

X-in-1 TIG溶接装置開発による 高品質・高生産性への取り組み

一言 大輔* 奥井 恒樹* 何 文強*

抄 録

本報告は、新型電動化ユニット「X-in-1」のバスバーとステータ端子の接合に適したTIG溶接装置の開発について述べる。従来のレーザ溶接と比較し、品質とコストパフォーマンスに優れたTIG溶接を採用した。バスバー、ステータ両端子の配置と位置のばらつき、24箇所の溶接による品質と生産性の課題に対し、一括クランプ治具および3Dカメラによる位置補正を導入し、溶接品質と生産性を両立させ、量産に成功した取り組みを紹介する。

1. はじめに

X-in-1は、モータ、ジェネレータ、インバータおよび増速減速ギヤを、コンパクトに一体化した新型電動化ユニットである。モータおよびジェネレータのステータコイルは、従来の丸銅線ではなく、平角銅線（以下「平角線」という。）を採用している。インバータによって制御された電流は、バスバーを介して、モータおよびジェネレータのステータコイルに供給される。この時、バスバーとコイルの接点は、それぞれの銅端子を溶接接合する仕様である。

X-in-1に採用したバスバーは、コンパクトなレイアウトの中で絶縁性を保証し、かつ、走行振動への耐久性を確保するため、樹脂モールドによる剛体化仕様になっている。さらに、このバスバーは、ステータの出力端子近傍でハウジングにボルトで固定するため、溶接端子の位置は、強固に固定される仕様になる。

一方、相手側の溶接部品となるステータ端子は、銅線材を3D曲げ加工するため、先端溶接部の位置度を高い精度で維持することは困難である。

剛体に固定されたバスバー端子と弾性変形が起りやすいステータ端子を整列させ、約3mm四方の小さな範囲を正確に溶接するために、新たな溶接装置の開発を行った。

本報告では、この課題に対応し、溶接品質と生産性の高い目標値を両立するTIG（Tungsten Inert Gas）溶接装置を開発したので紹介する。

2. 溶接工法の選定

X-in-1のバスバーとステータの溶接接合前の全体図をFig. 1のa)に示す。b)は、溶接点の端子部の拡大図である。

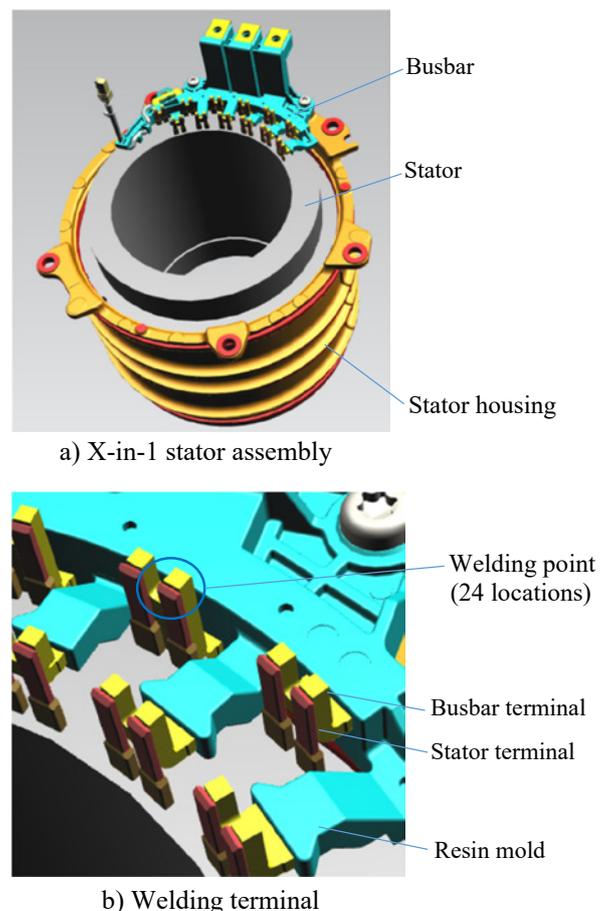


Fig. 1 CAD drawing of X-in-1 stator

モータ平角線の溶接工法は、従来のレーザー溶接とTIG溶接の2方式があり、欧米ではレーザー溶接が一般的に採用され、日本ではTIG溶接が主流である。品質とコスト面ではTIG溶接が有利だが、溶接速度はレーザー溶接において優位性がある。(Table 1)

Table 1 Comparison of welding methods

	Laser welding	TIG welding
Quality (Q)	× Spatter is generated	○ No spatter
Cost (C)	× Welding machines are expensive	○ Welding machines are inexpensive
Time (T)	○ High welding speed	× Slow welding speed

