

薄板材料の溶接ひずみ低減に関する研究

機械金属部 森田春美, 岩本竜一

Study on Less Distortion of Thin Plate Butt Welding

Harumi MORITA and Ryuichi IWAMOTO

溶接は他の金属接合法に比べ、材料重量の軽減、製作コストの低減、納期の短縮、継ぎ手効率が高等の長所を持っている反面、溶接入熱による溶接変形（溶接ひずみ）や熱影響による残留応力、組織の変化などの短所もある。中でも溶接ひずみは施工条件により複雑に変化し、その予測と防止策については経験と勘に頼っているのが現状である。

本研究では、特にその発生が著しい薄板の溶接ひずみの低減を図るために、溶接工程から主要因を抽出し、品質工学を用いて検討した。溶接ひずみはゼロが理想であることから、評価にはゼロ望目特性のSN比を用いた。この結果、溶接方向、ルート間隔、溶接電流、溶接速度などの薄板溶接の適正条件を得ることができた。

1. 緒言

溶接技術は、ほとんど全ての構造物や製品の組立技術として金属工作に不可欠の技術と言われている。これは他の接合法に比べ材料重量の軽減、製作コストの低減、納期の短縮などの優れた経済性のほかに、継ぎ手効率が高等ことから構造物の安全性と使用性能の向上が実現できるからである。しかし、このような長所がある反面溶接入熱による溶接変形（以下溶接ひずみという）や熱影響による残留応力、組織の変化などの短所もある。中でも溶接ひずみは、母材の種類、継ぎ手の形状および寸法形状、溶接方法、溶接条件、拘束状態および溶接順序などによって複雑に変化し、その予測は困難である。このため、溶接ひずみの防止対策技術は、経験と勘に頼っているのが現状である。

溶接ひずみは、製品の外観を著しく損ねるだけでなく、仕上がり精度を低下させ、強度上も問題となるばかりか、溶接材料が薄くなるほど様々な変形が発生する傾向にある。

溶接ひずみの予測にコンピュータ支援技術（CAE）を用いる方法が研究されているが、計算値と実際の構造物とは異なった結果が発生することが多く、決定的な対策法とは言えない。

本研究では、業界において最も普及率が高く作業能率の高い半自動溶接法を対象に、様々な条件が絡み合って発生する溶接ひずみの中で、特にその発生が著しく、複雑である薄板の溶接ひずみを低減させるために、品質工学の手法を用いてひずみ低減条件の検討を行った。

2. 実験の計画

溶接は、炭酸ガス半自動溶接機と自動走行台車を組み合わせた溶接用走行台車により、図1に示す鋼板（SS400）

3.2mmのI型開先で突合せ溶接を行い、所定の位置の寸法を溶接前と溶接後に三次元測定機で測定し、その差をデータ（変形量）として解析する。

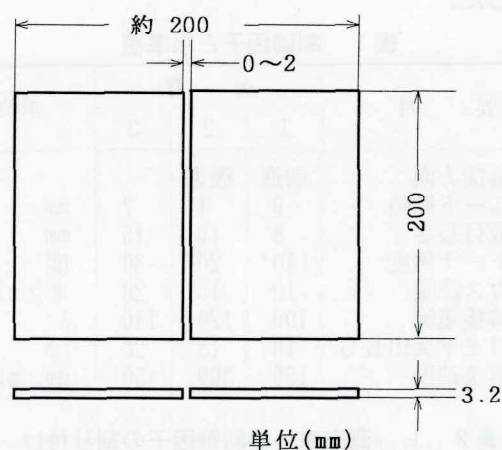


図1 試験材の寸法・形状

2. 1 制御因子

溶接ひずみの発生に影響を及ぼす多くのパラメータの中で、今回の実験に取り上げた要因は溶接方向 A、ルート間隔 B、仮付長さ C、トーチ角度（前進角及び後退角）D、シールドガス流量 E、溶接電流 F、ワイヤ突出し長さ G、溶接速度 H である。

