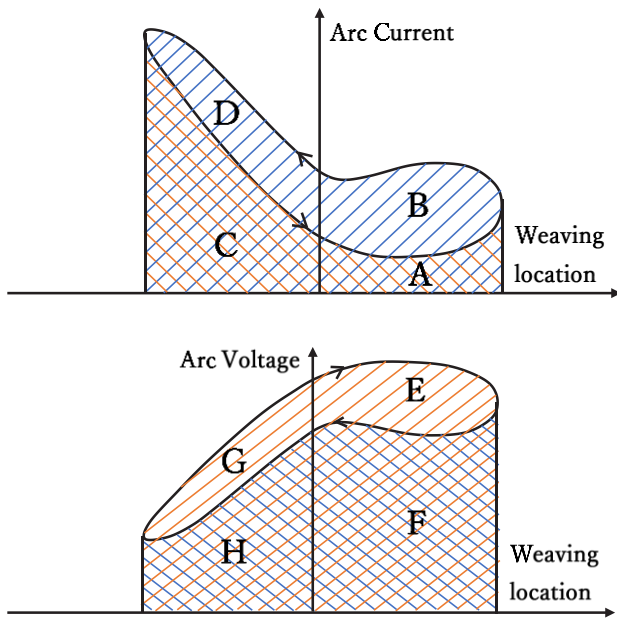


Fig.5 Extraction of Sensing Data from Welding Current and Arc Voltage Waveforms

この A～H の値より、狙いずれ量を推定するための以下の物理量を定義する。

- 1) 平均電流 : $(A+B+C+D)/4$
- 2) 左右電圧差 : $(A+B)/2 - (C+D)/2$
- 3) 往復電流差 : $(A+C)/2 - (B+D)/2$
- 4) 平均電圧 : $(E+F+G+H)/4$
- 5) 左右電圧差 : $(E+F)/2 - (G+H)/2$
- 6) 往復電圧差 : $(E+G)/2 - (F+H)/2$

外乱を故意に与えない状況下で溶接した場合の上記 6 つの物理量とずれ量との関係を Fig.6 から Fig.11 に示す。

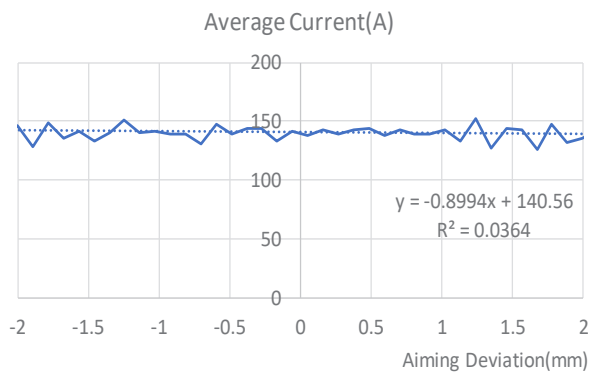


Fig.6 Average Current toward Aiming Deviation

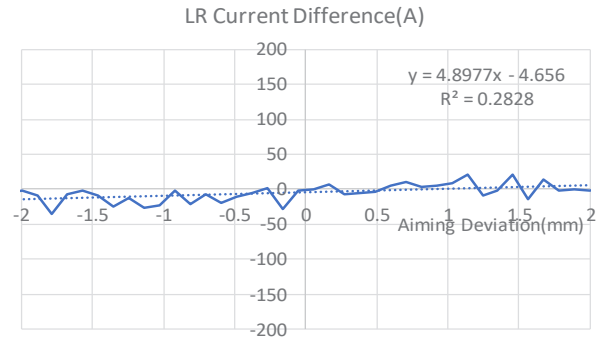


Fig.7 LR Current Difference toward Aiming Deviation

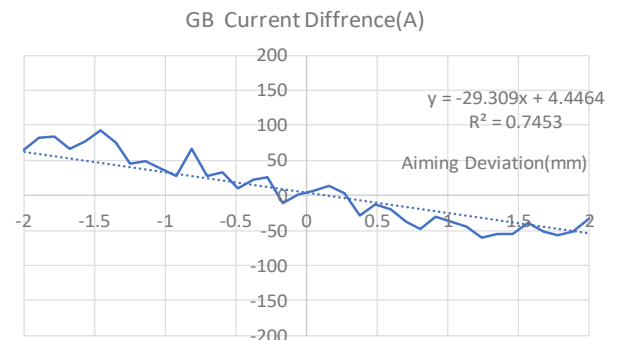


Fig.8 GB Current Difference toward Aiming Deviation

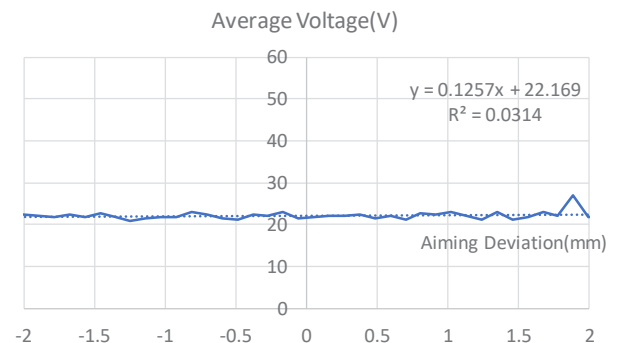


Fig.9 Average Voltage toward Aiming Deviation

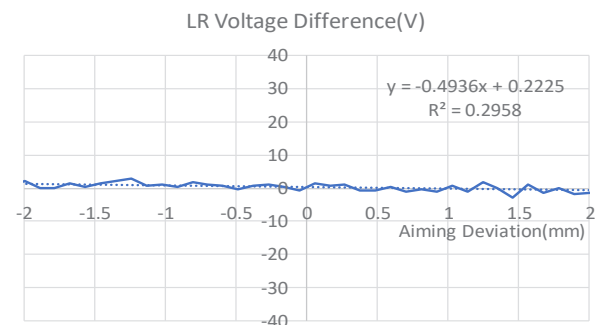


Fig.10 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

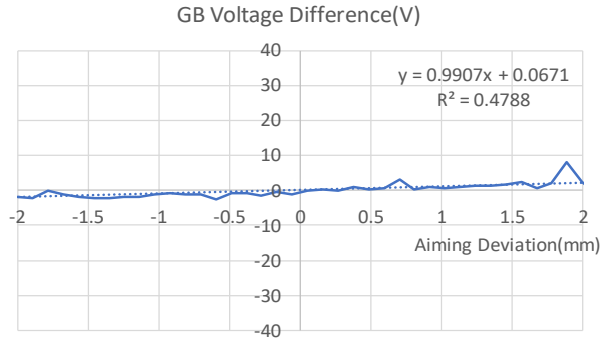


Fig.11 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

Fig.1 でアークセンサの基本原理を説明した通り、ウィービングの左右において溶接電流或いは溶接電圧の波形が非対称になった場合に狙いずれが発生したと判断するのが一般的である。本研究においても TIG 溶接や MAG スプレーアーク溶接では左右電流差や左右電圧差が最も狙いずれ量との相関がある物理量であることが分かっている⁽¹³⁾。しかし上の Fig.7 および Fig.10 においては左右電流差や左右電圧差といった物理量と狙いずれ量との相関が低い結果となった。それに対して Fig.8 に示す往復電流差と狙いずれ量の相関が最も高くなっている。Fig.11 の往復電圧差との相関もある程度高い。つまり CO2 溶接での短絡移行アークではこれまでのスプレー移行アークとは物理現象が異なるだけでなく、アークセンサの検出にも違いが生じることが分かった。

