

自動溶接機による二輪車の試作車体製作における 溶接条件設定とひずみの予測手法

Method for Welding Condition Settings with Forecasted Distortion Applied for Two-wheeled Vehicle
Body Preproduction by Automatic Welding Machine

岡 島 秀 典*
Hidenori OKAJIMA

古 舘 賢 一*
Kenichi FURUDATE

福 田 賢 太*
Kenta FUKUDA

要 旨

二輪車の試作車体製作時、自動溶接工程における加工条件である電流と電圧、ひずみ量の見込みを決定するために、テストピースを用いた溶接実験からデータベースを構築した。このデータベースから実験式を導出し、電流と電圧を算出した。この算出結果を元に、熱収縮量を予測する手法を確立した。この手法により、溶接テスト用の車体を用いることなく加工条件の設定が可能となった。さらに、開発初期段階で量産同等品を用いた開発テストの実施が可能となった。これらにより、溶接部の設計仕様の早期決定、試作車製作日程の短縮と開発コストの削減が可能となった。

ABSTRACT

Welding experiments were conducted using test pieces in order to determine the arc current, arc voltage, and forecasted amount of distortion, which are conditions for the automatic welding process when fabricating two-wheeled vehicle bodies for preproduction. A database was created from the experimental results. Empirical formulas were derived from this database and used to calculate arc current and arc voltage. These calculation results were taken as the basis for establishing a method of forecasting heat shrink. These methods enabled the setting of processing conditions without the use of a two-wheeled vehicle body for welding tests. They further enabled the implementation of development testing using mass-production equivalents in the initial stages of development. As a result, early decisions on the design specifications for welded parts, shortening of preproduction vehicle fabrication schedules, and reduction of development costs were achieved.

1. ま え が き

二輪車の車体試作において、溶接部の早期設計仕様決定の観点から、量産時に適用可能な溶接条件の設定が求められている。

従来、試作の溶接加工は手作業でおこなっており、加工条件である電流と電圧、溶接速度の設定、熱収縮によるひずみ量の見込みは作業者の経験と勘に依存していた。この手法では、加工条件設定に個人差が生じるため、自動溶接を主に行っている量産には、試作時の加工条件を反映できなかった。そのため、量産移行時に加工条件を改めて設定する必要がある、非効率的であった。

この対応として、量産ラインと同等の自動溶接設備やタクトを取り入れた試作手法を導入した。この手法において、試作時に設定された溶接加工条件は量産まで一貫して適用されるため、重要なものとなる。

*二輪 R&D センター

自動溶接の加工条件は、通常、実際の車体部品を用いた溶接テストにより設定される。しかし、一回のテストで条件を設定することは難しく、トライアンドエラーを要するため、多数の溶接テスト用車体部品の製作とテスト工数が必要となる。

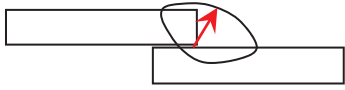
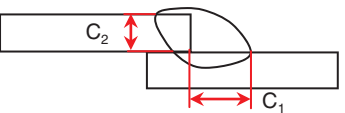
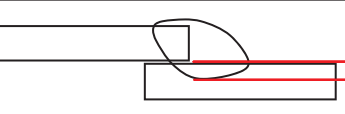
本研究は、自動溶接の加工条件設定の効率化を図るために、テストピースによる実験から、各溶接加工条件と品質の相関をデータベース化し、そのデータベースから溶接条件設定とひずみ量の予測を可能とする手法を構築した。

2. 二輪車体の溶接加工

2.1. 二輪車体の溶接

Fig. 1 に二輪車体と使用される溶接継手を示す。溶接部の継手は主に重ね隅肉継手 (Lap joint)、T字継手 (T-joint)、パイプの合わせ継手 (Pipe joint) が用いられ、最

Table 1 Weld quality evaluation items

Control items	Section	Explanation
Throat thickness		Minimum thickness of welding bead
Leg length		Distance from the root of joint to the toe of welding bead
Weld reinforcement		Height of the weld metal lying outside the plane containing the weld toes
Penetration		Depth of fusion into the parent metal from its surface

多で 200 点を越える部品から構成される。また、溶接部の長さの総計が 10 m を超える機種もある。

溶接には主に、トーチと呼ばれる器具先端の電極で発生する電気アーク放電により加熱、熔融された部位に溶接棒を自動で供給する MIG (Metal Inert Gas) 溶接や MAG (Metal Active Gas) 溶接等のアーク溶接⁽¹⁾が用いられる。

2.2. 溶接品質の管理項目

2.2.1. 溶接部の品質

溶接の品質は設計上の強度要件が満たされていることが重要である。溶接品質の評価は、溶接部を切断した断面で溶接内部の品質を確認する方法でおこなう (Fig. 2)。評価する部位は脚長 (Leg length)、のど厚 (Throat thickness)、余盛り (Weld reinforcement)、溶け込み深さ (Penetration) で、これらの良否判断により品質管理をおこなう (Table 1)。

