

柱現場溶接ロボット作業におけるパス間温度 および入熱量の管理に関する研究

STUDY ON THE CONTROL OF INTERPASS TEMPERATURE AND HEAT INPUT IN THE APPLICATION OF COLUMN-FIELD-WELDING ROBOT

西 多 致*

Kiwamu NISITA

The Kobe Earthquake of January 17, 1995 caused an enormous amount of damage and prompted a major revision on the design, material and construction (included in manufacturing and processing). In steel structures, many damages which lead to fatal disasters occurred at the welded joints. Accordingly welding quality of welded joints directly governs capacity of steel structure.

Japanese Architectural Standard Specification JASS 6 Steel Work was revised in 1996 and interpass temperature, heat input are added to main items of welding quality control.

This paper describes the best control method of interpass temperature and heat input to get satisfactory welding quality based on an experiment on interpass temperature and heat input.

Keywords: field-welding robot, arc voltage, welding current, voltage drop, interpass temperature, heat input

現場溶接ロボット、アーク電圧、溶接電流、電圧降下、パス間温度、溶接入熱、

1 はじめに

1995年に発生した阪神・淡路大震災以来、被災した構造物に対して設計、材料、施工（製造加工含む）の面から種々の検討が行われている。鉄骨構造物では、致命的被害をもたらした損傷が部材の継ぎ目、すなわち溶接継ぎ手部分に多く発生している。この溶接継ぎ手の品質が鉄骨構造物の性能を直接的に支配し、その品質管理において従来の非破壊試験に基づく溶接欠陥管理のほかに、接合部の形状的管理および熱履歴管理の重要性が問われている。特にこの熱履歴管理に対して、1996年改訂された日本建築学会鉄骨工事標準仕様書（JASS6）・鉄骨工事技術指針では溶接入熱（以下；入熱量と略す）とパス間温度を管理項目に設定している。

入熱量とパス間温度が溶着金属の機械的性質に及ぼす影響については中込他⁴⁾によって明らかにされ、入熱量・パス間温度の管理ツールは西方他⁶⁾、中込他⁷⁾らによって提案検討が行われている。

またパス間温度の推定などについては倉持他⁵⁾、中込他⁸⁾の報告がある。

上記の論文は手溶接（半自動溶接）もしくは工場溶接ロボットに基づいた研究であり、現場ロボット溶接に関する研究は皆無である。今後、熟練溶接工不足は明らかであるから、現場溶接においてもロボット溶接は普及すると考えられる。

筆者は柱現場溶接ロボットの開発を目指し、現場実験を繰り返しながら、初期型の1号機から最終型3号機に至る4世代の柱現場溶接ロボットの開発研究を行った。^{1)~3)}

前報³⁾においては柱現場溶接ロボット作業における溶接収縮と裏当て金の最適すきまについて検討したが、本論文は柱現場ロボット溶接における熱履歴を明らかにし、柱現場溶接ロボットに関する入熱量・パス間温度管理方法を提案する。

2. 電圧値と電流値の変動に関する実験

2.1 実験の目的

安定したアークを得るために、一般に手溶接では溶接工が試しのアークを発生させ、溶接工の経験的判断で溶接電源の電流値および電圧値を調整しているが、ロボット溶接は定電圧の出力制御とワイヤ送給制御の機能により、ワイヤ送給量とワイヤ溶着量のバランスをとり、各層各パス毎に電流値、電圧値、溶接スピード、ウイーピングなどの入力設定が行われている。しかし、現場施工において、溶接電源と溶接ロボット間の2次ケーブルの長さおよび配線形状などに起因する電圧・電流値の変動が生じる。その結果、ワイヤ送給量とワイヤ溶着量のバランスが崩れ、溶接品質に悪影響を及ぼすことになる。従って電圧・電流値の変動を極力少なくすることが重要となるために溶接電圧

* 前田建設工業㈱建築本部建築部

・電流値の変動を極力少なくすることが重要となるために溶接電源とワイヤ送給装置間の2次ケーブルの長さおよび配線形状に起因する電圧値と電流値の変動を把握する。

2.2 試験体と溶接材料

連続アークを発生させるために、試験体は 500mm×500mm×9mm の鋼板（SM 材）とし、溶接材料は YM・28Sφ1.4 を使用し、シールドガスは 80%Ar+20%CO₂ のマグガスとした。

2.3 使用ロボット

3号機の2台のロボットうち、R1 ロボットを使用した。ロボットの構成を図1に、仕様を表1に示す。溶接電源はインバータ制御のパルスマグ溶接電源であり、その出力特性は定電圧特性である。実験は無風に近い状態の室内でなされた。実験状況を写真1に示す。

2.4 実験方法

2.4.1 溶接要領

3号機の R1 ロボットを使って、試験体面を水平に連続アークを発生させた、設定電圧を 26 V、設定電流を 150 A として、2次ケーブルは継ぎ足してその長さを変えて電圧値と電流値を計測した。

2.4.2 計測要領

クランプメータとADコンバータを使用して、電圧値と電流値のデータを 0.108 秒毎にパソコンに取り込んだ。同一実験を 3 回繰り返して測定値の平均値を測定結果とした。測定機器の仕様を表2に示す。計測状況を図2に示す

2.4.3 2次ケーブルの長さおよび配線形状

溶接電源とワイヤ送給装置間の2次ケーブルは WNCT80[□]-1[□]を使用した。長さは、走行台車を柱毎に移動する場合の最小長さ 10m、その移動回数を減らして多数の柱の溶接が出来る 30m と 50m の 3 種類とする。配線形状は、交差無しと交差有りの2ケースとし、交差は直径約 60cm の円形に巻いた形状とした。現場溶接作業で想定される 1 回から 3 回までの交差は単独の円とし、10 回と 15 回は 1 ケ所にまとめた。表3に実験パラメータを示す。

2.5 実験結果

(1) 計測電圧値と計測電流値

サンプリングした1パスの電圧値を図3に示す。この図において電圧値はスパーク等に起因する大きな変動を示してはいるが、非常に短い時間に生じており、この状況を1パスの運行中における発生頻度として数値化したものを図4に示す。この図に示す溶接に寄与しないと考えられる両側のデータを削除するためにサンプリングしたデータの各パス毎に標準偏差σを求め、各パスの平均値と3σを使って最小値と最大値を求める。最小値未満のデータと最大値を超えるデータを削除する。(以下、ノイズ処理とする) このノイズ処理した電圧値および電流値を計測電圧値および計測電流値とする。