この点について以下に考察する。Fig.12 にスプレー移行において斜面をウィービングしたときの模式図を示す。消耗電極溶接ではアークの自己制御作用を生み出すために溶接電源は大局的に定電圧特性で制御を行っている。つまり、溶接電圧を一定に制御することで、ウィービング中であつてもアーク長が一定に保たれる。従って、トーチ母材間距離に応じてワイヤの突き出し長さが変化するため、短い時は抵抗値が小さくなり溶接電流が増加、反対に長い時は抵抗値が大きくなり溶接電流が減少する。従って、開先内でのウィービングを考えた場合、ずれた方向の電流が増加するため、左右電流差がずれ量検出に有効になる。

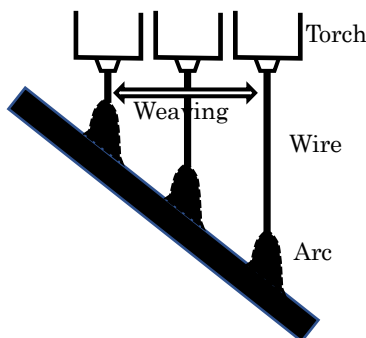


Fig.12 Spray Transfer Case

一方、短絡移行溶接においてはウィービングによりトーチ母材間距離が長くなっていく場合にはワイヤの溶融量が少なくなるために溶滴が大きくなりやすく、短絡移行が起こりにくい。逆にウィービングによりトーチ母材間距離が短くなっていく場合にはワイヤの溶融量が多くなるために溶滴がすぐに大きくなり、多くの回数の短絡移行が発生すると思われる。Fig.4 で説明したように、短絡が生じると溶接電流が急上昇し、溶接電圧が急降下するため、トーチ母材間そのものではなくトーチ母材間距離が長くなっていく状態か短くなっていく状態で溶接電流や溶接電圧の値が変化するために往復電流差あるいは往復電圧差が狙いずれ量検出に有効になると考えられる。

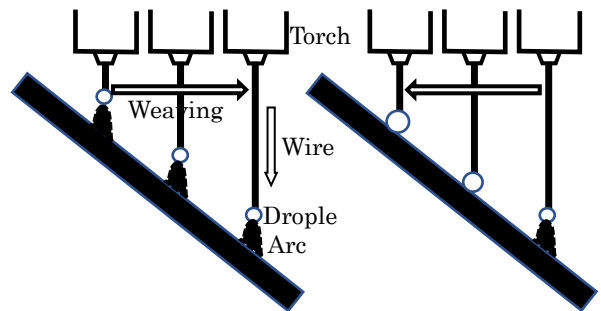


Fig.13 Short Circuit Transfer Case

5. 各種外乱の影響

5. 1 ガス流量が減少した場合

ガス流量が減少した場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.14 に示す。溶接電流が 400A を超える状況がしばらく続く現象がみられる。同時に溶接電圧は低い値が続いている。これは長期短絡が発生していることを示している。溶滴周辺の CO2 ガス濃度が低下したため溶滴を絞り込むピンチ力が不足し、溶滴がワーク側になかなか移行できなかったことが原因と考えられる。

その結果、Fig.17 に示す往復電流差のように電流差と狙いずれ量との間の相関に乱れが生じている。しかし Fig.8 と Fig.17 の比較から狙いずれ量に対する往復電流差の相関の傾きが-29 から-48 まで絶対値が大きくなっており、アークセンサの検出感度は逆に高まっていることがわかる。更に Fig.15 に示す平均電流の波形を見ると、この乱れは時間的にランダムに生じていることがわかり、時間的な平均値処理を行うことで、ガス流量が減少した場合に生じるアークセンサの不安定さを解消できると思われる。

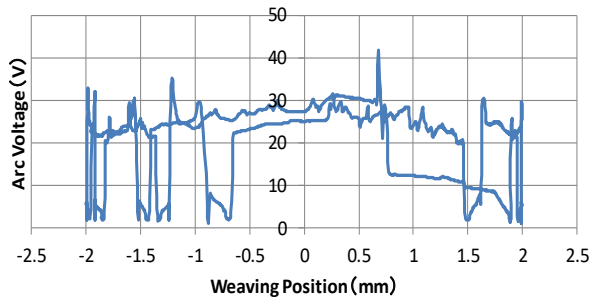
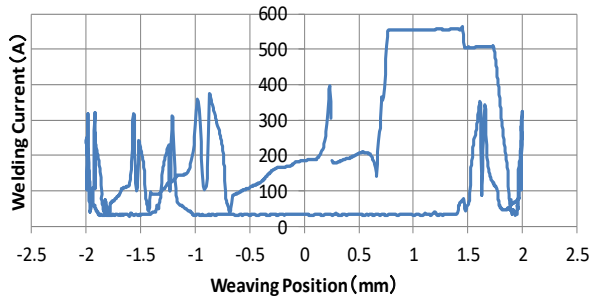


