

塗膜の裏焼けを防ぐ低入熱溶接施工法

日立造船株式会社 技術開発本部 技術研究所
中谷 光 良, 佐々木 要 輔
同 機械・インフラ本部 社会インフラ事業部
東谷 修, 山田 元 紘

1. はじめに

製鉄所や発電所は沿岸部に建設されることが多く、敷地内の鋼製煙突および排気筒の筒身は海塩粒子の影響により腐食する場合がある。腐食減肉が進むと、板厚不足による強度低下のために筒身が座屈したり、開孔し排煙が噴出したりし、非常に危険である。そこで、点検時に減肉部や開孔部が見つかり、当板による補修溶接が一般的に行われている。従来、煙突筒身の当板補修溶接は、高所作業であることから、足場やゴンドラ設備を設置したうえで、人による施工が行われてきた。筒身内面には腐食防止のために塗装やライニングが施工されているが、入熱管理無しで施工すると、裏面温度は塗膜やライニングの耐熱温度以上となってしまい焼けてしまう。この場合、筒身内面からの再塗装や再ライニングの補修作業が必要となるが、足場やゴンドラの設置をとめない、多大な労力とコストを要する。また、内部に人が入ることのできない原子力発電所排気筒などでは、筒身内面からの補修作業は実質不可能となっている。

そこで、筒身外面から溶接施工しても、溶接部裏面の塗膜が損傷しないような溶接手法を開発した。具体的には、できるだけ低入熱とするために、低電圧の溶接電源を用い、ロボットにより高速で溶接するものとした。また、現地の施工環境（屋外・高所）を考慮して、耐風ノズルを開発し、10m/sまでの強風下においても施工可能とした。さらに、溶接中は表面温度を測定し、適正入熱で施工できているかを監視するシステムを開発した。溶接部については、継手強度が十分あること、裏面塗膜が健全であることを確認した。実証試験として、製鉄所内の鋼製煙突の補修溶接の実工事に本手法を適用し、その効果を確認した。

2. 低入熱溶接システム

2.1 装置構成

低入熱化の原理としては、高速溶接と低電圧溶接電源の採用であり、その実現のために現場に適用できる軽量で小型の多関節ロボットと低電圧のマグ溶接電源を採用した。溶接システムの外観および装置構成を図 2.1 および図 2.2 に示す。本研究で用いた溶接システムは、デジタルインバータ制御式低スパッタマグ溶接機、小型アーク溶接ロボット、耐風ノズル、大流量対応ガスゲージ、小型熱画像センサから構成される。ロボットの使用により溶接速度を 100cm/min 程度とし、さらに通常の溶接電源を用いた場合に比べ約 80%の低電圧とすることで、1 パスあたりの入熱量を小さくし、裏面塗膜の損傷を防止している。用いた溶接ロボットは本体質量が 31kg と軽量であり、なおかつ出力が 80W 以下となっており、周囲に安全柵の設置が不要となっている。溶接ワイヤは、低電流域に適した低スパッタの炭素鋼用ソリッドワイヤを用い、シールドガスは、混合ガス (Ar80%CO₂20%) を使用してい

る。

ロボットのトーチ先端には図 2.3 に示すような耐風ノズルを搭載している。煙突のような高所では、地表付近に比べ風速が高く、通常のマグ溶接では、大気が混入して良好な溶接を行うことができないが、耐風ノズルを使用することにより、最大 10m/s の強風下においても良好な溶接が可能となった。また、トーチ先端に小型の温度センサを取り付けており、図 2.4 に示すように、溶接中の表面温度分布をリアルタイムで測定することが可能である。これにより、パス間温度の管理や、塗膜の裏焼け防止のための裏面温度保証を行うことができる。さらに、ロボットを設置する台座は図 2.5 に示すように小径スタッドを介して筒身に固定する。スタッドボルトの溶接時間は 1 本につき約 0.5 秒であり、入熱量が低く塗膜の裏焼けは起こらないことを確認している。ロボットは、台座により煙突筒身に固定するため、風で筒身が多少振動した場合でも溶接が可能である。

本溶接手法では、事前に教示作業が必要であるが、タッチセンサの適用により、教示時間を短縮している。また、多パスで溶接するため、欠陥が出にくい積層溶接プログラムを開発している。これにより、一度の教示で、全パスのロボット溶接プログラムを作成することが可能となっている。