(2) 2次ケーブルの長さに対する計測電圧値と計測電流値

計測電圧値と計測電流値の結果を図5に示す。ケーブルが長くなると計測電圧値、計測電流値とも大きく変動した。

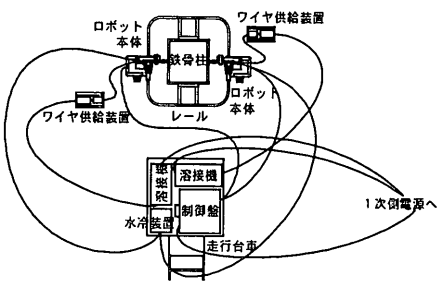


図1 3号機の構成

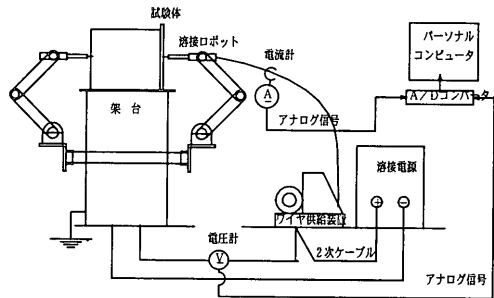


図2 計測状況

表1 溶接ロボットの仕様

項目	3号機
溶接する柱の種類	ボックス、コラム、丸柱
柱サイズ (mm)	ボックス □500～□800
	コラム □500～□800
	丸柱 ○500～○800
板厚 (t)	ボックス 19～80mm
	コラム 19～36mm
	丸柱 19～80mm
開先角度	35° ± 0.5° t>40mm
	35° ± 1° t≤40mm
型式	5軸多関節直交座標型
溶接電圧	15～42V
溶接電流	50～500A
溶接速度	1～100cm/min
ワイピングパターン	初層と仕上げ層の1パス
ルートギャップ	4～16mm
ルートギャップ差	0～3mm
センシング	ワイヤタッチ
シールドガス	CO ₂ 、80%Ar+20%CO ₂

表2 測定機器の仕様

項目	クランプメータ	ADコンバータ
メーカー	日置電気	ナショナルインスツルメンツ
型式	AC/DCクランプオンハイテスタ3265	1200シリーズ DAQ CARD
仕様	DC: 100/1000A 1000Hz	12ビット分解能 100KS/秒サンプリング ±0.05V～±5V入力範囲

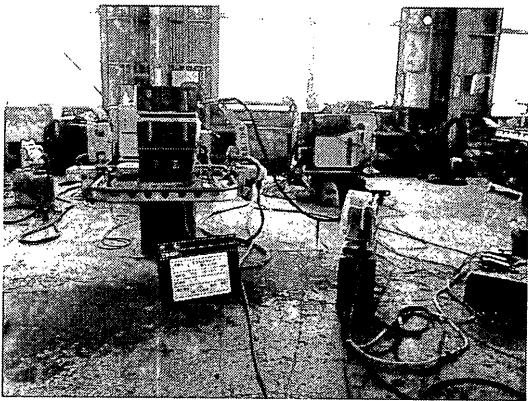


写真1 実験状況

図 5 についてケーブルの長さ毎に捉えると、交差回数が 3 回までは計測電圧値と計測電流値とも変動は少なく、10 回、15 回になると顕著な変動を示した。

溶接電源装置の定電圧特性は各2次ケーブルの長さに対して、交差回数が0回から3回までは機能しており、10回、15回となると機能しなく、その電圧降下によりワイヤ送給量とワイヤ溶着量のバランスが崩れて溶接品質が損なわれる。また2次ケーブルの長さ毎の制御機能が必要となる。従って2次ケーブルの長さはこの長さ毎の機能制御を避けて、一定な電圧・電流条件を得られ、交差を容易に避けることができる10mにすることが良い。

ロボット溶接における入熱量・パス間温度管理を適性に行うために、溶接ロボットに入力されている電流値、電圧値、溶接速度の設定値と溶接中におけるそれらの計測値との間の相関関係を求める。また溶接中のパス間温度を計測して、入熱量に対する相関関係を求めて、ロボット溶接における入熱量・パス間温度の管理方法を提案する。溶接中に入熱量は JASS 6 の下記に示す式から求める。

アーク電圧値と溶接電流値として 2.5 節に示す計測電圧値と計測電流値を用いて算出した値を計測入熱量とし、また設定電圧値と設定電流値を用いて算出した値を設定入熱量とした。

試験体は板厚を 25mm とし、図 6 に示す開先詳細図のすきま(e)を変えた 4 体のボックス柱を使用した。すきまの設定値と計測した平均値を表 4 に示す。試験体の材質は SN490B、溶接材料は YM-28S φ1.4、シールドガスは 80%Ar+20%CO₂ のマグガスとした。

溶接手順は図7に示し、SK6 試験体の R2 ロボットの仕上げ層は中間層と同じ手順とした。基本積層パターンはルートギャップ 8.2mm とした板厚 25mm では 5 層 21 パスとなり、図8に示す。

3章に示す計測要領と同様に表2の測定機器を使って電圧値と電流値のデータをサンプリングし、この計測要領を図9に示す。サンプリングした電圧値および電流値をバス毎にノイズ処理した計測結果を計測電圧値と計測電流値とする。

ケーブル長さ	10m				30m					50m					
交差回数	0	1	2	3	0	1	2	3	10	0	1	2	3	10	15

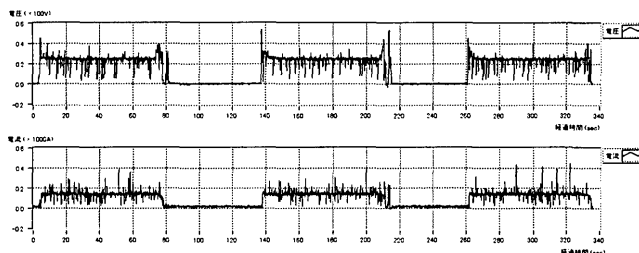


Figure 1 is a histogram showing the frequency distribution of the number of eggs per 1000V. The x-axis is labeled '蛋压 (×1000V)' and ranges from 70 to 7075. The y-axis is labeled '频度 (%)' and ranges from 0 to 35. The distribution is highly skewed, with a major peak at 7025 (approx. 32%) and a secondary peak at 7020 (approx. 28%). A legend indicates '频度' with a shaded box.

蛋压 (×1000V)	频度 (%)
7000	1.5
7005	0.5
7010	0.5
7015	0.5
7020	2.5
7025	32.0
7030	8.5
7035	1.5
7040	0.5
7045	0.5
7050	0.5
7055	0.5
7060	0.5
7065	0.5
7070	0.5
7075	0.5

Figure 10 consists of two line graphs comparing calculated and measured values for voltage and current. The left graph shows voltage (V) on the y-axis (15 to 26) versus cable length (m) on the x-axis (0 to 10m). The right graph shows current (A) on the y-axis (0 to 200) versus cable length (m) on the x-axis (0 to 50m). Both graphs compare calculated values (solid line with circles) and measured values (dashed line with triangles).