Fig.14 Under Low Gas Flow

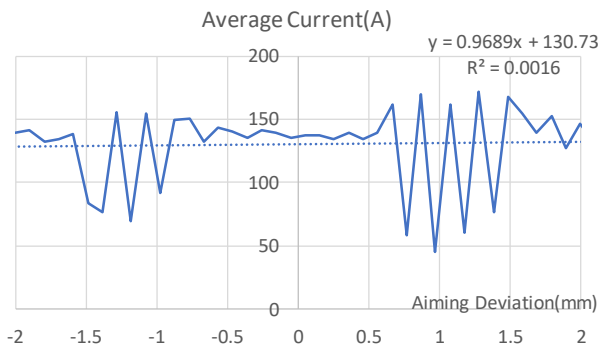


Fig.15 Average Current toward Aiming Deviation

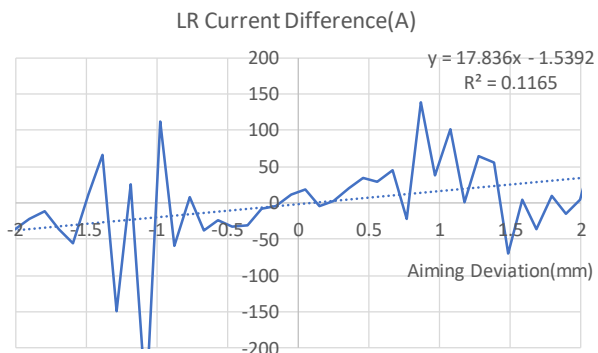


Fig.16 LR Current Difference toward Aiming Deviation

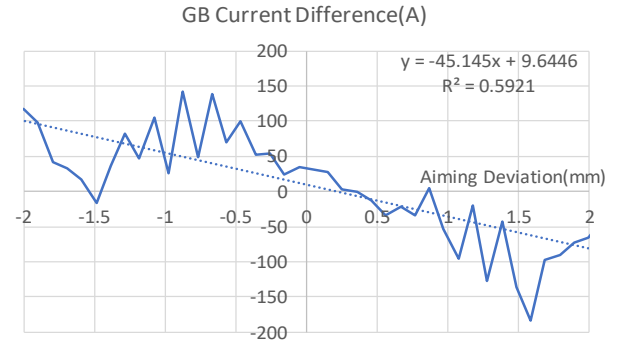


Fig.17 GB Current Difference toward Aiming Deviation

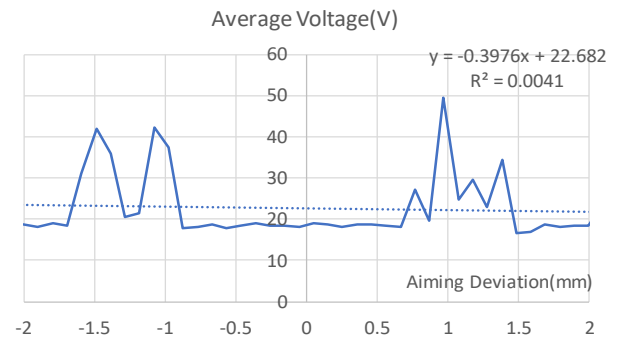


Fig.18 Average Voltage toward Aiming Deviation

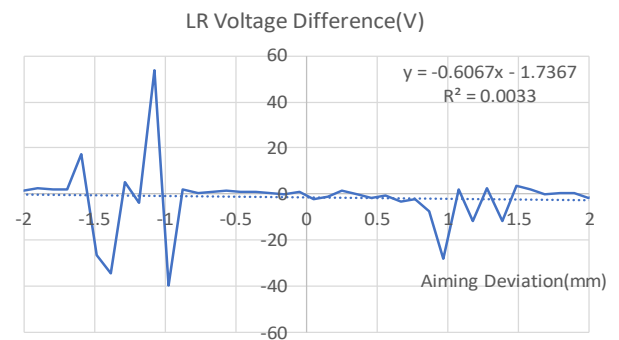


Fig.19 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

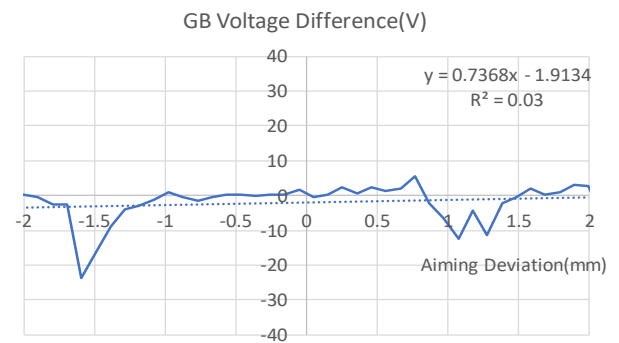


Fig.20 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

5. 2 磁気吹きが生じた場合

磁気吹きが生じた場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.21 に示す。溶接電流がほぼ流れず、電圧が 70V 程度になっている状況がしばらく続く現象がみられる。これはアークが一旦切れてしまったことを示している。磁場の影響でアークが電極からワークに向かって生じる現象が阻害されたことが原因と考えられる。

その結果、Fig.24 に示す往復電流差のように電流差と狙いずれ量との間の相関に乱れが生じている。ここで乱れは狙いずれがプラス側に行くほど生じているが、これは磁気吹きを故意に発生させるためのネオジウム磁石をワークの狙いずれプラス側に設置したためである。Fig.8 と Fig.24 の比較から、狙いずれ量に対する往復電流差の相関が低下している反面、傾きが-29 から-34 まで絶対値として大きくなっており、アークセンサの検出感度は逆に高まっていることがわかる。

狙いずれ量に対する往復電流差の相関の低下を回避するためには、平均電流が一定値よりも下がった場合、或いは平均電圧が一定値よりも上がった場合をアークが一旦切れてしまっている状況とみなし、その際の往復電圧差を狙いずれ検出に使用しない方法が考えられる。