2.2.2. 寸法精度

完成した車体は、図面の許容寸法を満足する必要がある。しかし、溶接後の冷却時に溶着金属 (溶接ビード) の熱収縮による変形が起こり、寸法精度に影響する。このこと

から、溶接前に変形量を予測する必要がある⁽²⁾ (Fig. 3)。

2.3. 溶接の加工条件

二輪車体の溶接加工条件としては、電流と電圧、溶接ひずみの見込み量、溶接速度がある。

MIG 溶接や MAG 溶接においては、一般に電流で溶接棒の供給量を、電圧で溶接棒を溶かす量を設定する。

溶接後に図面上の寸法公差に収まるように、溶接ひずみの見込み量には、熱収縮の見込み量をあらかじめ設定する。

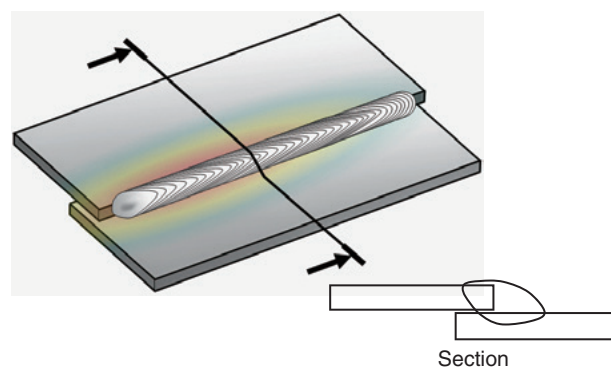


Fig. 2 Cross section of welding bead

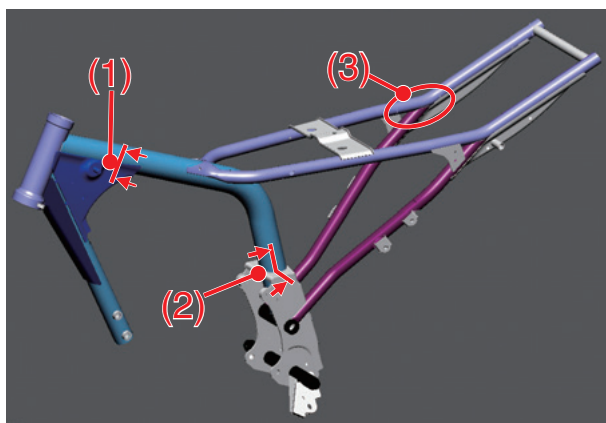
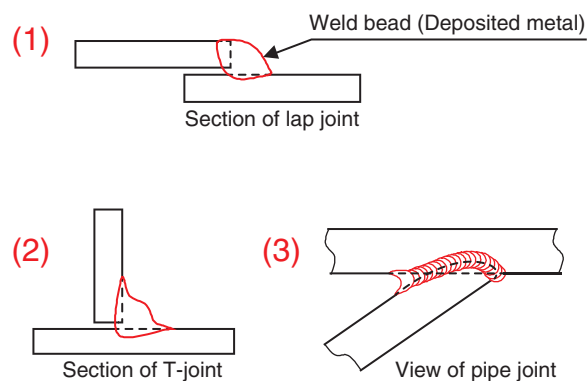


Fig. 1 Configuration of motorcycle body frame and type of welded joint



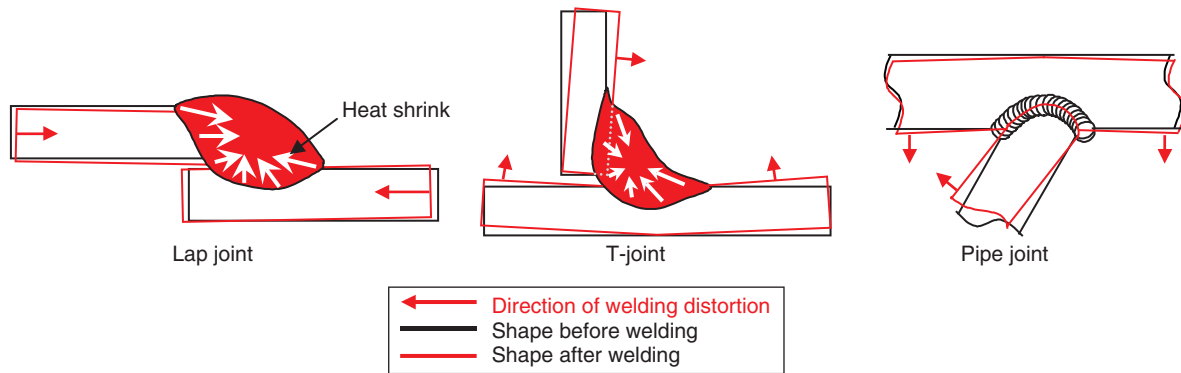


Fig. 3 Welding distortions

溶接速度はトーチの移動速度を表す。トーチは溶接棒を供給しながら溶接部を移動するため、速度の変化と共に溶着金属量にも変化が生ずる。その結果、溶接継手強度に影響が発生することから各速度域で最適な溶接棒の供給が必要となる。

強度要件を満たすために、これらの条件を被溶接物の材質と板厚、継手形状に適した値に設定する。

3. データベースの構築

二輪車体に使用される溶接継手形状を再現したテストピースを用いて実験をおこない、その結果をもとにデータベースを構築した。

3.1. 実験概要

二輪車体形態別の溶接継手形状と材料、板厚から鉄 540

種類、アルミニウム合金 380 種類の溶接継手を電流と電圧 17 条件、溶接速度 8 条件を組み合わせたテストピースによる実験をおこなった。各加工条件における溶接ビード品質と熱収縮による溶接継手変形量のデータを収集した。

3.2. 実験条件

自動化を適用するにあたり、量産性を考慮する必要性から、量産タクトから決定された溶接速度をあらかじめ設定した。設定した溶接速度を基に前述の電流と電圧条件を組み合わせ実験をおこない、溶接品質のデータを収集した。