Left Graph: Voltage (V) vs. Cable Length (m)

ケーブル長 (m)	計算電圧値 (V)	計測電圧値 (V)
0	24.9	142
1	24.8	143
2	24.6	146
3	24.7	149

Right Graph: Current (A) vs. Cable Length (m)

ケーブル長 (m)	計算電流値 (A)	計測電流値 (A)
0	22.5	160
1	22.7	154
2	22.7	156
3	22.8	156
10	21.3	187
20	21.7	172
30	21.7	168
40	22.0	165
50	22.1	168
100	20.0	175
150	19.8	179

(单位:mm)

試験体	設定値	A面	B面	C面	D面	平均
		先行面	後行面	先行面	後行面	
SK4	1.0	0.8	1.1	1.0	0.8	0.9
SK5	1.5	1.1	1.1	1.4	0.9	1.1
SK6	1.5	1.6	1.3	1.7	1.4	1.5
SK7	2.5	2.1	2.2	2.1	2.1	2.1

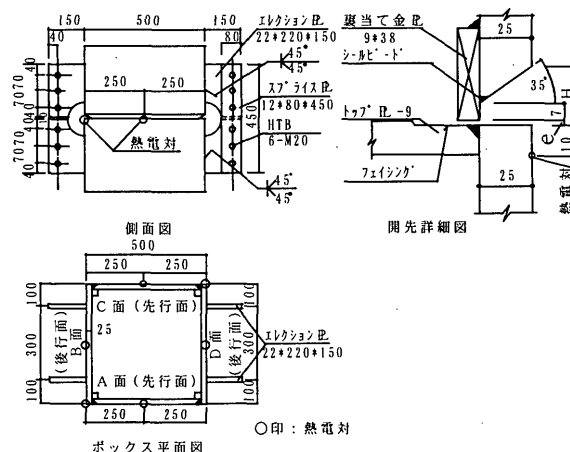


図 6 試験体図

(2) パス間温度

パス間温度の測定位置は JASS 6 に従い各パスの中央で、開先上端から 10mm 離れた表面位置とし、ロボットが 1 面のみ動く場合は 1 面の中央に、2 面 L 型に動く場合はコーナーに熱電対を取り付けた。パス間温度の測定位置は図 6 に示し、温度データは熱電対からデータロガー（東京測器研究所製 TDS-601）を経由して 3 秒毎にパソコンに取り込んだ。計測要領図を図 9 に示す。

3.5 実験結果

3.5.1 計測電圧値と計測電流値

SK 6 試験体の溶接作業において溶接開始から終了までのサンプリングした電圧値と電流値の変動状況を作業内容とともに図 10 に示す。それぞれの計測値は非常に短時間であるがスパークなどに起因する大きな変動を示している。計測電圧値および計測電流値と設定電圧値および設定電流値との関係を図 11 に示す。この図では R 1 ロボットと R 2 ロボット間で性能に起因する差があるために 2 台のロボット毎に分けて相関関係を示した。設定値と計測値の間に強い相関関係が見られた。

3.5.2 入熱量とパス間温度

各試験体の各層について、設定入熱量と計測入熱量を表 5 に示す。また各層、各パス毎の設定入熱量と計測入熱量とパス間温度を試験体 SK 5 と SK 7 のケースについて図 12 に示す。

(1) 入熱量

入熱量は初層、2 層、3 層の 1 パス目で最も高い値を示し、各層毎に最終パスが最も低い値となっているが、設定値と計測値はほぼ一致している。設定入熱量より計測入熱量が僅かに大きい要因は 2 次ケーブル側の電圧降下と、それに起因する溶接速度の降下である。計測入熱量は最大 17.0kJ/cm であり、中込ら⁸の「入熱・パス間温度の推定方法に関する実験的研究」に示す一般的に行われている半自動溶接の入熱量に比べて低い値となっている。