図 2.1 低入熱溶接システム

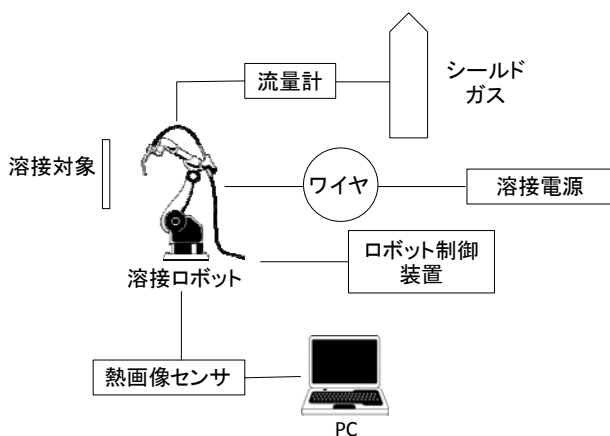


図 2.2 低入熱溶接システム装置構成



図 2.3 耐風トーチおよび温度センサ



図 2.4 ロボット台座固定方法

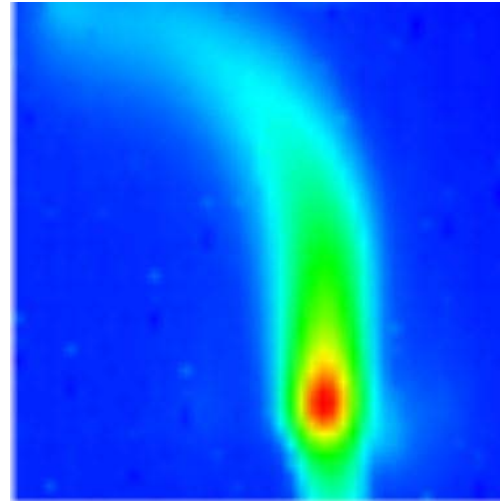


図 2.5 溶接中の表面温度画像

2.2 低入熱溶接施工法を用いた当板溶接補修

実験で用いた試験体を図 2.6 に示す。下板は 300mm×300mm×9mmt であり、重ね板は、150mm×150mm×9mmt である。鋼種は SS400 とし、重ね板の角部分は溶接性向上のため 50R としている。また、図 2.6 には溶接線を赤線で示しており、下向、立向、上向の姿勢で溶接を行う。試験体裏面には、煙突内面に実際に使用されている塗料のうち耐熱温度の低いタールエポキシ塗料を塗布して実験を行った。

本手法では、低入熱を実現するために多パスで溶接する必要がある、板厚 9mm の重ねすみ肉溶接の場合では 6~7 パスで施工する。6 パス施工の場合の溶接部のパス割を図 2.7 に示す。必要脚長は 6mm としており、それらを満たし、融合不良などの溶接欠陥が生じにくいようなパス割とした。溶接条件を表 2.1 に示す。各パスにおいて溶接条件は同一として、狙い位置のみを変えた。なお、本手法では、裏面塗膜を損傷しないために、仮付け溶接もロボットで行う。