溶接部品はプレス品や鋳造品が用いられる。これらを複数の部品で組み合わせた時、集積誤差により溶接継手に隙間が生じる。このため、あらかじめ溶接継手に隙間を設け溶接をおこなった (Fig. 4)。隙間の大きさは各々の部品の普通寸法公差を考慮して設定した。

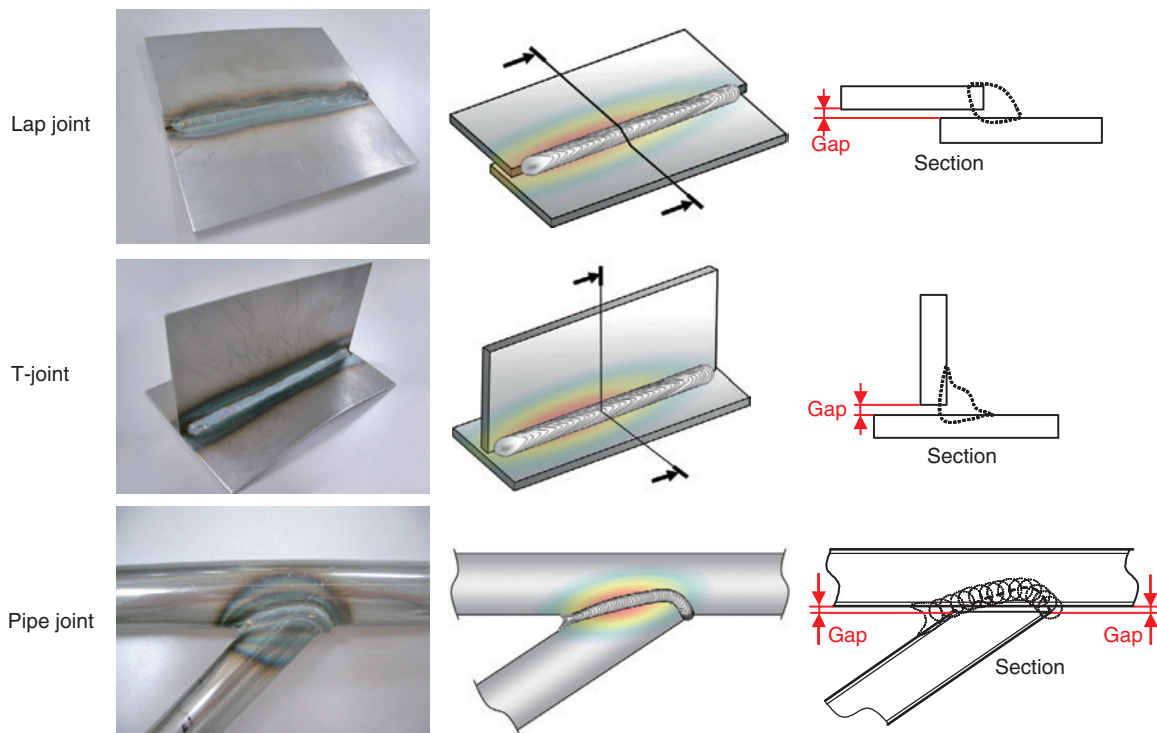


Fig. 4 Test pieces and welded joint gap settings

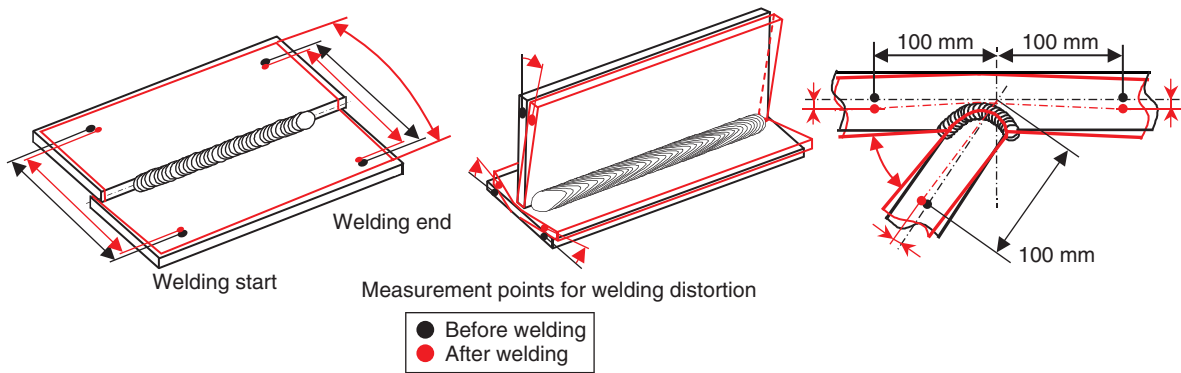


Fig. 5 Measurements of welding distortion

3.3. 実験結果

実験においては、まず、強度上重要な品質管理項目である「のど厚」、「脚長」、「溶け込み深さ」、「余盛り」に対して品質評価をおこなうと同時にそれらのデータを採取した。また、ひずみに関しては、Fig. 5 に示す各測定寸法の溶接前後における変化量を採取した。さらに、溶着金属量を求めるために必要な余盛り率のデータを採取した (Fig. 6)。