溶接方向は前進法で溶接を行うか後退法で行うかによって溶け込み深さが変化することから、溶接ひずみの発生に大きく寄与するものと考えられる。トーチ角度も同様の影響があると思われる。

ルート間隔はその大小により板の溶け落ちや溶け込み不良などの溶接欠陥の発生や横収縮および縦収縮に影響が大きいと考えられる。

仮付け長さは長短により材料の拘束状態が異なるため、

材料の収縮や回転変形など種々の溶接ひずみの発生に影響が大きい。

シールドガス流量は溶接ひずみの発生に対して直接の影響は考えられないが溶接欠陥の発生に影響を及ぼす。またワイヤ突出し長さも溶接中のアーク安定性に影響があり、欠陥発生に寄与する要因である。

電流、溶接速度は溶け込み深さや母材への入熱量に影響が大きく、溶接欠陥の発生と溶接ひずみの両方に影響を及ぼす要因である。

これらの要因のほかに、変形に対して影響を及ぼす要因として溶接電圧が考えられるが、水準値を決めて実験する関係上、組み合わせによっては溶接電流とのバランスが崩れて、アークの発生が困難になる条件もあるため、設定電流に最もマッチした電圧が得られるように固定因子とした。

以上の8個のパラメータについて、各要因ごとにそれぞれ水準値を決めたものが表1である。これらの8個の要因を制御因子として、表2のようにL₁₈直交表に割り付け、右欄に理論上の溶接入熱を示した。入熱の値は、入熱量(J/cm) = 電流(A) × 電圧(V) × 60 / 溶接速度(cm/min)により算出した。

表1 制御因子と水準値

要 因	水 準			単位
	1	2	3	
A : 溶接方向	前進	後退	—	
B : ルート間隔	0	1	2	mm
C : 仮付長さ	5	10	15	mm
D : トーチ角度	10	20	30	度
E : ガス流量	10	15	20	ℓ/min
F : 溶接電流	100	120	140	A
G : ワイヤ突出長さ	10	15	20	mm
H : 溶接速度	150	300	450	mm/min

表2 L₁₈直交表への制御因子の割り付け

No.	制 御 因 子								入熱量 J/cm
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	7600
2	1	1	2	2	2	2	2	2	4800
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3920
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3200
5	1	2	2	2	3	3	1	1	11760
6	1	2	3	3	1	1	2	2	3800
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3920
8	1	3	2	3	2	1	3	1	7600
9	1	3	3	1	3	2	1	2	4800
10	2	1	1	3	3	2	2	1	9600
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5880
12	2	1	3	2	2	1	1	3	2553
13	2	2	1	2	3	1	3	2	3800
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3200
15	2	2	3	1	2	3	2	1	11760
16	2	3	1	3	2	3	1	2	5880
17	2	3	2	1	3	1	2	3	2533
18	2	3	3	2	1	2	3	1	9600

2. 2 信号因子

溶接工程においては、溶接ひずみはゼロが最も理想的である。本実験では溶接ひずみをゼロにするための条件を制御因子の中からさがすため、信号因子は設けない。

2. 3 誤差因子

溶接加工においては、その組立精度を向上させるために開先を機械加工するのが一般的である。しかし今回の実験のように、材料寸法が小さい場合は機械加工も可能であるが、現場加工ではその溶接長が数メートルになることも多く、機械加工は困難な場合が多い。開先の加工条件が異なると仮付の精度が異なり、溶接変形に影響を及ぼすことから開先加工の状態を誤差因子とした。具体的には現状の溶接工程を考慮して、シャーリングのままのものをN₁、機械加工を行ったものをN₂とした。

2. 4 固定条件

実験に使用した溶接機は、炭酸ガス半自動溶接機(ダイヘン製、インバータ制御、定格出力350A)、変形量の測定には三次元測定機(ミツトヨ製、FT 1006)を用いた。

実験の中で固定した条件は、仮付時の溶接電流は全ての試験片を120Aに統一し、また仮付及び本溶接とも1.2mmのワイヤを用いた。本溶接は図2に示すように自動走行台車に溶接トーチを取り付け、また試験片は片側を固定し、溶接線を挟んでもう一方は自由に変形できる構造とした。