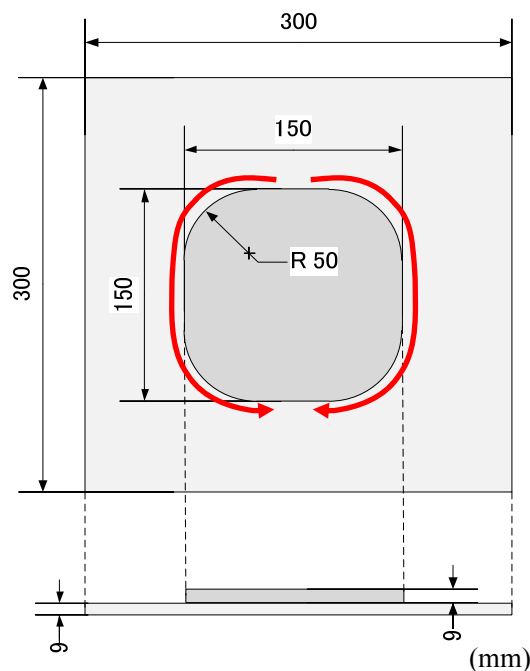


図 2.6 試験体寸法

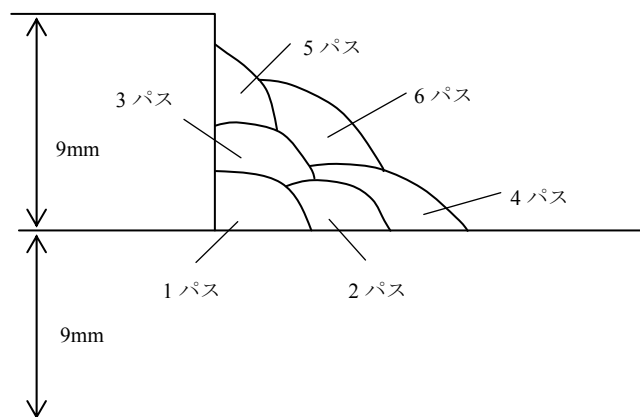


図 2.7 溶接パス割

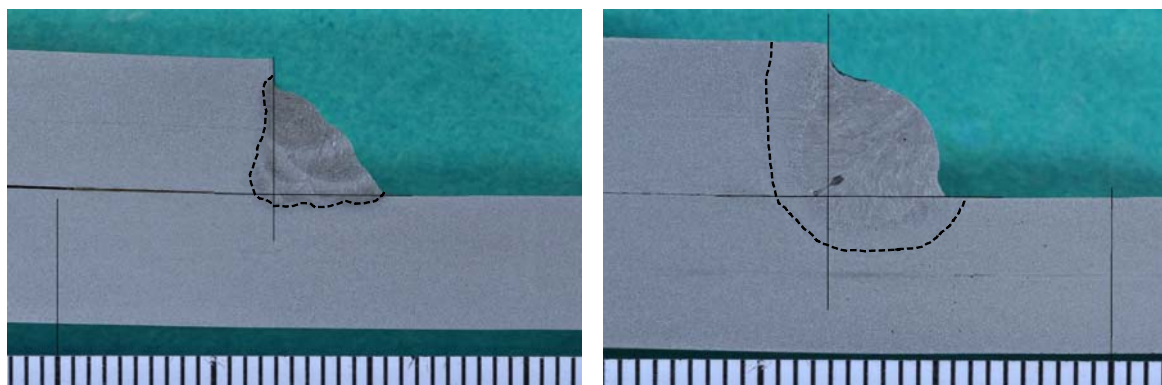
表 2.1 溶接条件

溶接電流 [A]	電圧 [V]	溶接速度 [cm/min]
160	16	100

3. 溶接および塗膜性能試験

3.1 溶接ビード断面

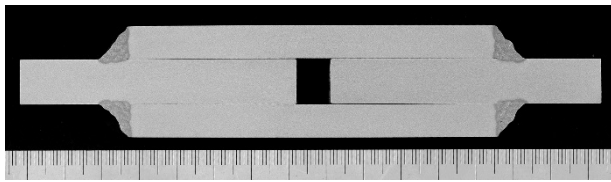
本手法を用いて6パスで施工した溶接部と従来手法（炭酸ガスアーク溶接）によって1パスで施工した溶接部の横断面マクロ組織試験結果を図3.1に示す。図中の実線が溶接前の母材境界、破線が溶接後の熱影響部の境界を示している。本手法で施工したビードは、溶込みが浅く、熱影響幅も非常に狭いことが分かる。ビード止端部もなめらかで応力集中が起こりにくい形状であるといえる。十分な継手強度を有していることを確認するため、図3.2に示す試験体を用いて引張試験（JIS Z 3131）を行った。結果を表3.1に示すが、本手法で施工した場合についても、母材破断となっており十分な強度が得られている。



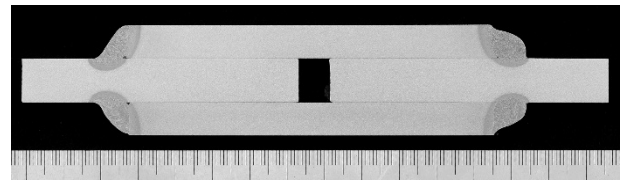
(a) 開発手法

(b) 従来手法（炭酸ガスアーク溶接）

図 3.1 断面マクロ試験結果



(a) 開発手法
6パス



(b) 従来手法(炭酸ガスアーク溶接)
1パス

図 3.2 引張試験体

表 3.1 引張試験結果

材料	試験体	引張強さ (MPa)	破断位置
SS400	開発手法	458	母材
	従来手法	447	母材

注：母材破断のため引張強さは母材断面積から算出した。

3.2 ビード外観

本手法を用いた溶接ビード外観を図 3.3 に、従来法による溶接ビード外観を図 3.4 に示す。図 3.3 は 6 パス、図 3.4 は 1 パスで施工している。両者を比較すると本手法を用いた場合、非常に良好なビード外観が得られていることが分かる。また、図 3.5 のように、角にアールをとっていない場合の溶接も可能であり、様々な形状の当板溶接補修に対応できる。