以下に、実用頻度の高い溶接速度 4 条件、電流と電圧 3 条件のもとで、板厚 2 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC : JIS G 3141) テストピースを用いておこなった実験の結果を一例として示す。

3.3.1. のど厚

各溶接速度における電流、電圧とのど厚の関係を Fig. 7 に示す。溶接速度の増加に比例してのど厚が減少している。これは溶着金属量が減少するためである。一般に強度

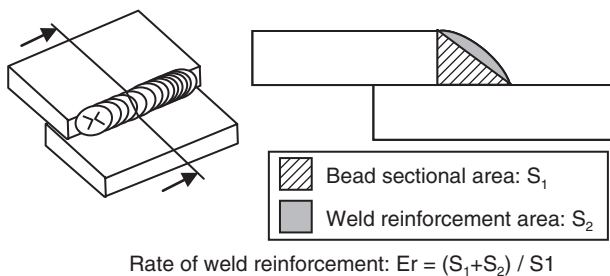


Fig. 6 Rate of weld reinforcement

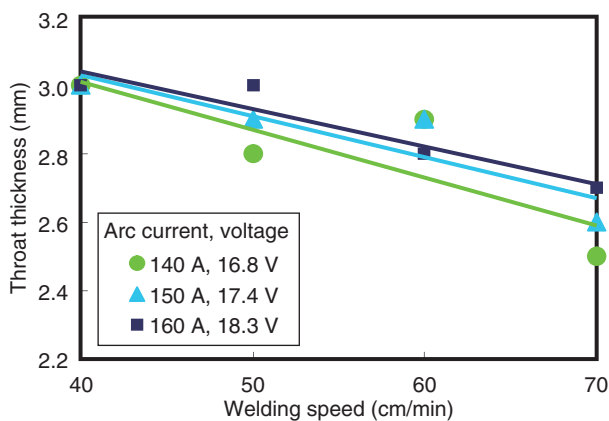


Fig. 7 Relation between welding speed and throat thickness for each arc current (SPCC, t2.0)

要件を満たすのど厚は板厚以上が望ましいとされる。実験ではすべての条件において板厚以上の数値が得られ、強度要件を満足する結果となった。

3.3.2. 脚長

各溶接速度における電流、電圧と脚長 C_1 の関係を Fig. 8 に示す。一般に強度要件を満たす脚長は板厚以上が望ましいとされている。実験ではすべての条件において板厚以上の数値が得られ、強度に余裕のある結果となった。

3.3.3. 余盛り

各溶接速度における電流、電圧と余盛りの関係を Fig. 9

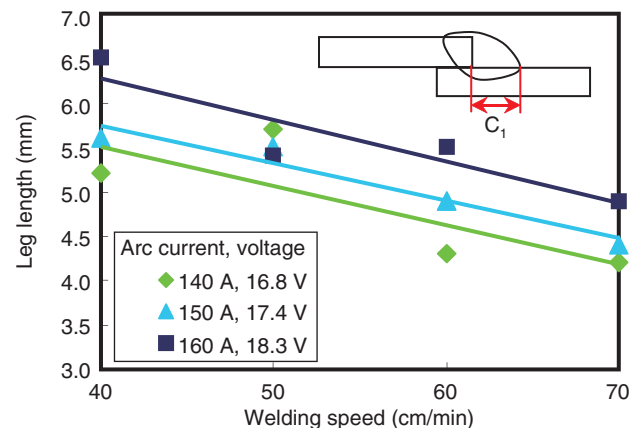


Fig. 8 Relation between welding speed and leg length for each arc current (SPCC, t2.0)

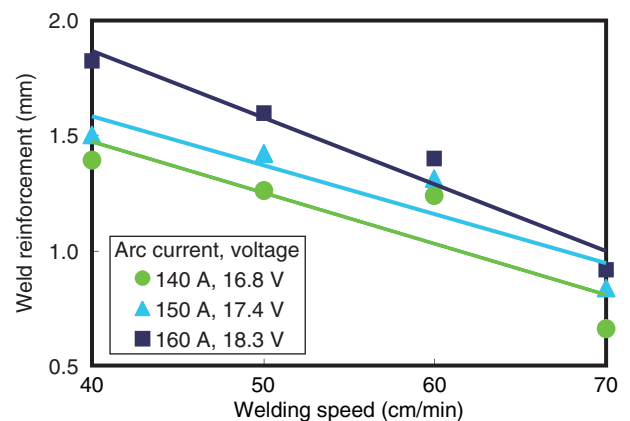


Fig. 9 Relation between welding speed and weld reinforcement for each arc current (SPCC, t2.0)

に示す。余盛りはのど厚に依存することから、いずれの電流においても高速域では溶着量の減少と共に余盛りも減少する。また、過度の高さのある余盛りは、余盛止端が高応力となるため、好ましくない。高さの上限については、継手形状、材料、構造に応じ設定する。

3.3.4. 溶け込み深さ

各溶接速度における溶け込み深さの関係を Fig. 10 に示す。設定した速度域ではすべて溶け込み深さが得られているが、板厚以上の溶け込み深さは板裏側に突出した溶着金属となり、酸化等の欠陥になりやすいため、好ましくない。

3.3.5. ひずみ量

各溶接速度における電流、電圧とひずみ量の関係を Fig. 11 に示す。単位溶接長さあたりの入熱量は、電流、電圧の積に比例し溶接速度に反比例して増加する。入熱量の増加により熱収縮量も増加し、ひずみが大きくなると考えられる。