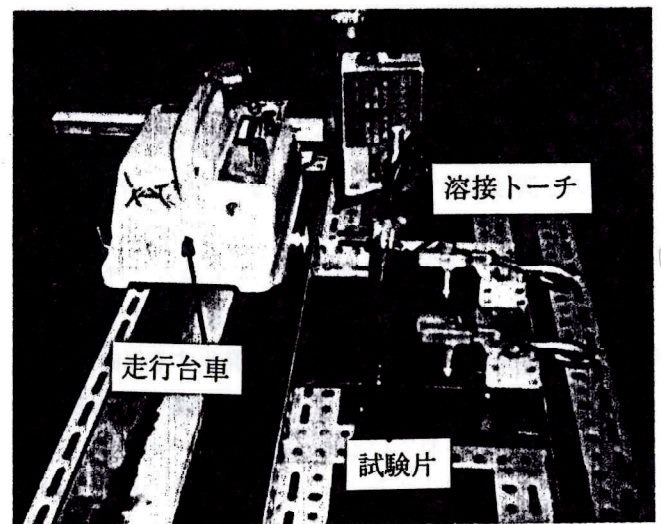


図2 溶接用走行台車

3. 実験の方法

3. 1 変形量の測定

溶接によって発生する溶接ひずみには、横収縮、縦収縮、回転変形、横曲り変形(角変形)、縦曲り変形、座屈変形があるが、薄板溶接の場合は特に角変形と座屈変形の発生が著しい。今回の実験では、この2つの変形量の測定を行った。変形量の測定位置は図3に示すように溶接線から最

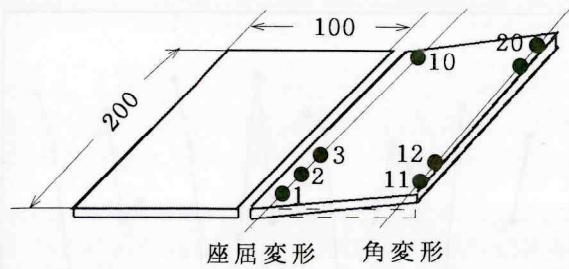


図3 変形量の測定位置

も離れた位置(10点)で角変形量を、また溶接線に最も近い平行な位置(10点)で座屈変形量を三次元測定機(最小表示値、0.001mm)で測定した。変形量は前記したように仮付け溶接後の測定値と本溶接後の測定値との差である。

表3に第1行目の変形量の測定結果を示す。

表3 変形量の測定結果(第1行目) 単位: mm

測定位置	N ₁ (シャーリング)		N ₂ (機械加工)	
	内側	外側	内側	外側
1 (11)	0.898	(6.452)	0.611	(-2.729)
2 (12)	1.369	(6.969)	-0.040	(-3.286)
3 (13)	1.786	(7.461)	-0.567	(-3.829)
4 (14)	2.159	(7.863)	-0.980	(-4.305)
5 (15)	2.317	(8.164)	-1.245	(-4.695)
6 (16)	2.344	(8.262)	-1.372	(-4.968)
7 (17)	2.191	(8.130)	-1.340	(-5.077)
8 (18)	1.842	(7.773)	-1.127	(-5.024)
9 (19)	1.339	(7.317)	-0.728	(-4.845)
10 (20)	0.716	(6.758)	-0.178	(-4.647)

4. データの解析

4.1 SN比の計算

溶接変形量はゼロが一番望ましいことから、望目特性のSN比¹⁾を求めた。一例として表3のデータを用いて、次のように算出した。

変形量の平均値

$$\bar{y} = 0.898 + 1.369 + 1.786 + \dots + (-4.647) / 20 \times 2 \\ = 41.739 / 40 = 1.04 \quad (1)$$