レーザー溶接は、高エネルギーのレーザー光を使って、母材金属を溶融させ、溶接を行うが、急激な温度変化により、溶融金属の激しい対流や気化爆発が起きやすいため、スパッタ発生リスクがある。TIG溶接の場合、Fig. 2に示す通り、タングステン電極の先端から、傘状のアーキにより、溶接点全体を加熱するため、溶融部の液化は緩やかに起り、スパッタ発生を抑えることができる。

今回の開発を行うバスバー溶接工法は、品質を重視し、スパッタ発生懸念がないTIG溶接を採用した。

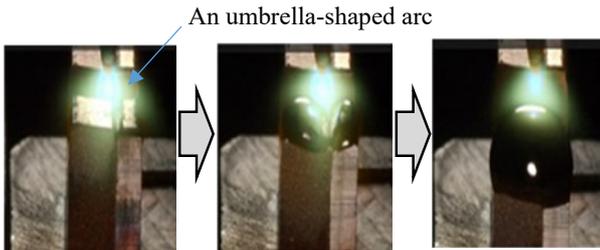


Fig. 2 Progression of TIG welding

3. X-in-1 TIG溶接設備仕様課題

X-in-1 TIG溶接装置の開発に向けて解決すべき課題を3点説明する。

3.1 TIG溶接速度の課題

従来のTIG溶接工法で平角線を接合する際、1点毎に機器の動作が入るため、レーザーと比べて数倍の時間が必要となる。この溶接機内の動きを、Fig. 3で説明する。

- ① Clamp：トーチと一体となった端子クランプが、溶接する端子を把持し、端子の密着と位置決めを行う。
- ② Touch：高さのばらつきを持つ溶接端子に対し電極の高さ方向の距離を保証する。溶接トーチは、一旦溶接部に接触し、アークが発生する高さまで上昇する動作を行う。
- ③ Weld：適切な高さに達した電極（溶接トーチ）が、溶接を行う。
- ④ Move：溶接後、トーチとクランプは、次の溶接点に移動する。その際、端子の把持を解放し、溶接部を避けた移動となる。

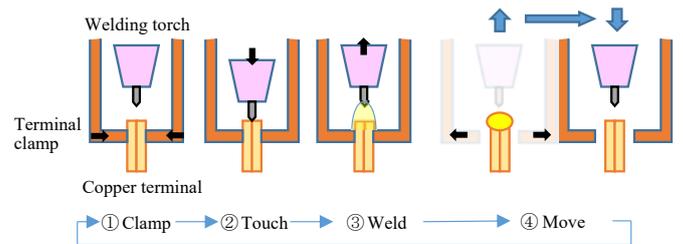


Fig. 3 Conventional TIG welding process

3.2 X-in-1部品特有の形状課題

先述の通り、X-in-1ではバスバーを通電機能とコンパクトなレイアウトを両立させる部品として、設計した。その結果、以下の項目が量産課題として顕在化した。

- ① 溶接点が24箇所あり、他社部品の4倍程度になった。生産時間が伸び、溶接不良が発生するリスクも上がる。
- ② バスバーは、樹脂モールドで固められ、ハウジングにボルトで固定されているため、剛体となる。
- ③ ステータコイル端子は、銅線材を3D曲げ加工するため、端子先端の位置精度にばらつきが大きく、固定されたバスバー端子とは、位置ずれが発生しやすい。
- ④ X-in-1モータとジェネレータで、合計5機種のスレータの仕様に違いがあり、段取りロスが発生する。

3.3 溶接品質課題

TIG溶接後の要求品質は、主に以下の2つの条件がある。

- ① 溶接部の引張破断荷重の確保
- ② 平角線絶縁エナメル部に火ぶくれ（Blistering）が発生しないこと（Fig. 4）

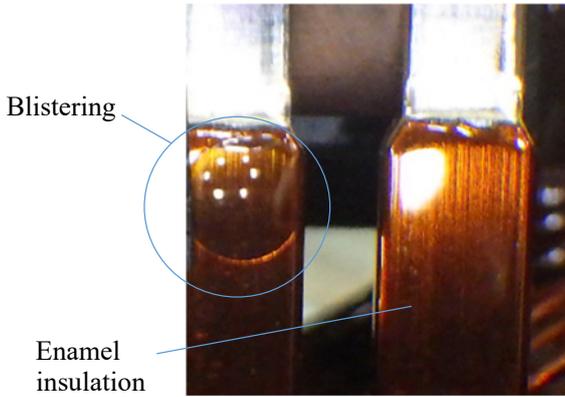


Fig. 4 Blistering

破断荷重の確保は、溶接時に多くのエネルギーを加え、強固な溶接が求められる。一方、火ぶくれを抑制するためには、入熱エネルギーを抑制し、エナメル部に入る熱影響を抑えることが求められる。相反する2つの条件を満足させるバランスの取れた溶接条件が必須となる。