(2) パス間温度

各試験体の各層について、溶接作業の中断時間と最終パスのパス間温度を表 6 に示す。SK 4 試験体の 2 層と 3 層についてはデータ欠測のために削除している。

1) 初層のパス間温度

表 5 および表 6 と図 12 から、初層の先行面と後行面において入熱量は高いがパス数が少ないためにパス間温度は低く、2 パスの場

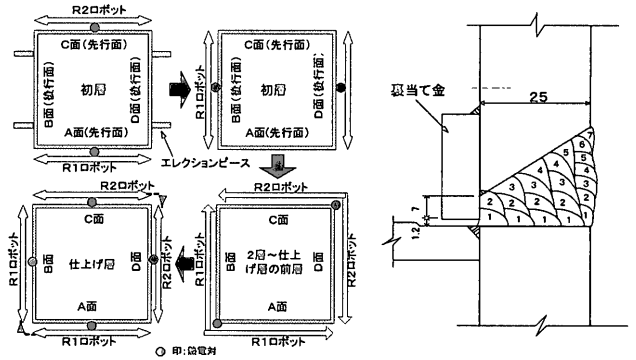


図 7 溶接手順図

図 8 積層パターン

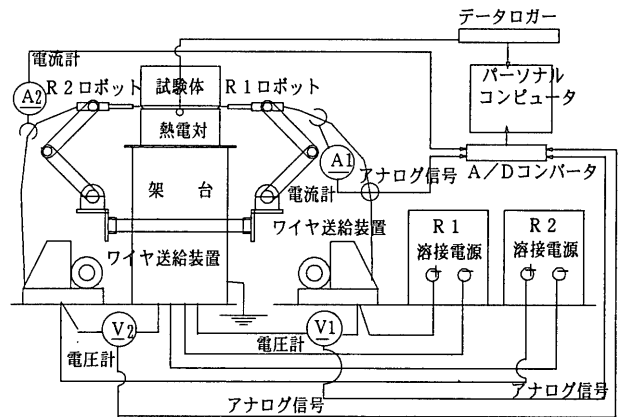


図 9 計測要領図

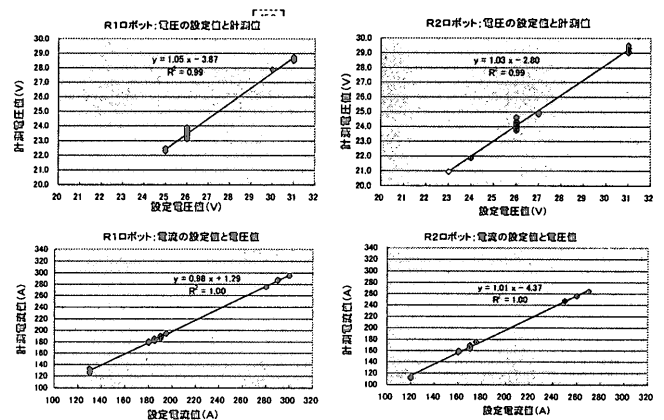


図 11 電圧および電流の設定値と計測値の関係

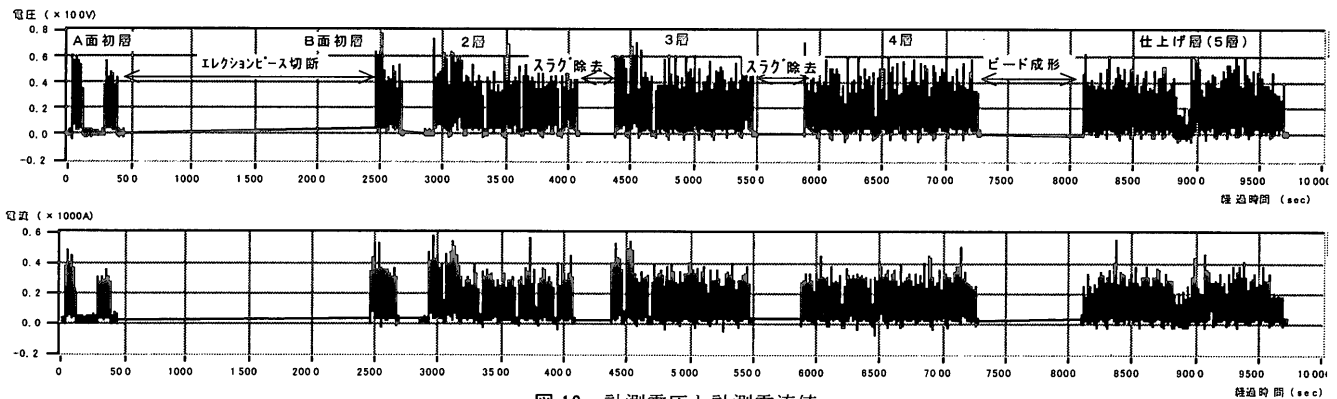


図 10 計測電圧と計測電流値

合は最大 162.0℃、3 パスの場合は 238.9℃である。しかし溶接長は中間層の半分であるために温度上昇勾配は中間層より大きい。先行面と後行面間の溶接ではエレクトロンの切断による長い中断時間があるが、後行面のパス間温度は先行面からの熱移動のために先行面より高い。

2) 中間層（2 層から 4 層）のパス間温度

中間層の溶接はスラグ除去などにより各層毎に中断し、その結果、パス間温度は中断時間のために階段状に上昇している。しかし、層毎のパス間温度は中断時間が無いために連続したほぼ線形上に上昇している。

3) 仕上げ層（5 層）のパス間温度

4 層の溶接後、ビード面の成形作業等の中断により仕上げ層の初パス間温度は大きく下がるが、5 層の溶接長は中間層の半分であるために、仕上げ層のパス間温度は先行面、後行面とも急上昇し、最終パス間温度は最も高い値を示す。パス数の多い試験体ほどパス間温度が高くなり、最も高い SK7 の試験体では 348.8℃である。しかし SK6 試験体の R 2 ロボットの 5 層目は先行面と後行面を連続に溶接し、溶接長が R 1 ロボットの 2 倍になっているために R 1 ロボットに比べてパス間温度の上昇は低い。今回の実験結果のパス間温度は JASS6 に規定する 350℃を下回っている。

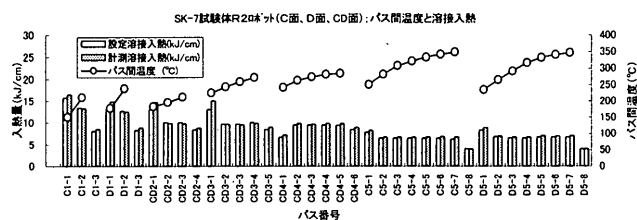
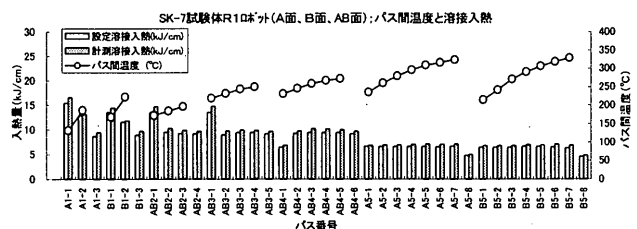
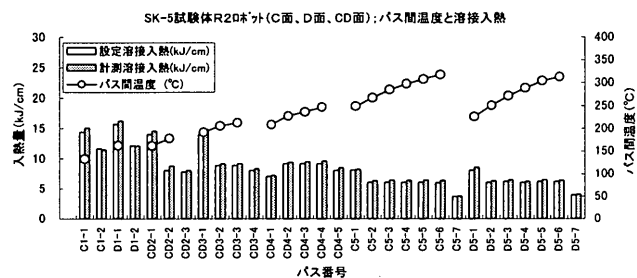
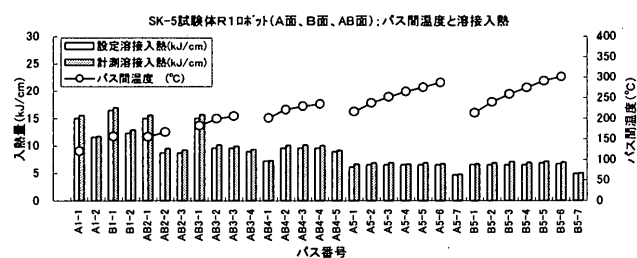