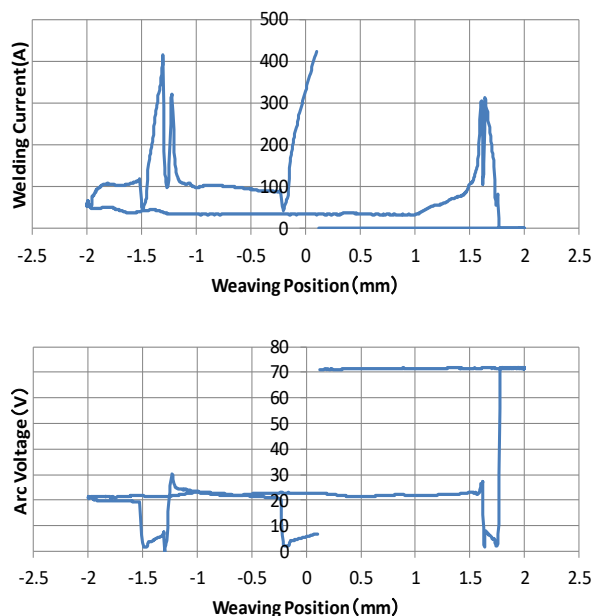


Fig.21 Under Magnetic Blow

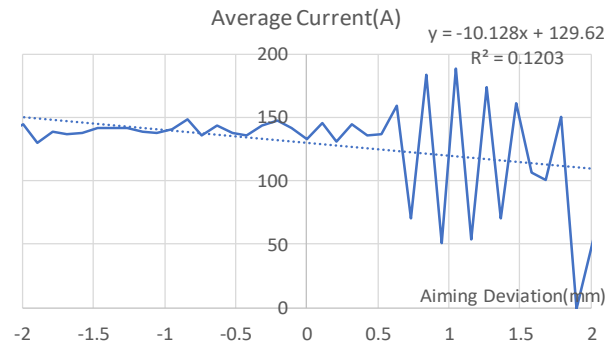


Fig.22 Average Current toward Aiming Deviation

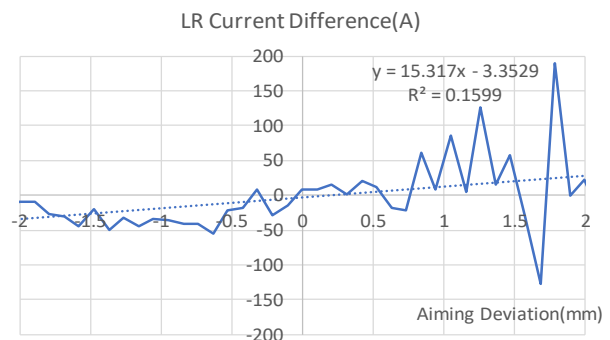


Fig.23 LR Current Difference toward Aiming Deviation

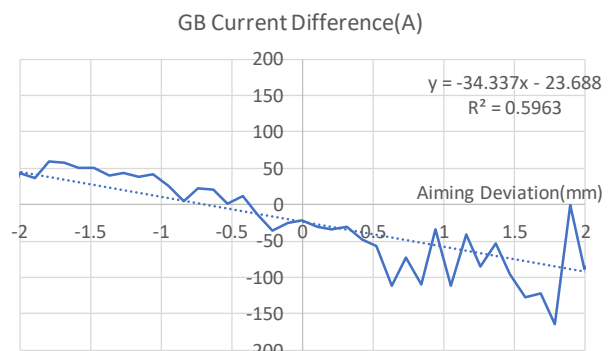


Fig.24 GB Current Difference toward Aiming Deviation

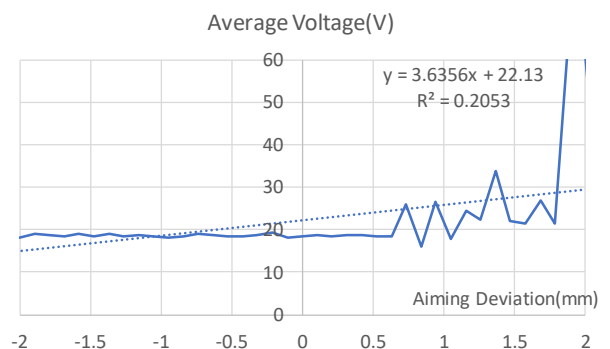


Fig.25 Average Voltage toward Aiming Deviation

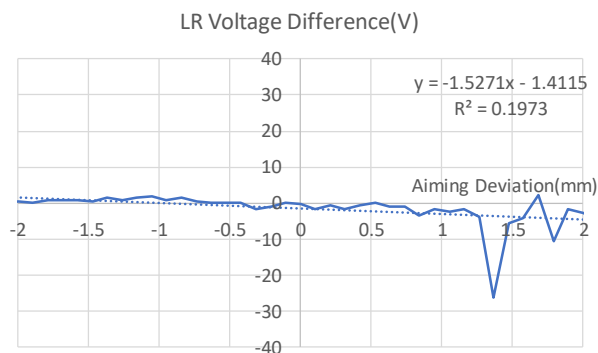


Fig.26 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

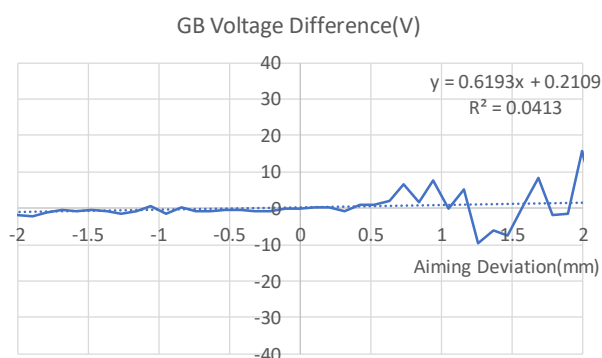


Fig.27 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

5. 3 ワイヤ送給が不安定になった場合

ワイヤ送給が不安定になった場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.28 に示す。溶接電流がほぼ流れず、電圧が 70V 程度になっている状況がしばらく続く現象がみられる。これはアークが一旦切れてしまったことを示している。ワイヤの送給が一瞬止まったことによりアーク長が急激に伸び、その結果アークが切れてしまったものと考えられる。

しかし、Fig.31 に示す往復電流差では電流差と狙いずれ量との間の相関に大きな乱れは見られず、狙いずれが -1.5mm の辺りで近似直線からの多少のずれが見られるのみである。Fig.29 の平均電流や Fig.32 の平均電圧では狙いずれが -1.5mm の辺りで大きく値が変化しているのが見られ、往復電流差もその影響を大きく受けると思われるが、何故影響が少なかったのかは今後の調査が必要である。ただ言えるのは、Fig.28 から分かるように、アークが切れる現象が往復で均等に生じたため、たまたま往復電流差に影響が出なかった可能性が高い。

磁気吹きの場合と同様に、ワイヤ送給不安定による誤検出を回避するには、平均電流が一定値よりも下がった場合、或いは平均電圧が一定値よりも上がった場合をアークが一旦切れてしまっている状況とみなし、その際の往復電圧

差を狙いずれ検出に使用しない方法が考えられる。

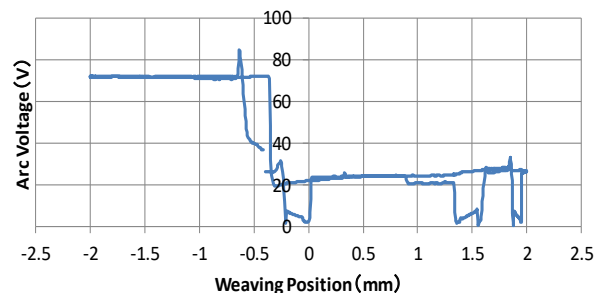
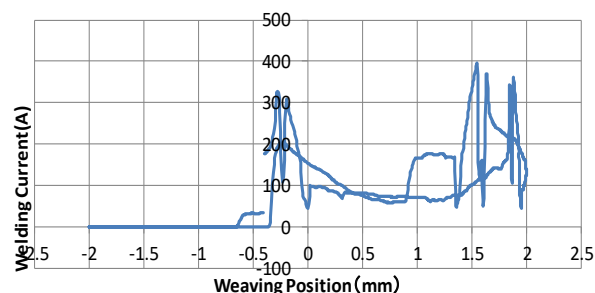