図 3.3 開発手法による溶接ビード外観



図 3.4 従来手法による溶接ビード外観
(アールあり)

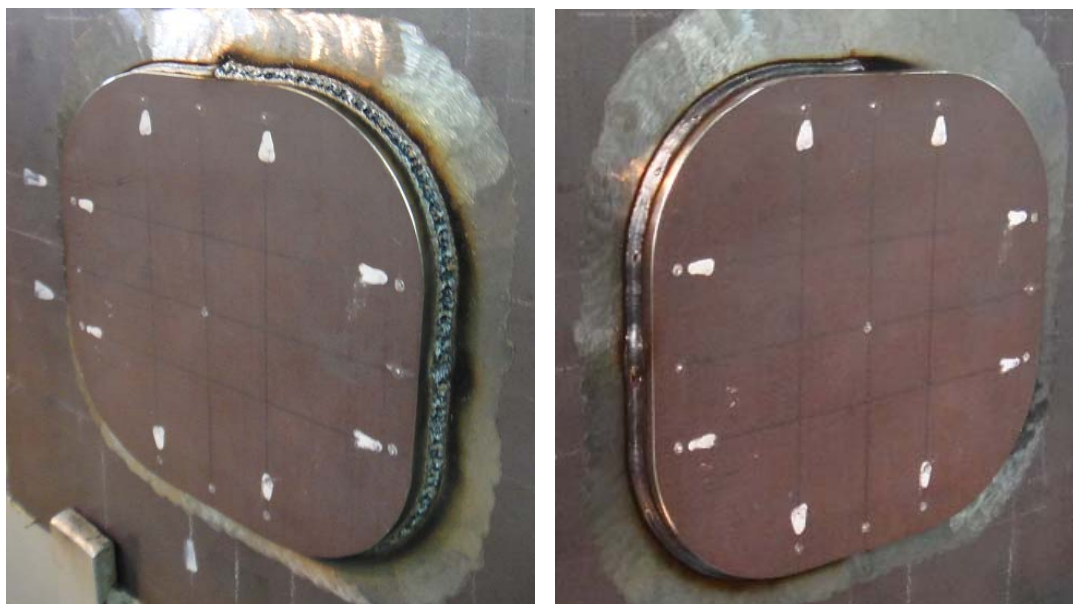


図 3.5 開発手法による溶接ビード外観
(アール無し)

3.3 耐風性能

本手法で用いる溶接ロボットのトーチ先端には、耐風ノズルを取り付けており、大流量のシールドガスを流すことにより、風の強い屋外での施工が可能となっている。本手法の耐風性能を確認するために、強風下での溶接実験を行った。屋内で送風機を用いて 7.5m/s の横風を吹かせた状態で当板溶接を行った。図 3.6 にその結果を示す。

耐風ノズル不使用（シールドガス流量 20l/min）の場合では、ブローホールが多数発生し、ビード外観も悪く、良好な溶接が行えていない。一方、耐風ノズルを使用（シールドガス流量を大流量化）した場合は、強風下にもかかわらず良好な溶接ができていることが分かる。なお、耐風ノズルを使用することにより、最大 10m/s の強風下でも、良好な溶接が可能であることを確認している。風速 10m/s は、現地での高所作業が中止となる基準値であり、耐風性能としては、十分であると考えられる。



(a) 従来ノズル

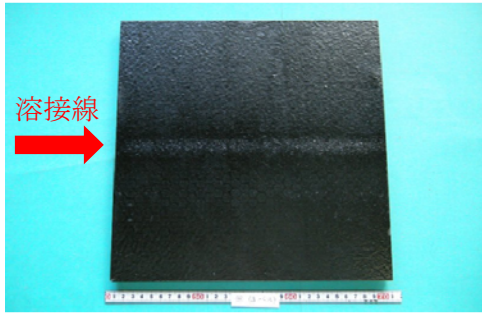
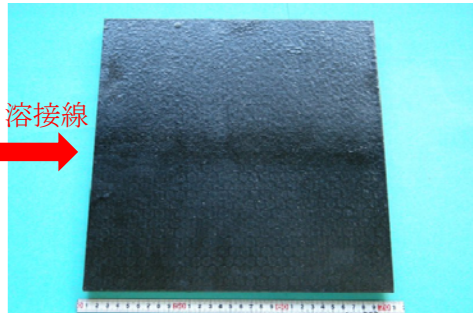
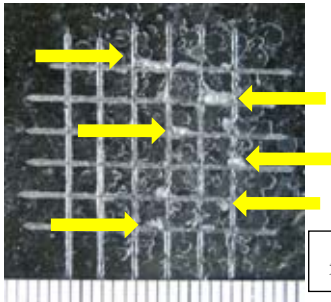
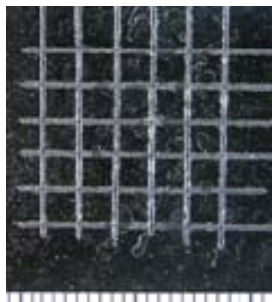
(b) 耐風ノズル