図 12 設定値に対する計測電圧値と計測電流値

表 5 電圧・電流・速度・入熱量の結果

試験体番号	溶接層	パス数	電圧値 (V)		電流値 (A)		溶接速度 (cm/min)		入熱量 (kJ/cm)	
			設定値		計測値		設定値		計測値	
			最小～最大	最小～最大	最小～最大	最小～最大	最小～最大	最小～最大	最小～最大	最小～最大
SK4	初層	2	26～31	23.4～29.3	165～200	165～295	24～40	22.3～36.0	10.1～15.0	10.4～15.7
	2層	3	26～31	22.9～28.6	160～200	160～304	31～40	27.3～35.2	7.6～14.1	8.3～14.7
	3層	4	26～31	23.0～29.4	165～200	163～306	31～40	27.3～34.8	7.4～13.5	7.8～14.7
	4層	5	26～27	22.9～23.9	155～200	154～203	31～46	26.7～38.6	5.3～9.9	5.7～10.1
	5層	7	23～27	20.8～24.4	120～200	118～204	35～47	29.1～39.1	3.5～7.0	3.8～7.5
SK5	初層	2	27～31	24.1～29.3	180～200	167～298	24～36	20.4～31.7	11.4～17.0	11.5～16.4
	2層	3	26～31	24.1～29.3	170～290	163～290	33～36	27.2～32.1	7.8～15.0	8.0～15.6
	3層	4	26～31	23.5～29.0	170～290	169～289	31～36	26.2～31.7	8.0～15.0	8.3～15.7
	4層	5	26～27	23.1～24.0	155～200	165～195	29～41	25.2～36.8	7.0～9.6	7.2～10.2
	5層	7	23～27	20.7～24.1	120～200	115～199	34～46	29.1～40.0	3.7～8.1	3.7～8.2
SK6	初層	2	26～31	23.5～29.5	170～290	168～295	24～40	22.3～34.6	10.6～14.0	11.1～14.6
	2層	4	26～31	23.4～29.3	170～290	163～287	33～40	28.0～34.8	8.1～13.5	8.3～14.5
	3層	5	26～31	23.2～29.3	170～290	165～289	33～40	27.7～34.8	7.6～13.5	8.4～14.6
	4層	6	26～27	23.3～24.2	170～190	163～188	33～45	27.6～39.8	5.9～9.0	5.9～9.5
	5層	8	23～27	21.0～24.6	120～195	112～195	34～47	29.2～40.0	3.7～6.8	3.7～7.0
SK7	初層	3	26～31	23.2～28.9	180～200	175～302	21～40	18.6～35.4	8.9～15.8	8.5～16.6
	2層	4	26～31	23.3～28.9	180～200	174～295	29～40	25.9～34.3	8.3～13.5	8.7～14.7
	3層	5	26～31	23.3～28.6	180～200	176～299	29～40	25.9～34.6	8.5～13.5	9.0～14.8
	4層	6	26～27	23.2～24.1	175～200	172～201	30～46	25.8～39.0	6.4～9.5	6.9～10.2
	5層	8	23～27	20.7～24.1	130～200	122～102	34～46	29.1～40.0	4.0～8.2	4.0～8.9

表 6 中断時間とパス間温度の結果

試験体 番号	溶接 層	パス 数	単位: 時間(min)、温度(℃)					
			R1ロボット		R2ロボット			
			中断時間	パス間温度	中断時間	パス間温度		
SK4 #1	初層	先行面	2	0.0	127.5	0.0	132.9	
		後行面	2	20.6	161.6	20.1	159.3	
	5層	4層	5	5.8	238.4	5.0	235.2	
		先行面	7	9.1	301.0	9.1	323.3	
		後行面	7	0.6	299.9	0.6	298.6	
SK5	初層	先行面	2	0.0	120.2	0.0	132.6	
		後行面	2	25.3	156.1	25.2	162.0	
		2層	3	4.1	166.9	3.9	177.3	
		3層	4	12.1	205.6	11.9	211.8	
	5層	4層	5	6.8	234.9	6.7	246.9	
		先行面	7	7.6	287.2	7.7	317.7	
			後行面	7	0.9	300.8	0.9	312.5
		初層	先行面	2	0.0	120.1	0.0	122.4
後行面	2		34.4	151.7	34.4	160.7		
SK6 #2	2層		4層	4	9.4	171.2	9.4	169.4
			3層	5	5.0	229.0	5.0	231.7
		4層	6	6.8	260.7	6.8	258.1	
	5層	先行面	8	14.1	291.5	14.1	265.6	
		後行面	8	2.4	305.6			
	SK7	初層	先行面	3	0	185.2	0.0	211.3
			後行面	3	27.5	221.7	27.1	238.9
			2層	4	6.4	196.2	6.4	212.1
3層		5	4.9	249.5	4.9	271.5		
		4層	6	9.8	271.5	9.8	284.5	
		5層	先行面	8	13.1	323.7	13.0	348.8
後行面	8		1.4	328.2	1.4	346.2		

注: *1: 2層、3層削除 *2: 先行面と後行面の連続溶接

3.6 パス間温度管理に関する検討

3.6.1 パス間温度管理の概要

パス間温度の上昇に対する主なパラメータは、入熱量(電圧値、電流値、溶接速度)、溶接長、溶接中断時間である。溶接ロボットは被溶接部材の種類、板厚、開先角度、ルートギャップなどの条件に応じて入熱量を設定している。従って溶接長は溶接作業時に設定されるために、パス間温度管理を行うための実用的なパラメータは溶接中断時間である。

溶接ロボットは層毎に中断できる機能を持ち、層毎の溶接中断時間を制御してパス間温度を管理する。

3.6.2 パス間温度の推定式

ロボット溶接の熱履歴は、図 10 と図 12 に示すように断続的となるために、パス間温度は、ロボット溶接によって生ずる上昇温度(A)と、ロボット溶接の中断によって変化する変化温度(B)に分けて捉える。

上昇温度(A)は溶接する層の初期温度とパス間温度の差とし、このパス間温度は各層の最終パスの温度とする。

変化温度(B)は溶接する層の初期温度と前層初期温度の差とする。

求める層のパス間温度はその層の上昇温度と累積した変化温度

の和となる。

図7の溶接手順では、初層および仕上層は2分割に溶接するために、初層の先行面を0層、後行面を1層、仕上層の先行面をN層、後行面をN+1層と表記し、本溶接ロボット適用する被溶接部の板厚に対する層数(N)と各層のパス数(P)を表7に示す。パス間温度の推定式を初層、中間層と仕上げ層に分けて以下に示し、また図13に示す。

(1) 初層のパス間温度(PT)

先行面上昇温度は A_0 、変化温度を初期温度の B_0 として先行面のパス間温度は次式から求める。

$$PT_0 = A_0 + B_0$$

後行面上昇温度を A_1 、変化温度を B_1 とし、後行面のパス間温度は次式から求める。

$$PT_1 = A_1 + B_1 + B_0$$

(2) 中間層のパス間温度(PT)

中間層は2層からN-1層までであるから、各層の上昇温度を A_i ($i=2:N-1$)、変化温度を $\Sigma B_i + B_0$ ($i=2:N-1$)として次式から求める。

$$PT_i = A_i + \Sigma B_i + B_0$$

(3) 仕上げ層のパス間温度(PT)

先行面上昇温度を A_i ($i=N$)とし、変化温度を $\Sigma B_i + B_0$ ($i=2:N$)として次式から求める。

$$PT_N = A_N + \Sigma B_i + B_0$$

後行面上昇温度を A_i ($i=N+1$)、変化温度を $\Sigma B_i + B_0$ ($i=2:N+1$)として次式から求める。

$$PT_{N+1} = A_{N+1} + \Sigma B_i + B_0$$

3.6.2 重回帰式

(1) 目的変数

ロボット溶接により上昇する上昇温度(A)とロボット溶接の中断によって変化する変化温度(B)は熱的に異なる現象である。このためにパス間温度(PT)を直接に目的関数として、扱うことは困難であり、目的変数は上昇温度(A)と変化温度(B)に分ける。