Fig.28 Under Wire Feeding Unstable

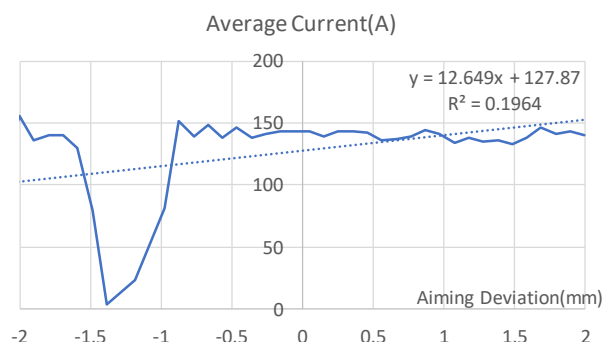


Fig.29 Average Current toward Aiming Deviation

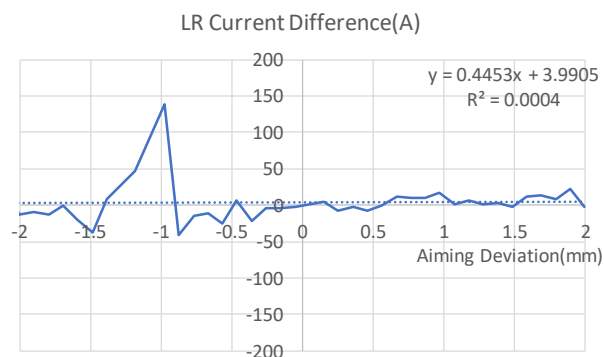


Fig.30 LR Current Difference toward Aiming Deviation

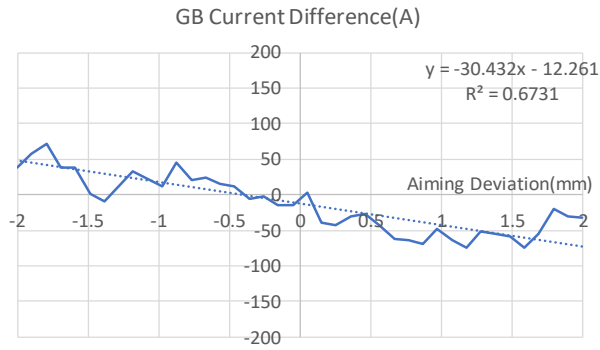


Fig.31 GB Current Difference toward Aiming Deviation

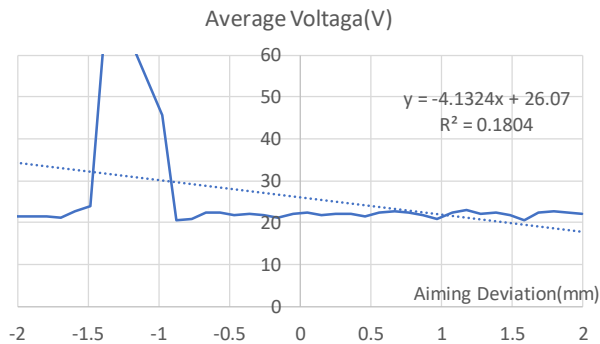


Fig.32 Average Voltage toward Aiming Deviation

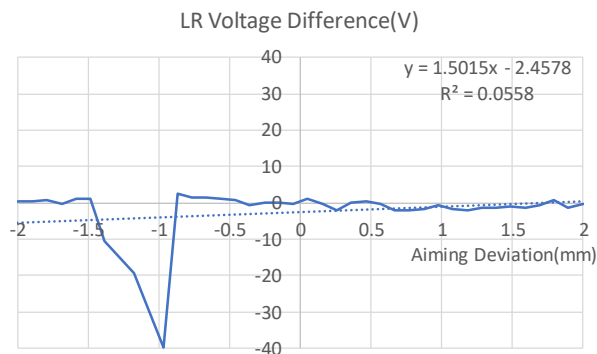


Fig.33 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

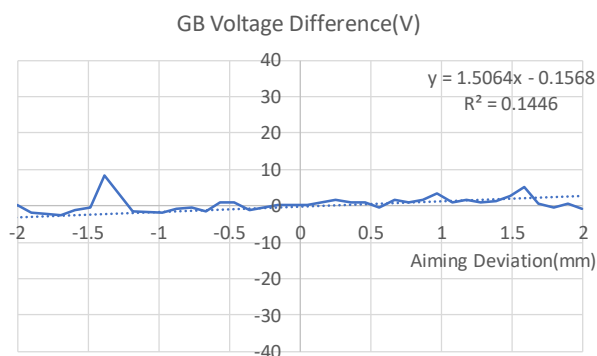


Fig.34 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

5. 4 電流供給が不安定になった場合

電流供給が不安定になった場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.35 に示す。しばらく短絡が生じていない期間が見られる。電流供給量が一時的に減少したことで、ワイヤの溶融が進まなかったために溶滴が大きくなり、短絡移行に至らなかったものと思われる。

この現象が起きた狙いずれ量 1.0～1.5mm の区間において、Fig.38 に示す往復電流差に変動が見られ、アークセンサによる狙いずれ検出が正常に行われないことが予想される。しかし、同じ区間において Fig.37 に示す左右電流差や Fig.40 に示す左右電圧差に大きな変動が見られる。これらの値に適当な閾値を設けてそれを超える状況が発生した場合に異常とみなし、その際の往復電圧差を狙いずれ検出に使用しない方法により誤検出が回避できると考えられる。

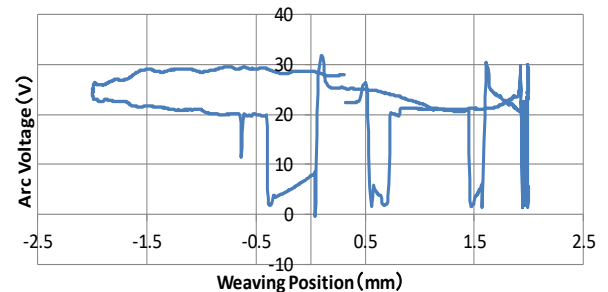
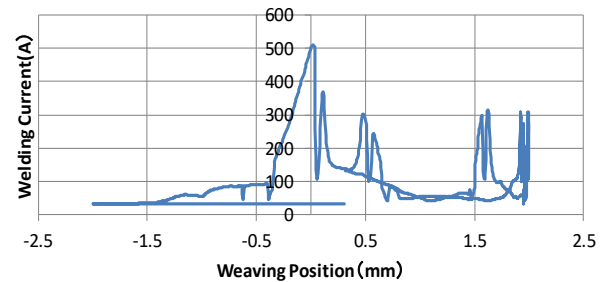