3.3.6. 余盛り率

各溶接速度における電流、電圧と余盛り率の関係を Fig. 12 に示す。余盛り率は余盛りに依存し、高速域では溶着量の減少と共に余盛りも減少する。結果から、溶接速度、電流と電圧に応じて溶着金属量を求めることが可能となる。

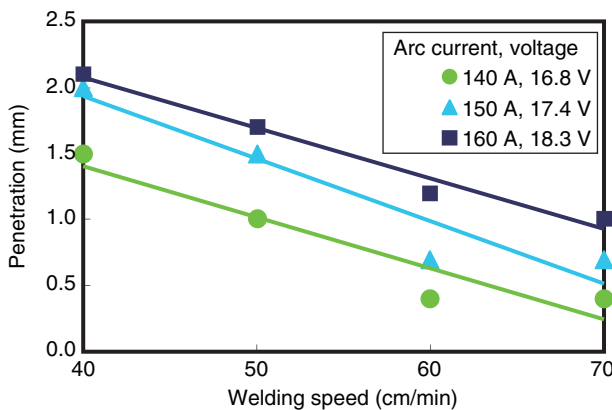


Fig. 10 Relation between welding speed and penetration for each arc current (SPCC, t2.0)

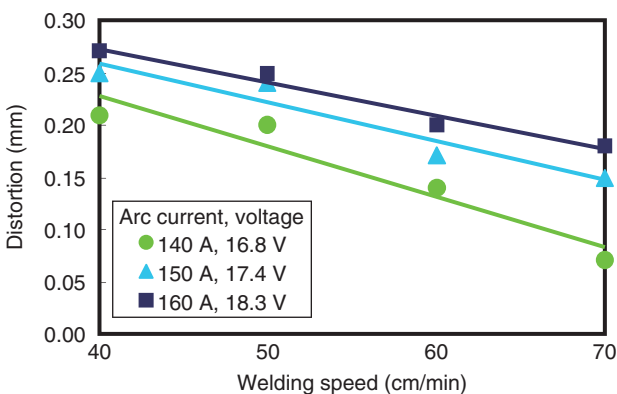


Fig. 11 Relation between welding speed and distortion for each arc current (SPCC, t2.0)

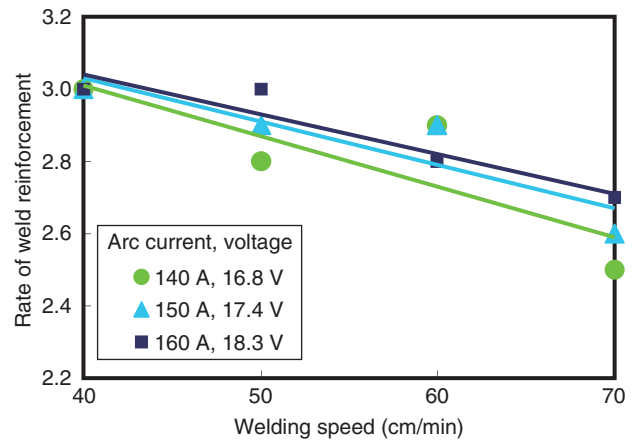


Fig. 12 Relation between welding speed and rate of weld reinforcement for each arc current (SPCC, t2.0)

4. 溶接条件の導出

溶接条件である電流と電圧の算出は、以下の手順でおこなう。

- (1) 溶接速度、板厚に適した強度要件を満たす溶着金属量の決定
- (2) 溶着金属量から溶接棒の送給速度（以下ワイヤ送給速度）を決定
- (3) ワイヤ送給速度を電流、電圧に換算

4.1. 溶着金属量を求める

Fig. 13 に溶接ビード断面の代表的な寸法を示す。

溶着金属量 D は、単位時間あたりに溶着した金属の体積であり、ビード全断面積と溶接速度の積で表される。ビード全断面積はビード断面積 S_1 と、余盛り率 E_r の積で表す。溶着金属量 D は、計算式 (1) で表される⁽³⁾。一般に余盛り率は 1.15 が付与され、強度上必要な脚長は板厚同等とされている。

$$D = (S_1 + S_2) v = E_r \cdot S_1 \cdot v \quad (1)$$

$$S_1 = \frac{(c_1 \cdot c_2)}{2}$$

$$E_r = \frac{S_1 + S_2}{S_1}$$

C_1, C_2 : 脚長

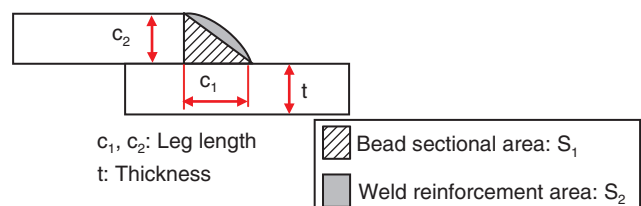


Fig. 13 Theoretical section of welding bead shape

しかし、3章の実験結果より、溶接速度 v により余盛り率 E_r 、脚長 c_1 、 c_2 が変化する。脚長 c_1 は板厚以上である。したがって式 (1) に対し、実用域の実験データから板厚ごとの回帰式を求め溶接速度に依存した余盛り率 E_r' 、脚長 c_1' 、 c_2' を算出する。さらに、 c_2' には継手隙間 G を加え、溶着金属量 D' を求める数式 (2) を導出した (Fig. 14)。