(2) 説明変数

溶接時の鋼材温度変化の要因は、層数、パス数、電圧値、電流値、溶接速度、中断時間、熱伝導、熱伝達および熱放射があげられるが、説明変数として膨大なデータ量となる電圧値、電流値、溶接速度を入熱量に置き換え、層の入熱量は層のパス入熱量の和とした。

熱伝導率、熱伝達率および熱放射率の影響に関してはこれらを個々に評価することは困難なため、先行溶接部から鋼材に沿っての熱移動を考慮して、パス間温度を計測する温度センサー間距離(以下、センサー間距離と記す)を説明変数とした。センサー間距離(L)は、図7の溶接手順に示す角形鋼管の1辺の寸法をD(cm)とすると表8の値となる。本論文の試験体では、Dが50cmであるので、センサー間距離は表9に示す値となる。

(3) 重回帰分析の要領

重回帰分析はR1ロボットとR2ロボットの個体間の性能差があることを考慮して、実験データを基に行い、更に重回帰分析は初層、中間層、仕上げ層に分けて行う。

上昇温度(N)の説明変数は、層数(N)、パス数(P)、入熱量(E)、センサー間距離(L)とする。

変化温度(B)の説明変数は、層数(N)、パス数(P)、入熱

表7 板厚に対する層数(N)と各層のパス数(P)

板厚 (mm)	層数 (N)	パス数(P)														総パス 数 (ΣP)		
		中間層												仕上層				
		0層	1層	2層	3層	4層	5層	6層	7層	8層	9層	10層	11層		12層		13層	14層
19	4	2	2	3	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	6	15
22	5	2	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	6	20
25	5	2	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	7	21
28	6	2	2	3	4	5	6	—	—	—	—	—	—	—	—	7	7	27
32	6	2	2	3	4	5	6	—	—	—	—	—	—	—	—	8	8	28
36	7	2	2	3	4	5	6	7	—	—	—	—	—	—	—	9	9	36
40	7	2	2	3	4	5	6	7	—	—	—	—	—	—	—	10	10	37
45	8	2	2	3	4	5	6	7	8	—	—	—	—	—	—	11	11	46
50	9	2	2	3	4	5	6	7	8	9	—	—	—	—	—	12	12	56
55	10	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	—	—	—	—	13	13	67
60	11	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	—	—	—	15	15	80
65	12	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	—	—	16	16	93
70	13	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	—	17	17	107
75	14	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	18	18	122
80	15	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	19	138

注:ルートギャップ9mmのケース、総パス数に0層と1層は外してある

表8 角形鋼管のセンサー間距離L (cm)

溶接層	初層		中間層			仕上げ層	
	先行面 0層	後行面 1層	2層	3層	4層	先行面 N層	後行面 N+1層
上昇温度	0	D	D/2	0	0	D/2	D
変化温度	D	D/2	0	0	D/2	D	D

表9 本論文におけるセンサー間距離L (cm)

溶接層	初層		中間層			仕上げ層	
	先行面 0層	後行面 1層	2層	3層	4層	先行面 N層	後行面 N+1層
上昇温度	0	50	25	0	0	25	50
変化温度	50	25	0	0	25	50	50

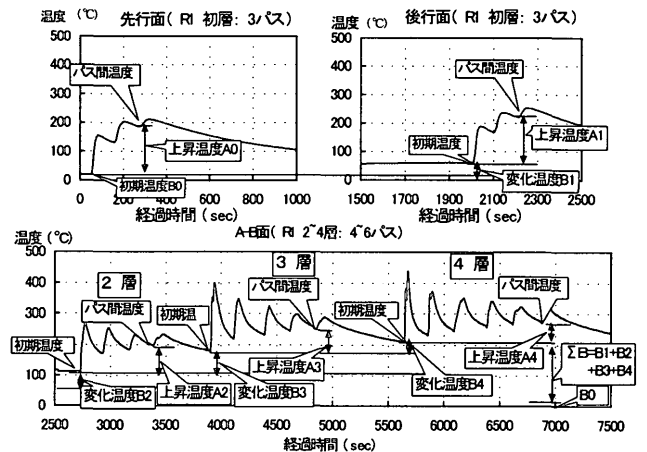


図13 上昇温度と変化温度

表10 上昇温度の重回帰式

機種	層	重回帰式	重相関係数	寄与率 R^2	残差標準偏差
R1ロボット	初層	$-14.328+47.984 \cdot P+0.974 \cdot E-0.041 \cdot L$	0.996	0.993	3.015
	中間層	$119.731-17.157 \cdot N+2.146 \cdot P-0.025 \cdot E-0.452 \cdot L$	0.964	0.930	3.315
	仕上げ層	$-42.423-31.249 \cdot P+7.069 \cdot E+1.415 \cdot L$	0.979	0.958	5.278
R2ロボット	初層	$-33.411+43.438 \cdot P+2.473 \cdot E-0.097 \cdot L$	0.993	0.985	5.552
	中間層	$72.686-8.068 \cdot N-10.909 \cdot P+1.846 \cdot E+0.234 \cdot L$	0.961	0.923	5.058
	仕上げ層	$61.78-7.714 \cdot P+1.746 \cdot E+1.124 \cdot L$	0.978	0.956	6.954

N:層数、P:パス数、E:設定入熱量(kJ/cm)、L:温度センサー間距離(cm)

表11 変化温度の重回帰式

機種	層	重回帰式	重相関係数	寄与率 R^2	残差標準偏差
R1ロボット	初層	$30.058+12.717 \cdot P-0.521 \cdot E-0.511 \cdot T+0.131 \cdot L$	0.992	0.993	2.397
	中間層	$105.52-14.859 \cdot N-2.74 \cdot P+0.476 \cdot E-3.824 \cdot T+0.083 \cdot L$	0.993	0.986	3.874
	仕上げ層	$43.232-13.255 \cdot P+0.502 \cdot E+5.229 \cdot T$	0.986	0.972	7.163
R2ロボット	初層	$31.227-4.416 \cdot P+0.912 \cdot E-0.476 \cdot T+0.058 \cdot L$	0.997	0.995	2.006
	中間層	$117.82-14.626 \cdot N-3.091 \cdot P+0.19 \cdot E-3.49 \cdot T+0.097 \cdot L$	0.997	0.994	2.661
	仕上げ層	$43.232-13.255 \cdot P+0.502 \cdot E+5.229 \cdot T$	0.981	0.962	8.910