Fig.35 Under Current Supply Unstable

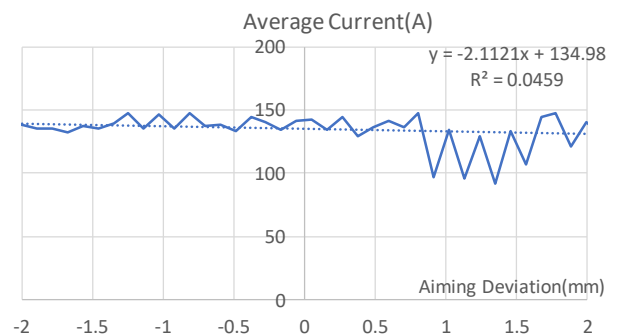


Fig.36 Average Current toward Aiming Deviation

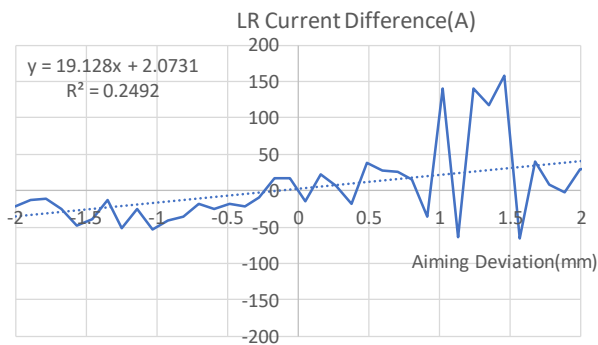


Fig.37 LR Current Difference toward Aiming Deviation

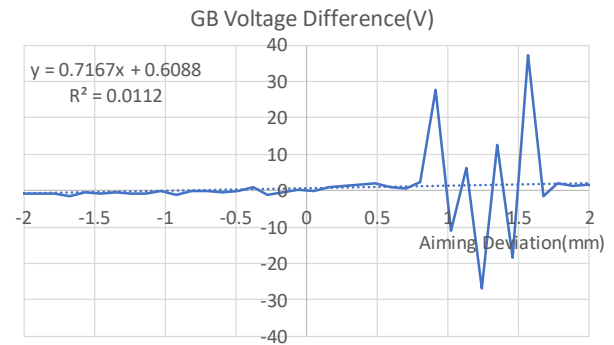


Fig.41 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

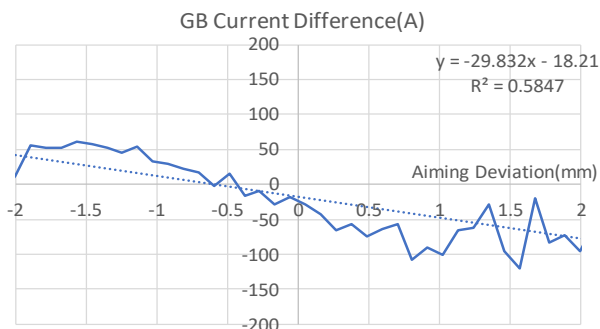


Fig.38 GB Current Difference toward Aiming Deviation

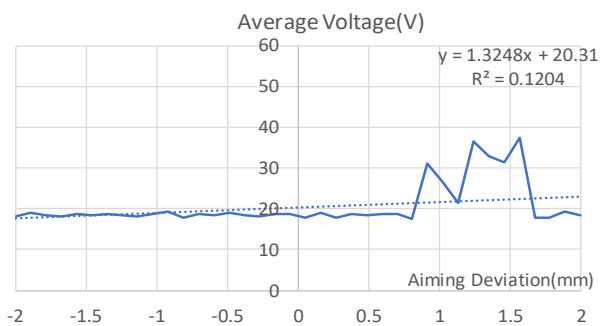


Fig.39 Average Voltage toward Aiming Deviation

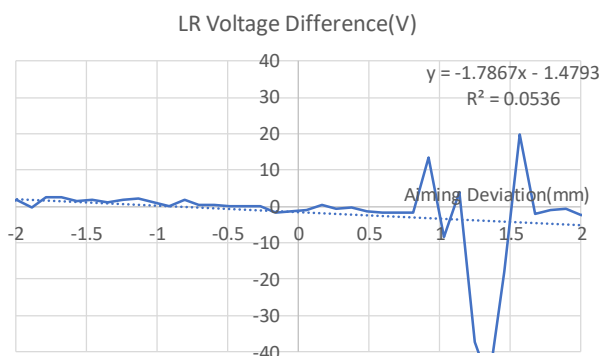


Fig.40 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

5. 5 ワークに油が付着した場合

ワークに油が付着した場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.42 に示す。短絡がずっと続いている期間が見られる。油の気化によりアーク近傍での CO2 ガス濃度が減少し、ガス流量が減少したときと同じような現象が生じているものと思われる。

しかし Fig.45 に示す往復電流差では電流差と狙いずれ量との間の相関に乱れが生じていない。それだけではなく Fig.43 から Fig.48 までのすべての波形において目立った乱れは見られない。実験に使用した程度の油分ではアークセンサの誤検出に至るような現象は生じないと言える。これについては、今後さらに多量の油分を付着させて評価してみる必要があると考える。

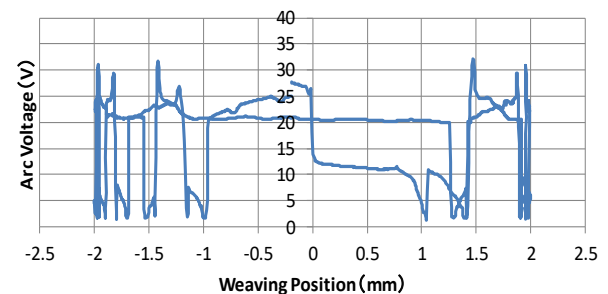
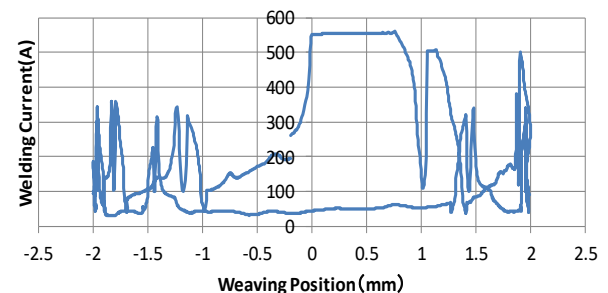