$$D' = E_r' \frac{c_1'(c_2' + G)}{2} v \quad (2)$$

ここで、

$$E_r' = -a_1 v + b_1$$

$$c_1' = -a_2 v + b_2$$

$$c_2' = -a_3 v + b_3$$

板厚ごとに式 (2) を用いた計算結果を Fig. 15 に示す。実験の溶着金属量に近い数値となることが確認できる。

4.2. 溶着金属量からワイヤ送給速度を求める

前述の算出結果から単位溶接長あたりに必要なワイヤ送給速度 W を求める。一般にワイヤ送給速度 W は式 (3) で表される⁽³⁾。

$$W = \frac{D}{\pi(d/2)^2} \quad (3)$$

d : 溶接棒径

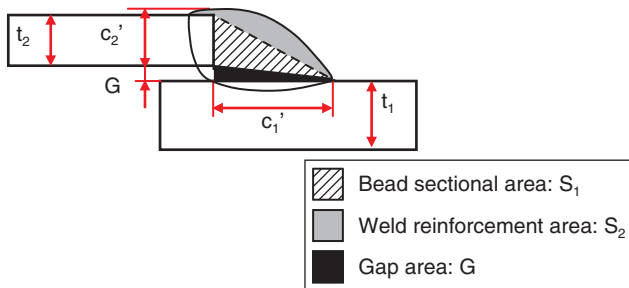


Fig. 14 Actual section of welding bead shape

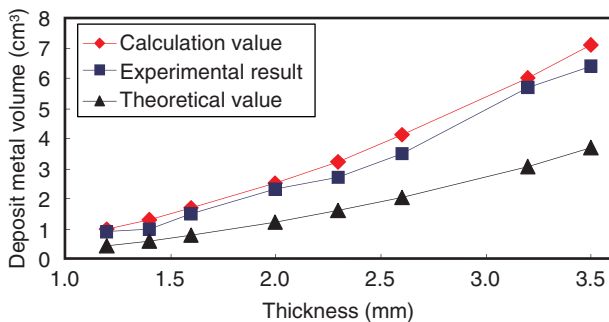


Fig. 15 Relation between deposited metal volume and thickness

4.3. ワイヤ送給速度を、電流と電圧に換算

Fig. 16 にワイヤ送給速度と電流, Fig. 17 に電流と電圧の測定結果を示す。3章の実験における各電流条件に対するワイヤ送給速度の実測データベースから回帰式を求めた。

$$I = a_4 W - b_4 \quad (4)$$

電圧 V は電流に対する実測データベースから回帰式により求めた。

$$V = a_5 I - b_5 \quad (5)$$

同様に材料別、溶接継手形状別に電流と電圧の算出をおこなう。

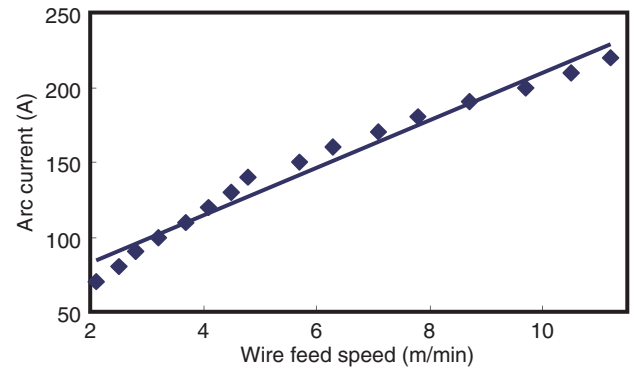


Fig. 16 Relation between wire feed speed and arc current

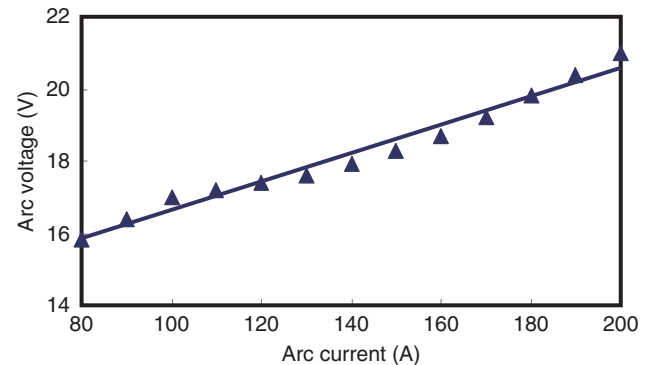


Fig. 17 Relation between arc current and voltage

5. ひずみ量予測式の導出

ひずみ量の算出は、以下の手順でおこなう。

- (1) 入熱量の算出
- (2) 溶接開始部、溶接終了部のビード収縮量を算出
- (3) 角度変化の算出

5.1. 入熱量の算出

電流と電圧、溶接速度より単位溶接長あたりの入熱量 Q (J/cm) を求めることができる。

一般に入熱量 Q は式 (6) で表される⁽¹⁾.

$$Q = \frac{I \cdot V}{v} \quad (6)$$

I : 電流

V : 電圧

v : 溶接速度

5.2. ビード収縮量の算出

得られた入熱量 Q を基に溶接開始部と溶接終了部の実測データベースからそれぞれ溶接ビード収縮量の回帰式を求める.

$$\varepsilon_{st} = a_6 Q + b_6 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ed} = a_7 Q + b_7 \quad (8)$$