N:層数、P:パス数、E:設定入熱量(kJ/cm)、L:温度センサー間距離(cm)、T:中断時間(min)

量 (E)、センサー間距離 (L)、中断時間(T)とする。

(4) 重回帰分析の結果

重回帰分析により求めた上昇温度 (N) の重回帰式を表 10 に示し、変化温度 (B) の重回帰式を表 11 に示す。

R1 ロボットの目的変数と説明変数の関係について、上昇温度 (A) とパス数 (P) の関係を図 14 に、上昇温度 (A) と入熱量 (E) の関係を図 15 に、上昇温度 (A) とセンサー間距離 (L) の関係を図 16 に示す。

図 14 と図 15 の中間層の関係図は、2 層、3 層、4 層に分けて示し、2 層の上昇温度変化は大きいために重回帰に対して影響はあることが推定されるが、多層になるとこの影響は減少すると考えられる。

層数 (N) とパス数 (P) の説明変数同士の関係を図 17 に示し、図 17 は、層数 (N) とパス数 (P) の間に強い相関性があることを示し、重回帰解析において両者のどちらかを外すことが可能となるが、本論文では層数 (N) とパス数 (P) 共に説明変数に使用している。

各説明変数の変動範囲を表 12 に示す。

いずれの重回帰式もそれぞれ重相関係数が最低で 0.961、0.981 と高い相関性を示した。

3.6.4 重回帰式によるパス間温度の推定値

各試験体の層数、パス数、入熱量、中断時間、センサー間の距離を説明変数として、表 10 および表 11 の重回帰式を使って算出したパス間温度の推定値、計測値、推定値と計測値の差を表 13 に示す。推定値と計測値の差が 10℃を越えるケースが 5 層目で 3 例あるが、最大の 12.8℃でも計測値の約 4%であり、推定値と計測値は全体としてほぼ一致している。SK7 試験体 R1 ロボットのパス間温度の推定値をグラフ上の口の中に記載して図 18 に示す。

3.6.5 パス間温度管理要領

初層と仕上げ層は先行面と後行面の毎に、中間層は各層毎に、それらの最終パス間温度を JASS6 の規定値である 350℃以下にするために中断時間をパラメータとして管理する。中断時間の初期値を T_0 とし、パス間温度を修正する場合、修正時間を ΔT とする。パス間温度の管理フローを図 19 に示す。

従ってロボット溶接作業においてパス間温度管理を行うために実用的パラメータは溶接の中断時間である。今回の実験では溶接ロボットは初層と仕上げ層は先行面と後行面の毎に、中間層は各層毎に溶接を中断できる機能となっており、これらの中断に溶接中断時間を設定してパス間温度管理を行う。

4. まとめ

柱現場溶接ロボットの熱履歴管理において、今回の実験結果から以下の点が明らかになった。

- 1) 電圧・電流値の変動に伴うワイヤ送給量とワイヤ溶着量のバランスの崩れを防止し、また定電圧の出力特性を維持するために、2 次ケーブルは最小長さの 10m にすることが適切である。
- 2) 入熱量の設定値と計測値はほぼ一致するため、入熱量の管理

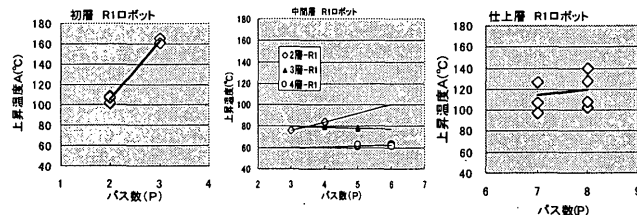


図 14 上昇温度 (A) とパス数 (P) 関係

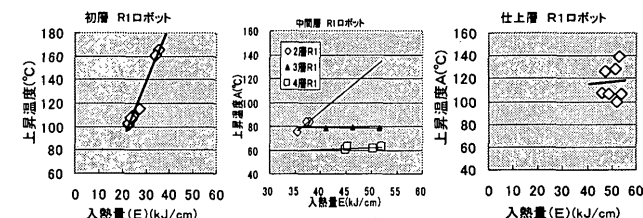


図 15 上昇温度 (A) と入熱量 (E)

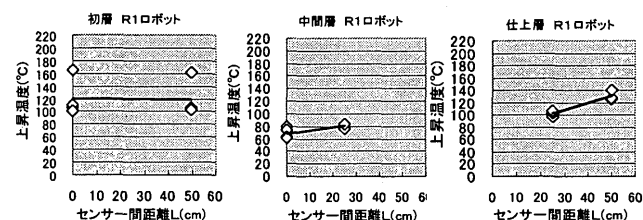


図 16 上昇温度 (A) とセンサー間距離 (L)

表 12 各説明変数の変動範囲

説明変数	項目	単位	変動範囲	
			最小値	最大値
層数 (N)	—	—	3	18
パス数 (P)	—	—	15	138
入熱エネルギー (E)	kJ/cm	—	3.5	17.0
センサー距離 (L)	cm	—	50	80
中断時間	分	—	0	34.4