Fig.42 Under Oli Applied Case

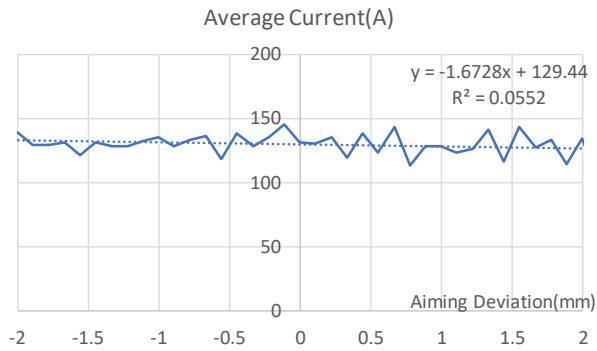


Fig.43 Average Current toward Aiming Deviation

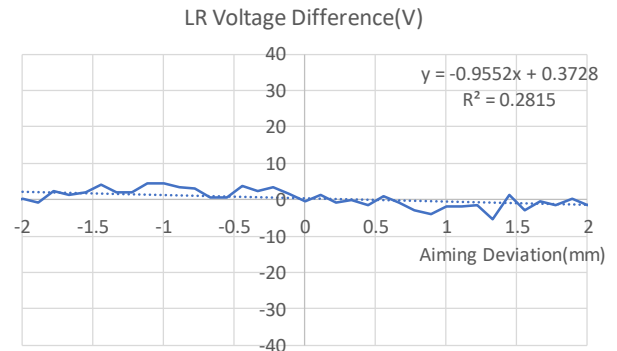


Fig.47 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

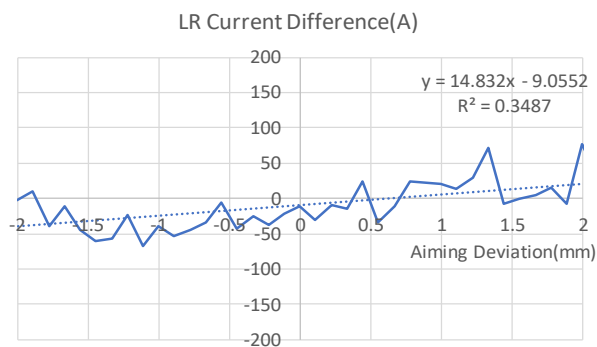


Fig.44 LR Current Difference toward Aiming Deviation

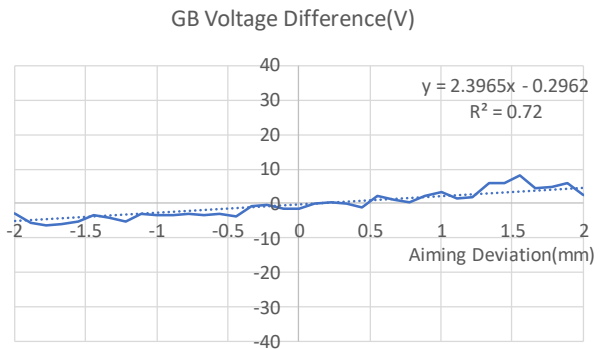


Fig.48 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

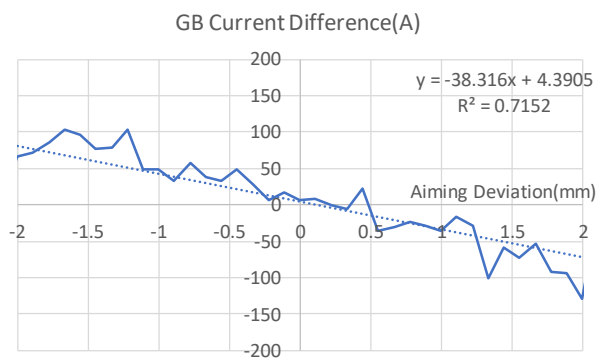


Fig.45 GB Current Difference toward Aiming Deviation

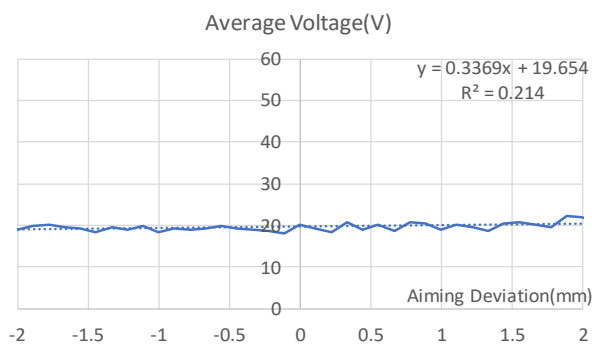


Fig.46 Average Voltage toward Aiming Deviation

5. 6 ワークが錆びている場合

ワークが錆びている場合の溶接電流及び溶接電圧の波形を Fig.49 に示す。溶接電流がほぼ流れず、電圧が 70V 程度になっている状況がしばらく続く現象がみられる。これはアークが一旦切れてしまったことを示している。ワークの錆によりワークの導電性が阻害され、その結果アークが切れてしまったものと考えられる。

Fig.52 に示す往復電流差では全体にわたって変動が生じている。ただ、電流差と狙いずれとの相関はさほど低下していない。また Fig.50 から Fig.55 に至るすべての波形で全体にわたる変動が見られる。

これよりワークの錆はアークセンサによるずれ量検出に誤差をもたらすものの、往復電流差を平均化する、或いはローパスフィルタ処理することで、大局的に錆びの影響を回避して問題なく狙いずれ検出ができるものと思われる。

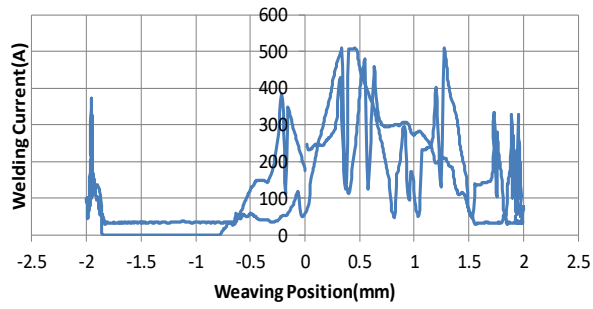


Fig.49 Under Rusted Case

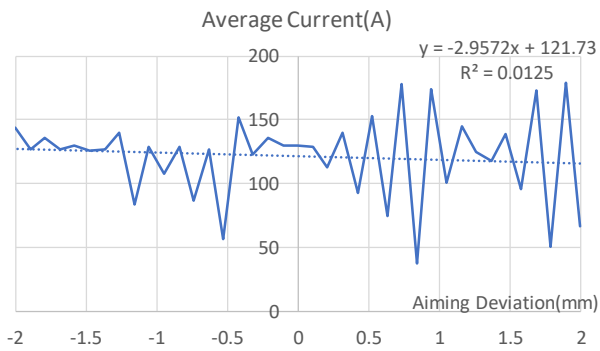
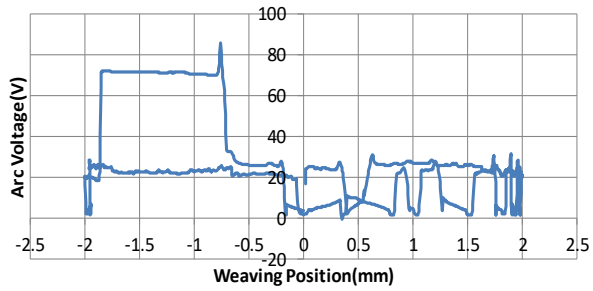