全変動

$$ST = 0.898^2 + 1.369^2 + 1.786^2 + \dots + (-4.647)^2 \\ = 801.63 \quad (2)$$

$$Sm = \{0.898 + 1.369 + 1.786 + \dots + (-4.647)\}^2 / 40 \\ = (41.739)^2 / 40 = 43.544 \quad (3)$$

誤差変動

$$Se = ST - Sm = 801.63 - 43.544 = 758.079 \quad (4)$$

誤差分散

$$Ve = Se / n - 1 = 758.079 / 40 - 1 = 19.438 \quad (5)$$

SN比

$$\eta = -10 \cdot \log Ve = -10 \cdot \log 19.438 = -12.87 \text{ (db)} \quad (6)$$

となる。

4.2 欠測値の処理

今回の実験においては、L₁₈の各行2枚を試験片とし、各20ヶ所、計40ヶ所を測定して測定データとしたが、溶接が不可能な行は5, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18行目で計9行あった。

これらの試験片のデータ処理は、他の行で求められたSN比の最小値に-3dbを加算した。その結果が表4である。

表4 L₁₈各行のSN比

L ₁₈ の行	η (db)	入熱量(J/cm)
1	-12.87	7600
2	0.36	4800
3	-4.74	3920
4	-4.56	3200
5	-15.87	11760
6	-5.15	8800
7	-15.87	3920
8	-4.10	7600
9	-15.87	4800
10	-15.87	9600
11	-15.87	5880
12	-1.43	2553
13	-2.97	3800
14	-2.76	3200
15	-15.87	11760
16	-15.87	5880
17	-15.87	2533
18	-15.87	9600

表5 分散分析のための水準別平均値

制御因子	SN比の和			SN比の平均		
	1	2	3	1	2	3
A	-78.67	-102.38	-	-8.74	-11.38	-
B	-50.42	-47.18	-83.45	-8.40	-7.86	-13.91
C	-68.01	-54.11	-58.93	-11.34	-9.02	-9.82
D	-80.91	-51.65	-48.49	-13.49	-8.61	-8.08
E	-68.39	-41.47	-71.19	-11.40	-6.91	-11.87
F	-42.42	-54.57	-84.09	-7.07	-9.10	-14.02
G	-64.67	-68.27	-48.11	-10.78	-11.38	-8.02
H	-80.45	-55.37	-45.23	-13.41	-9.23	-7.54

5. 制御因子の効果の検討

各制御因子の効果を求めるためにSN比を分散分析する。分散分析に必要な制御因子の各水準ごとのSN比の和及び平均を求めた補助表が表5である。

これより、修正項CFは、

$$CF = (\text{全データの和})^2 / \text{全データ数} \\ = \{(-12.87) + 0.36 + \dots + (-15.87)\}^2 / 18 \\ = (-181.05)^2 / 18 = 1821.06 \quad (7)$$

となり、全変動STは、

$$ST = (\text{個々のデータ})^2 \text{の和} - CF \\ = \{(-12.87)^2 + 0.36^2 + \dots + (-15.87)^2\} - CF \\ = 2537.56 - 1821.06 = 716.50 \quad (8)$$

溶接方向の効果 S A は,

$$\begin{aligned} SA &= \{(A_1 \text{の和})^2 + (A_2 \text{の和})^2\} / 9 - CF \\ &= \{(-78.67)^2 + (-102.38)^2\} / 9 - 1821.06 \\ &= 16670.63 / 9 - 1821.06 = 31.23 \end{aligned} \quad (9)$$

ルート間隔の効果 S B は,

$$\begin{aligned} SB &= \{(B_1 \text{の和})^2 + (B_2 \text{の和})^2 + (B_3 \text{の和})^2\} / 6 - CF \\ &= \{(-50.42)^2 + (-47.18)^2 + (-83.45)^2\} / 6 - CF \\ &= 11732.03 / 6 - 1821.06 = 134.28 \end{aligned} \quad (10)$$