4. 溶接装置仕様の決定

4.1 生産性対策仕様

3.1で述べた通り、接点毎に端子クランプ動作を繰り返したのでは、レーザ溶接に匹敵する生産スピードは達成できない。一方、端子クランプは以下の3つの目的を持っており、平角線溶接では必要な機構である。

<端子クランプの目的>

- 1) 整列：バスバー端子とステータ端子の位置を合わせ、密着させる。
- 2) 通電：溶接する端子と接触し、溶接電流の回路を形成する。
- 3) 抜熱：溶接熱がエナメル部へ達する手前で吸収し、火ぶくれを抑制する。

確実な端子クランプを行い、かつ、把持のメカ動作時間を最小にするために、すべての溶接点（24箇所）を同時に一括で把持する治具（以下「クランプ治具」という。）

を開発・採用することとした。加えて、この治具をTIG溶接機から外出しし、溶接機外で脱着させることで、端子クランプに掛かる時間を大幅に短縮することができる。

Fig. 5に、今回開発したクランプ治具の図を示す。円盤型のベースプレートに端子をクランプする爪を放射状に配置し、スプリングをクランプ力として、各爪を個別摺動させる機構とした。（本技術は日本国特許庁へ特許出願済み）⁽¹⁾

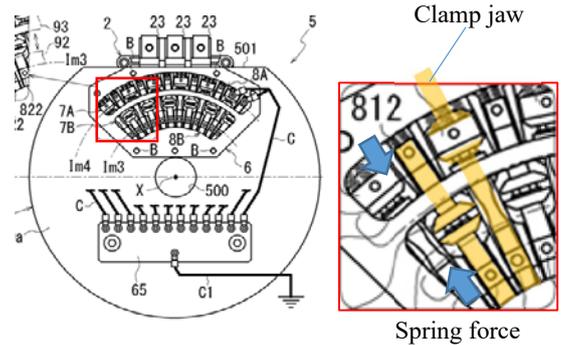


Fig. 5 All terminal simultaneous clamping jig

さらに、機種毎の形状に合わせて、クランプ治具を設定し、溶接機の上流にストックすることで、ワーク5機種のランダムな連続生産を可能とした。

さらに、溶接時の時間短縮のため、Fig. 3で示した②Touchの動作も廃止した。②Touchは、溶接端子と溶接電極の高さと距離を一定に保つ機構である。この距離の保証方法として、溶接機内に3Dカメラを配置した。溶接前の端子位置を撮影、端子高さを算出し、溶接時の電極高さにフィードバックしている。

以上の対策仕様を採用した結果、溶接時のトーチの動きは、Fig. 6となり、時間ロスを解消した。

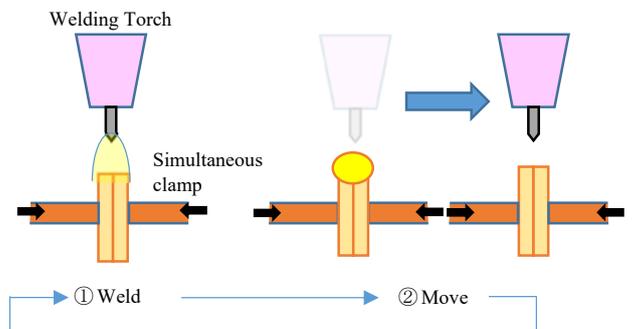


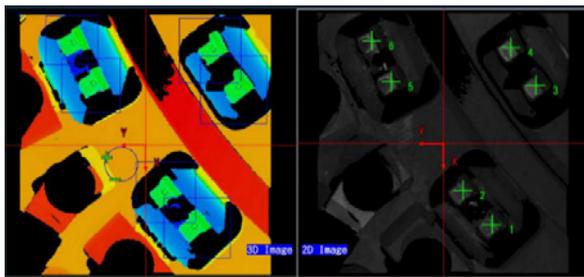
Fig. 6 Newly proposed terminal clamp

4.2 品質対策仕様

本件のバスバー溶接は、24箇所端子がすべて溶接されて、1つの製品が完成する。3.3で述べた通り、溶接強度と火ぶくれ抑制のバランスを取るためには、溶接位置の正確性が重要である。一方、本件部品の端子位置は、剛体部品であるバスバーの位置で決まるため、部品毎や溶接点毎に溶接位置の座標を微調整する必要がある。