Fig.50 Average Current toward Aiming Deviation

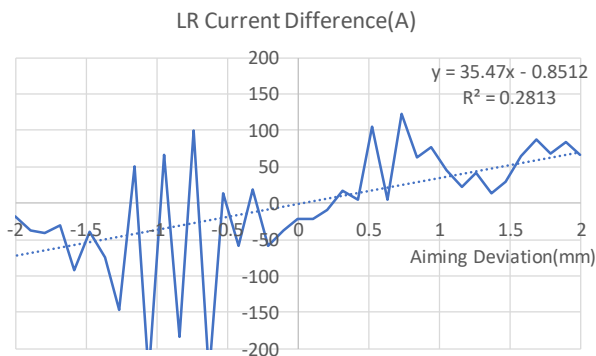


Fig.51 LR Current Difference toward Aiming Deviation

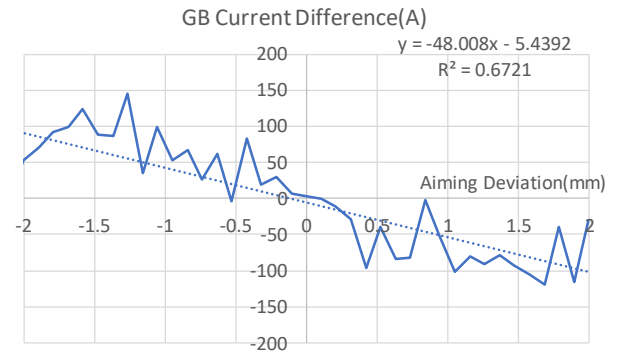


Fig.52 GB Current Difference toward Aiming Deviation

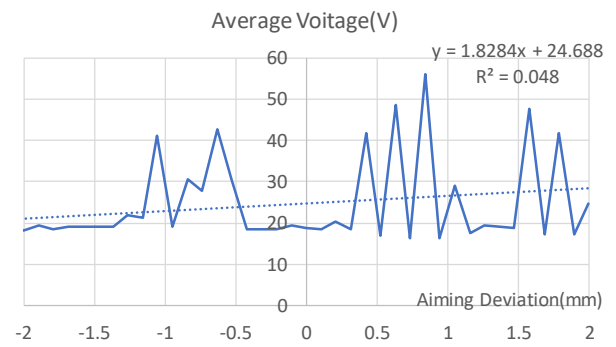


Fig.53 Average Voltage toward Aiming Deviation

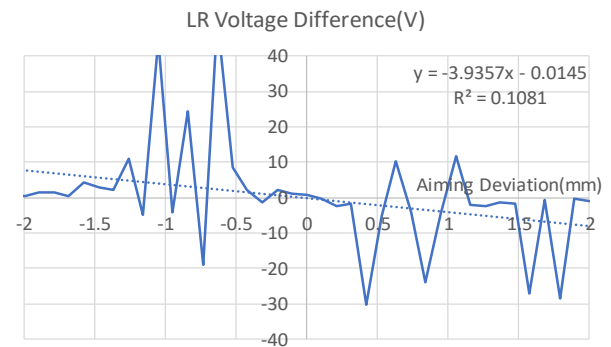


Fig.54 LR Voltage Difference toward Aiming Deviation

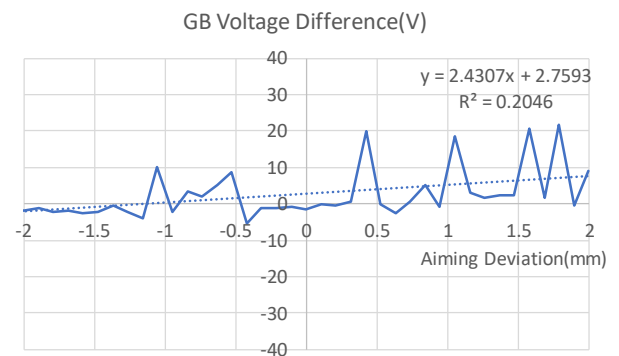


Fig.55 GB Voltage Difference toward Aiming Deviation

6. 結言

従来のアークセンサのずれ量検出アルゴリズムでは、左右電流差を用いる場合がほとんどであったが、CO₂ ガスを用いたアーク溶接においては往復電流差を用いることで最も検出感度の高いアークセンサが実現できることが分かった。

外乱の要因として、ガス流量の減少、磁気吹き、ワイヤ送給の不安定、電流供給の不安定、ワークへの油付着、ワークの錆の6種類についてアークセンサによる狙いずれ検出への影響を調査し、誤検出を起こす可能性のある現象について解析した。

また、その解析結果に従って、誤検出を回避する方法について提案した。

実際にアークセンサを稼働させる際には、どの外乱がいつ入るのかは分からないため、本報で提案した誤検出回避方法を統一したアルゴリズムに集積し、どの程度アークセンサの信頼性を確保できるのかを評価する必要がある。

謝辞

本研究において、実験を行うために必要な溶接電源やロボットを貸与してくださっている株式会社ダイヘン溶接機事業部様に心より感謝申し上げます。また、実験場所の環境を整備頂き、各種消耗品の発注、溶接ワークの発注等でお世話になっております近畿大学工業高専技術員の天野様、右松様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 児玉ほか、短絡アーク溶接プロセスのモデリングとアークセンサ制御技術への応用、新日鉄技報第385号、2006年、P.64-68
- (2) 牛尾ほか、直流オープンアークMIG/MAG溶接におけるアークセンサの数学モデル化、溶接学会論文集第14巻第1号、1996年、P.99-107
- (3) 児玉ほか、高速揺動マグ溶接における短絡移行形態、溶接学会論文集第23号第2号、2005年、P.252-258
- (4) 牛尾、毛、杉谷：GMAW溶接におけるアークセンサの動特性の解析、溶接学会第111回アーク物理委員会、1993年
- (5) 久貝、秋谷、新村：アークセンサの検出絶対値化に関するシミュレーションモデルによるアプローチ、溶接学会第135回アーク物理研究委員会 1999年
- (6) 山本、村上、久貝：アーク溶接現象の動的解析とシームトラッキングへの応用、溶接学会全国大会講演概要第44集、P33~35、1989年
- (7) 久貝、川邑：アークセンサの信頼性に関する再考、溶接学会全国大会講演概要 第93集、P138~139、2013年
- (8) 久貝、北畠：アーク溶接による作業線のセンシング、機械学会年次大会講演概要集、G15035、2013年 9.3.
- (9) 久貝、北畠：アークセンサの信頼性に関する再考、溶接学会全国大会講演概要 第95集、P176~177、2014年
- (10) 久貝、北畠：アークセンサの信頼性に関する再考、近畿大学工業高等専門学校研究紀要第8号、2015.3.
- (11) 久貝、中村：アークセンサの信頼性に関する再考ーアークおよび溶融地の影響についてー、溶接学会論文集第33巻第4号 p.309-316、2015.11.
- (12) K.Kugai, S.Nakamura : Reconsideration over the Reliability of Arc Sensor、International Journal of Mechanical Engineering and Automation ISSN: 2333-9179、2017.3.
- (13) 久貝、山川、中村：アークセンサの信頼性に関する再考ー不安定要因の影響と誤検出の回避方法ー、溶接学会論文集第36巻第1号,p1-8、2018.3.