として求められる。同様にその他の制御因子の効果を求めるため、分散分析したものが表6である。なお、本実験では、全ての列に制御因子が割付けられているために誤差の項がない。このような場合、一般的には分散値の小さいものから因子の約半数を誤差として取り扱っている。ここでは4つの因子を誤差と考えてプールした。寄与率 ρ はこの誤差の分散を用い、純変動 S' を

$$(\text{純変動}) = (\text{平方和}) - (\text{自由度}) \times (\text{誤差分散})$$

として,

$$\rho = (\text{純変動}) / (\text{全変動}) \times 100 \quad (\%) \quad (11)$$

で求められる。従ってルート間隔 B の場合は,

$$\begin{aligned} S'_B &= S_B - 2 \times V_e = 134.27 - 2 \times 17.59 = 99.09 \\ \rho_B &= S'_B / S_T \times 100 = 99.09 / 716.49 \times 100 \\ &= 13.8 \quad (\%) \end{aligned} \quad (12)$$

となり、同様にその他の因子の寄与率も求めた。以上のことから、寄与率の大きい効果は溶接電流、ルート間隔である。各制御因子について、水準間の SN 比の傾向を図4に示す。水準間の SN 比の傾向から、溶接ひずみに関しては溶接方向は前進法が SN 比は高く、ルート間隔はゼロよりも 1mm の間隔を開けた方が SN 比は高く、2mm になると SN 比は低くなる。また仮付け長さは 10mm、トーチ角度は前進角 30 度、ガス流量は 15 l / 分、溶接電流は 100A、ワイヤ突出し長さは 20mm、溶接速度は 450mm / 分が SN 比が高く、適当な条件であることがわかる。

分散分析の結果、溶接電流、ルート間隔、溶接速度、トーチ角度の分散値が大きく、溶接ひずみに対して、効果が大きいことがわかる。

表6 溶接条件の評価のための分散分析表

制御因子	平方和 S	自由度 f	分散 V	寄与率 ρ
A	31.23 °	1	31.23	
B	134.28	2	67.14	13.8
C	16.61 °	2	8.31	
D	106.51	2	53.26	9.9
E	89.77	2	44.89	7.6
F	153.26	2	76.62	16.5
G	38.54 °	2	19.27	
H	109.57	2	54.79	10.4
A×B	36.74 °	2	18.37	
e(°印ノール)	123.12	7	17.59	
T	716.49	17		

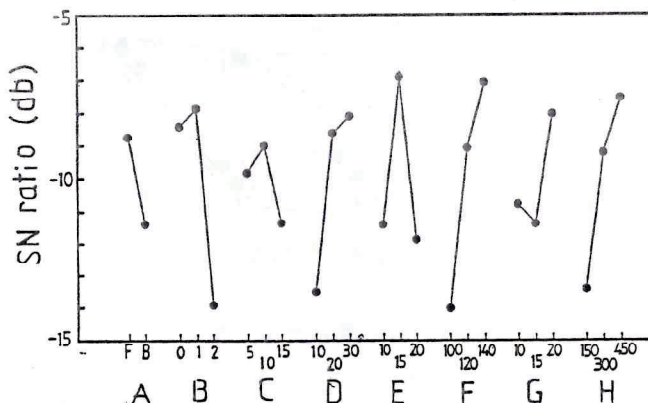


図4 制御因子毎の SN 比の傾向

6. 最適条件の推定と確認実験

6. 1 最適条件の推定

前節で述べたように、溶接ひずみに最も寄与率の大きい効果は溶接電流であり、電流が低い方が SN 比が高く、条件が良いことを示している。同様に他の制御因子についても SN 比の高い方の水準を選べば、その水準を組み合わせたものが最適な溶接条件となる。従って、図4をもとに最適な水準を選んだときの最適溶接条件は、

$$A_1, B_2, C_2, D_3, E_2, F_1, G_3, H_3$$

となる。この最適条件で溶接したときに得られる SN 比の推定値 μ を、表5の制御因子の平均値を用いて計算する。しかし、これらの全ての条件で推定すると過大推定となることが考えられるので効果の大きい B, D, F, H を用いて推定した。