ε_{st} : 溶接開始部の収縮量

ε_{ed} : 溶接終了部の収縮量

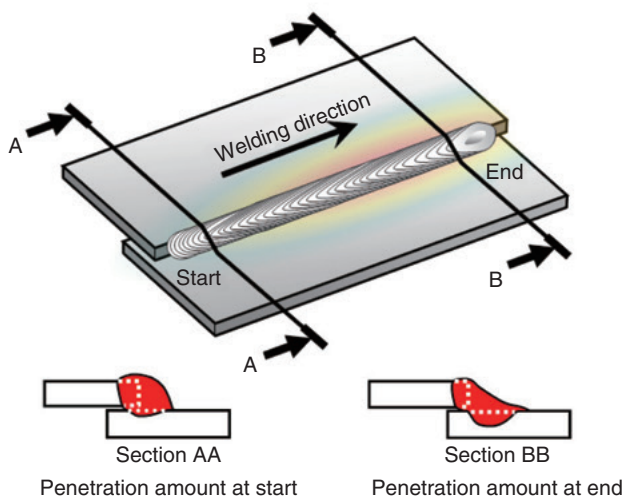
5.3. 角度変化の算出

溶接開始から溶接終了への溶接の時間経過に伴い, 母材温度が上昇する. これにより溶け込み量が増加し, 両端の収縮量の差により角度変化が発生する (Fig. 18). このときの単位溶接長あたりの角度変化量 θ は式 (9) によって求められる.

$$\theta = 2 \frac{\tan^{-1}[(\varepsilon_{ed} - \varepsilon_{st})/2]}{L} \quad (9)$$

L : 溶接長 (mm)

以上の算出結果を溶接治具に見込み量として設定する.



Amount of shrinkage increases with increasing penetration into base metal

Fig. 18 Angle change due to welding distortion

6. 実用性の検証と適用結果

4章に示す計算式を用いて自動溶接機 (ロボット溶接) の電流と電圧を設定し, さらに, 5章に示す計算式により算出した溶接ひずみの見込み量を反映させた溶接治具を用いて車体を製作し, 溶接品質と寸法精度の検証をおこなった (Fig. 19).

6.1. 検証結果

溶接品質

Fig. 20 に板厚に対する溶着金属量の計算値と実測値の比較結果を示す. 両者の間には良い相関が得られている.

寸法精度

Fig. 21 にエンジン搭載位置, 懸架装置の取り付け位置などの寸法測定点と寸法測定基準点を示す.

Fig. 22 に精度検証結果を示す. 横軸は各測定点の寸法測

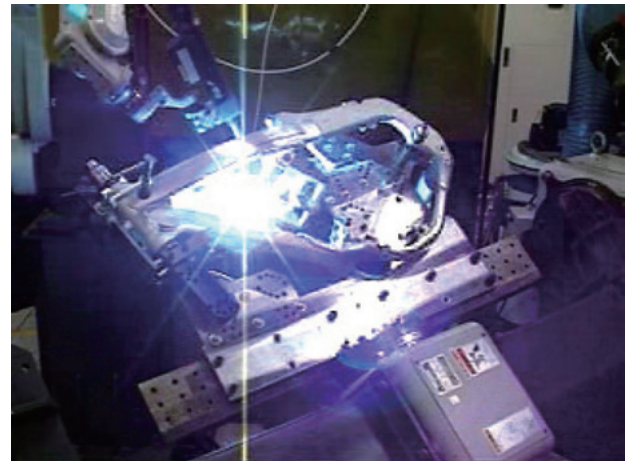
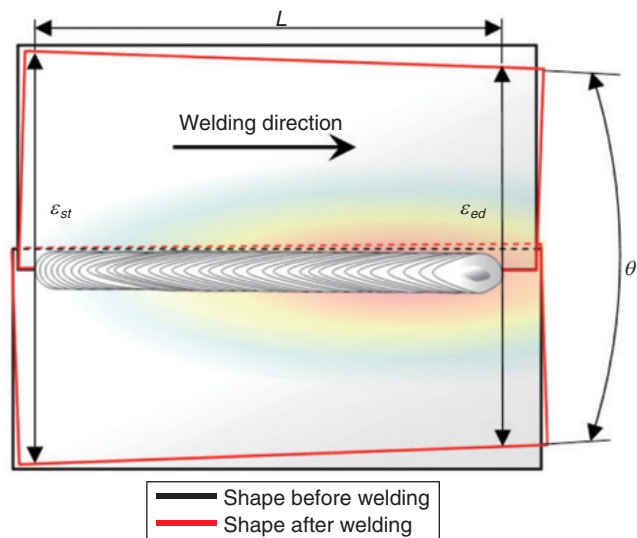