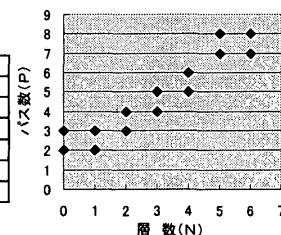


図 17 パス数と層数

表 13 パス間温度の推定値、計測値、推定値と計測値の差

試験体 番号	溶接 層	パス 数	R1ロボット			温度(℃)			R2ロボット
			R1ロボット			温度(℃)			
			回帰式値	計測値	差	回帰式値	計測値	差	
SK4 #1	初層	先行面	2	125.0	127.5	-2.5	133.9	132.9	1.0
		後行面	2	166.0	161.6	4.4	161.0	159.3	1.7
	4層	先行面	5	236.7	238.4	-1.7	236.3	235.2	1.1
		後行面	7	299.2	301.0	-1.8	323.2	323.3	-0.1
	5層	先行面	7	306.6	299.9	6.7	302.2	298.6	3.6
		後行面	7	306.6	299.9	6.7	302.2	298.6	3.6
SK5	初層	先行面	2	118.2	120.2	-2.0	128.5	132.6	-4.1
		後行面	2	153.8	156.1	-2.3	164.5	162.0	2.5
	2層	先行面	3	168.2	166.9	1.3	179.9	177.3	2.6
		後行面	4	200.9	205.6	-4.7	215.7	211.8	3.9
	3層	先行面	5	230.5	234.9	-4.4	247.3	246.9	0.4
		後行面	7	278.9	287.2	-8.3	319.5	317.7	1.8
	5層	先行面	7	302.1	300.8	1.3	325.3	312.5	12.8
		後行面	7	302.1	300.8	1.3	325.3	312.5	12.8
SK6 #2	初層	先行面	2	124.4	120.1	4.3	128.3	122.4	5.9
		後行面	2	154.8	151.7	3.1	153.2	160.7	-7.5
	2層	先行面	4	172.6	171.2	1.4	173.6	169.4	4.2
		後行面	5	233.3	229.0	4.3	229.1	231.7	-2.6
	4層	先行面	6	263.1	260.7	2.4	256.7	258.1	-1.4
		後行面	8	298.2	291.5	6.7	271.3	265.6	5.7
	5層	先行面	8	304.7	305.6	-0.9			
	SK7	初層	先行面	3	185.2	185.2	0.0	208.9	211.3
後行面			3	223.1	221.7	0.9	240.6	238.9	1.7
2層		先行面	4	193.1	196.2	-2.3	205.4	212.1	-6.7
		後行面	5	256.8	249.5	6.8	266.8	271.5	-4.7
4層		先行面	6	275.6	271.5	4.1	284.2	284.5	-0.3
		後行面	8	324.9	323.7	1.2	338.8	348.8	-10.0
5層		先行面	8	325.3	328.2	-2.9	336.0	346.2	-10.2
		後行面	8	325.3	328.2	-2.9	336.0	346.2	-10.2

注: *1: 2 層、3 層削除 *2: 先行面と後行面の連続溶接

は溶接作業前に行うことができる。

3) 使用する溶接ロボットに対して、初層および仕上げ層では先行面と後行面、中間層では層毎に、中断時間をパラメータとした変化温度と、上昇温度に関して求めた重回帰式により、パス間温度を高い精度で推定することができる。この場合、熱伝導、熱伝達および熱放射の影響については、パス間温度を計測する温度センサー間の距離を代用特性として説明変数に用いることで良い結果が得られた。

今回の実験では、板厚 25mm のボックス柱を使ったが、パス間温度の推定式の精度を高めるために、種々の条件の柱についてのデータを蓄積していくことが必要である。

謝辞：柱現場溶接ロボットの実験において、ロボットメカの日立造船㈱、ファブリケータの坂本工業㈱の方々に協力を得たことを感謝します。

参考文献

- 1) 西多致、他8名：「柱現場溶接ロボットの適用」日本建築学会技術報告集，第8号，pp.41～46，1999. 6
- 2) 西多致他 3 名：「柱現場溶接ロボットの開発と適用」(財)先端建設技術センター、日本機械化協会、土木学会、日本建築学会、日本ロボット工業会，第8回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.45～52，2000. 7
- 3) 西多致：「柱現場溶接ロボット作業における溶接収縮と裏当て金の最適さきまに関する研究」日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp.31～37，2002. 9
- 4) 中込忠男、市川祐一他3名：「様々な溶接条件で施工された溶接金属の機械的性質に関する実験的研究その1～3」日本建築学会大会梗概集，pp.589～594 2000. 9
- 5) 倉持貢、加賀美安男：「建築鉄骨のMAG溶接に於ける入熱量とパス間温度の設定方法について」日本建築学会大会梗概集，pp.587～588，2000. 9
- 6) 西山功、池ヶ谷靖：「鉄骨現場溶接における溶接作業の実際と新しい溶接管理ツール」鉄鋼技術(STRUTEC)，pp.43～48，2001. 6
- 7) 中込忠男、細井宏一：「建築鉄骨における溶接施工管理パス間温度管理ツールの比較検討」鉄鋼技術(STRUTEC)，pp.24～31，2001. 8
- 8) 中込忠男、西山功他4名「入熱・パス間温度の推定に関する実験的研究その1～3」日本建築学会大会梗概集，pp.729～734，2001. 9

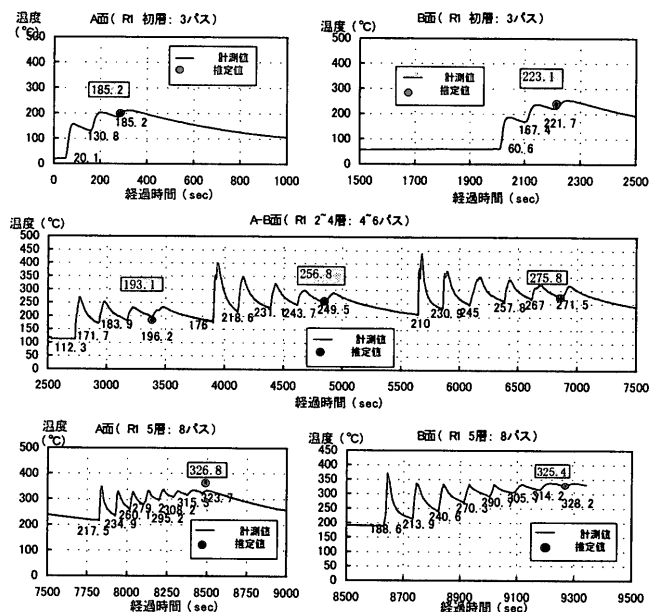


図 18 SK7 のパス間温度の計測値と推定値

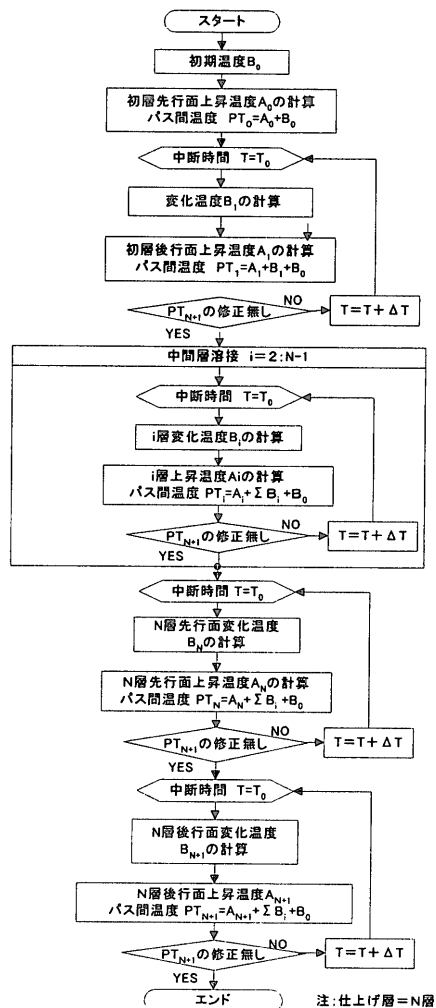


図 19 パス間温度管理フロー

(2002年12月10日原稿受理，2003年 9 月 2 日採用決定)