最適条件

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= B_2 + D_3 + F_1 + H_3 - (3 \times \text{SN 比の総平均}) \\ &= -7.86 + (-8.08) + (-7.07) + (-7.54) - \{3 \times (-10.06)\} \\ &= -30.55 - (-30.18) \\ &= -0.37 \quad (\text{db}) \end{aligned} \quad (13)$$

また、現行条件を第2水準としたときの SN 比の推定値は

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= B_2 + D_2 + F_2 + H_2 - (3 \times \text{SN 比の総平均}) \\ &= -7.86 + (-8.61) + (-9.10) + (-9.23) - \{3 \times (-10.06)\} \\ &= -34.80 - (-30.18) \\ &= -4.62 \quad (\text{db}) \end{aligned} \quad (14)$$

これより、推定における利得は

$$\begin{aligned} \text{最適条件 } \hat{\mu} - \text{現行条件 } \hat{\mu} &= -0.37 - (-4.62) \\ &= 4.25 \quad (\text{db}) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。

6. 2 確認実験

実験結果の再現性を検討するために、表7に示した溶接条件を最適条件とし、現行条件は第2水準の組み合わせを

採用し確認実験を行った。その他の条件は固定条件と同じである。

表7 確認実験の条件

制御因子	最適条件	現行条件
A : 溶接方向	(A ₁) 前進	(A ₂) 後退
B : ルート間隔	(B ₂) 1 mm	(B ₂) 1 mm
C : 仮付長さ	(C ₂) 10 mm	(C ₂) 10 mm
D : トーチ角度	(D ₃) 30°	(D ₂) 20°
E : ガス流量	(E ₂) 15 ℓ/min	(E ₂) 15 ℓ/min
F : 溶接電流	(F ₁) 100 A	(F ₂) 120 A
G : ワイヤ突出長	(G ₃) 20 mm	(G ₂) 15 mm
H : 溶接速度	(H ₃) 450 mm/min	(H ₂) 300 mm/min

表8 SN比の推定値と確認実験の結果

	推定値 (db)	確認実験 (db)
最適条件	-0.37	4.90
現行条件	-4.62	-0.49
利 得	4.25	5.39

確認実験の結果を、表8に示した。

確認実験の結果、本実験における再現性は良好であり、推定値と最適条件の利得もほぼ一致していると考ええる。

7. 結 言

本実験は、溶接工程に品質工学を適用して、従来生産現場において苦慮している薄板の溶接ひずみの低減化を図ったものである。

その結果、次のことが明らかになった。

- ① 溶接ひずみ低減の最適条件の推定には評価特性の抽出²⁾が重要であり、品質工学による手法で最適化を図ることは実験規模、効率の点から効果的である。

- ② 溶接ひずみの発生には溶接電流、ルート間隔、溶接速度、トーチ角度の影響が大きく、仮付け長さ、ワイヤ突出し長さの影響は少ない。

- ③ 薄板溶接の場合、計算上の溶接入熱は同じでも、溶接方向を後退法で行うと溶け込みが大きくなり、溶け落ち(溶接欠陥)が発生する。

今回の実験では、薄板溶接のひずみについてのみ検討し、ひずみ量の少ない溶接条件を求めた。実験の組み合わせで溶接できない行が半分あったが、推定値と確認実験の利得もほぼ一致しており、再現性を確認できた。

溶接製品を評価するためには外観的な評価と継ぎ手性能(強度、内部欠陥)についての検討が必要であるが、今回は外観的な評価を重視して、品質工学を用いて最適条件を見いだした。

今後の課題として、溶接は継ぎ手効率が高いことを特徴とする金属接合技術であり、継ぎ手部の安全性確保の観点から、継ぎ手強度の高い溶接条件や内部欠陥のない条件の検討が残された。

最後に本研究を進めるにあたり、データの解析等についてご指導いただきました計量研究所計測数理研究室の皆様へ深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田口玄一: "品質工学講座3 品質評価のためのSN比" 日本規格協会(1988) p. 178
- 2) 田口玄一: "転写性の技術開発" 日本規格協会(1992) p. 54