Fig. 19 Automatic welding machine



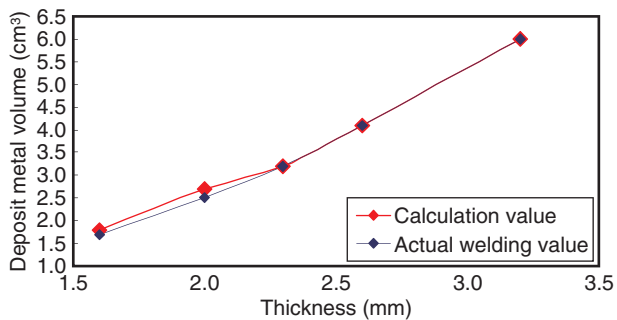


Fig. 20 Verification of calculation results

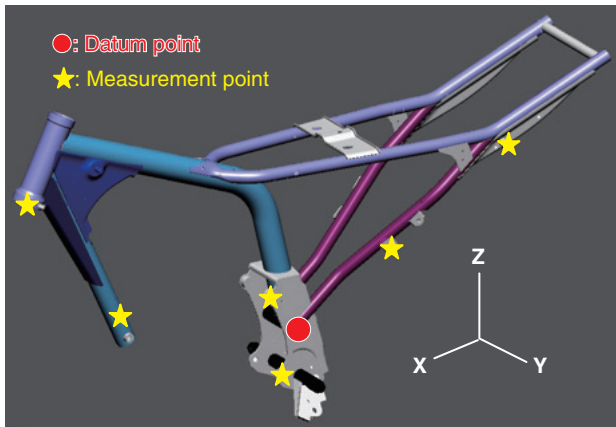


Fig. 21 Measurement points

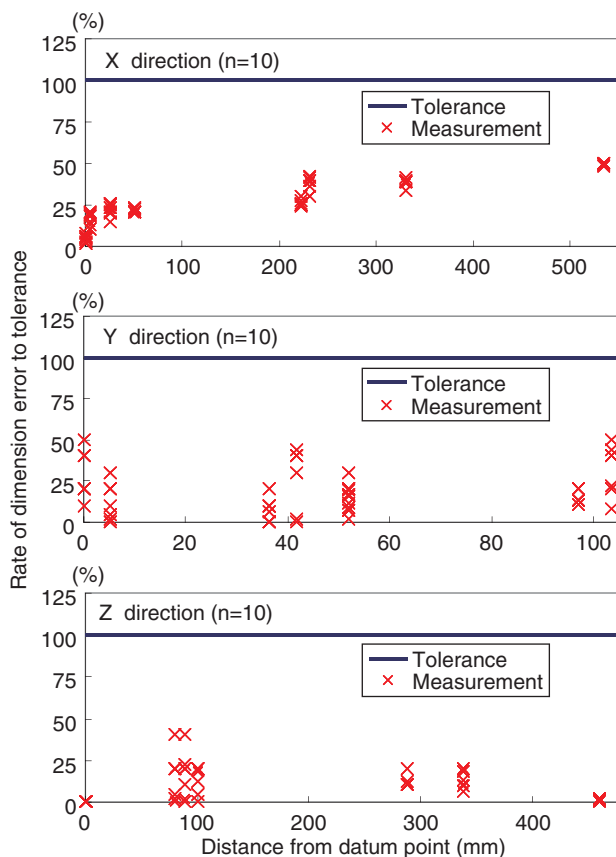


Fig. 22 Results of dimensional accuracy verification

定基準点からの距離、縦軸は各測定寸法の X, Y, Z 方向の寸法誤差を設計上の寸法公差に対する比率で表わす。すべての測定点に対して、寸法誤差の比率が 50 % 以内に収まり安定した精度が得られている。

6.2. 開発機種への適用効果

前述の検証結果から機種開発への適用は可能であると判断し、試作車体の製作をおこなった。その効果として、車体部品を用いた溶接テストによる条件出し工程が不要となり、2 日間の条件出し工数と約 40 % の試作コストの削減 (データベース適用後の平均値) が可能となった (Fig. 23)。さらに、開発初期段階で量産同等品を用いた車体耐久試験などの実施が可能となり、早期の設計仕様の決定に貢献した。

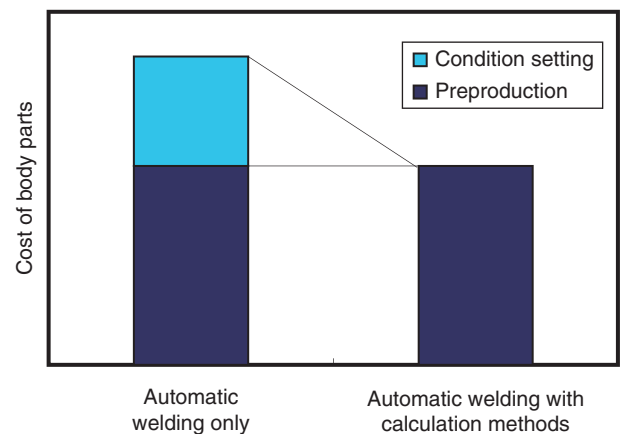


Fig. 23 Cost reduction of body parts

7. まとめ

自動溶接機を用いた二輪車の試作車体製作時の溶接加工条件設定を効率良くおこなうために、テストピースによる実験をおこない、その結果をデータベース化した。このデータベースから加工条件である電流と電圧、溶接速度の設定、ならびに、熱収縮量を予測する手法を構築し、以下の成果を得た。

- (1) 車体部品を用いた溶接テストによる加工条件出し工程が不要となり、試作工数とコストの削減が可能となった。
- (2) 精度の高い加工条件設定により、溶接品質と寸法精度の安定化が可能となった。

以上により、開発初期段階で量産同等品を用いた開発テストの実施が可能となり、溶接部設計仕様の早期決定に貢献できた。

参考文献

- (1) (社)溶接学会編:溶接便覧 改訂 3 版, 丸善出版,

p. 150-159, p. 331-340, p. 1357(1985)

(2) 徳丸芳男, 岡野修一 ほか: 機械工作 1 改訂版, 実教出版, p. 209-210(1989)

(3) 上田 敬三郎: 溶接 第9版, 神鋼溶接サービス株式会社, p. 98-99(2010)

■著 者■



岡島秀典



古舘賢一



福田賢太