部品毎に最適な溶接位置を保証する対策として、4.1で触れた3Dカメラを活用した。端子位置の高さだけでなく、X-Y平面情報も算出し、溶接位置にフィードバックするシステムとした。

カメラは、Fig. 7のような画像を撮影する。a)の3Dデータ画像から、平面画像で端子の形状と位置を捉え、最適な溶接点を算出し、b)のように、指定する。a)の色は、対象物の高さを表しており、適切な溶接高さも保証するシステムとして完成させた。



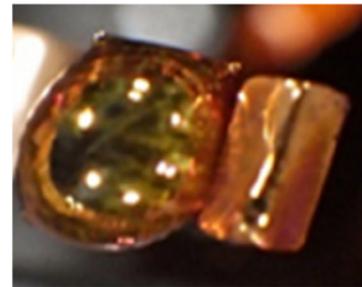
a) 3D image b) Welding position setting

Fig. 7 3D camera data

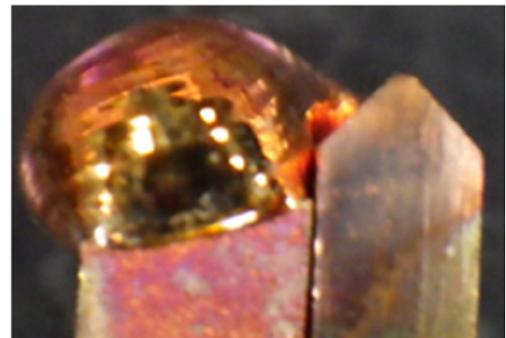
5.1 量産前課題と対策

本件設備にて、トライアル生産を行った際、Fig. 8に示すように端子は、溶けているが、溶融玉が偏り、接合しない現象が発生した。

「二玉」と呼んでいるこの現象を、高速度カメラを使って溶接中の溶融銅の挙動を観察・分析した結果、溶接電流による磁場のバランスが崩れた時、電磁力の差により溶融銅が特定方向に引き寄せられることが原因と判明した。これを踏まえ、クランプ内を流れる電流を均等に調整する対策を行い、二玉現象を防止することができた。



a) Upper view



b) Side view

Fig. 8 Welding defect

5.2 量産対応

生産性課題、品質課題をクリアした設備を立ち上げ、2025年度より量産を開始した。(Fig. 9) 溶接速度も目標達成しており、生産性においても、レーザ溶接と遜色ない結果が出ている。(Table 2)

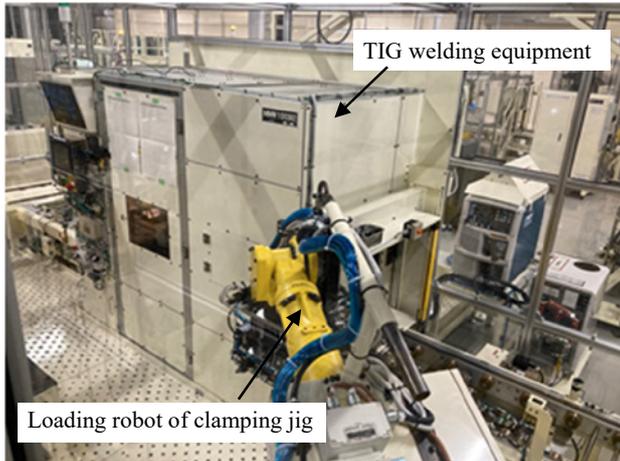


Fig. 9 TIG welding equipment

Table 2 Comparison with JATCO welding method

	Laser welding	TIG welding
Quality (Q)	× Spatter is generated	○ No spatter
Cost (C)	× Welding machines are expensive	○ Welding machines are inexpensive (approx. 1/5)
Time (T)	○ High welding speed	○ Production cycle time is the same as for laser welding

6. まとめ

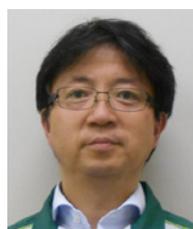
現在は、このTIG溶接設備で量産を行っている。いくつかの課題は発生したが、すべて解決してきている。課題解決にあたり、電気回路の基本法則、溶接点周りの熱伝達解析、クランプ治具の構造と劣化分析など、原理・原則に則って、現象を解析することが、重要であることを体感した。

今後、電動化ユニットに、さらに溶接・接合工法が拡大してくると予測している。今回の経験を活かし、今後の電動化ユニットへ貢献していく。

7. 参考文献

- (1) 田村 清人, 一言 大輔, 石川 達也, 梶田 将史: クランプ治具, 特願2024-038513, 2024年

■ 著者 ■



一言 大輔



奥井 恒樹



何 文強