図 3.6 風速 7.5m/s の強風下で施工した溶接ビード外観

3.4 塗膜性能試験

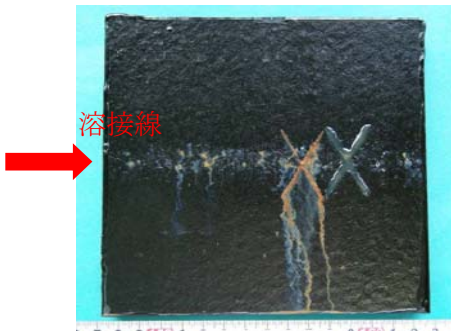
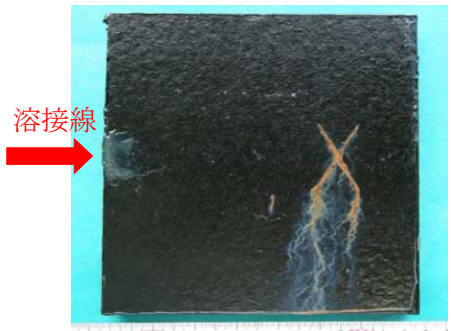

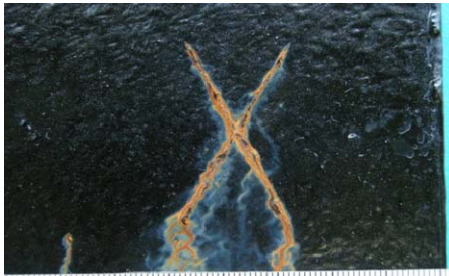
本手法により溶接施工した試験体に対して、塗膜性能試験を行った。タールエポキシ塗料により裏面塗装された板厚 9mm の試験体（SS400）に対して、溶接後の塗膜の付着性をクロスカット法（JIS K 5600-5-6）により確認した。クロスカット試験では、溶接部裏面の塗膜に対して間隔 3mm で直角の格子状の切込みを素地まで入れた。6 パスで施工した場合と 3 パスで施工した場合の比較結果を表 3.2 に示す。ここで、6 パス施工と 3 パス施工の脚長は、ともに 6mm と等しくした。3 パス施工では、1 パスあたりの入熱量が大きくなり、クロスカット試験を行うと、裏面塗膜が剥離しているのが分かる。6 パス施工の場合は、各パスの入熱量が低くなっており、裏面塗膜が損傷せず、剥離も確認されなかった。板厚 9mm の母材に対し 6 パス施工を行った本手法を用いた施工では、裏面塗膜の付着性に問題ないと言える。

表 3.2 クロスカット試験結果

	3 パス施工	6 パス施工 (低入熱溶接)
溶接ビード裏面		
クロスカット試験 (切込み間隔 3mm)		

次に、同様の溶接試験体に対して、塩水噴霧試験 (JIS Z 2371) を行い、裏面塗膜の耐食性を評価した。塩水噴霧試験は 50g/l の NaCl 水溶液 (pH6.5~7.2) で 240 時間実施した。6 パスで施工した場合と 3 パスで施工した場合を比較した結果を表 3.3 に示す。3 パス施工の場合は、入熱が大きいため、溶接線に沿って裏面塗膜が腐食し損傷しているのが分かる。一方、6 パス施工の場合は、溶接部裏面塗膜の腐食は確認できない。なお、母材には、腐食試験前に X 型の Cutter 傷を意図的につけており、その部分は腐食している。以上の結果より、板厚 9mm の母材に対し 6 パス施工を行った場合は、溶接後の裏面塗膜の耐食性に関しても問題ないと言える。裏面塗膜に影響を与えない溶接条件については、次章で述べる。

表 3.3 塩水噴霧試験

	3 パス施工	6 パス (低入熱溶接)
溶接部裏面側		
溶接部裏面 拡大図		

4. 裏面塗膜保証

4.1 裏面温度保証

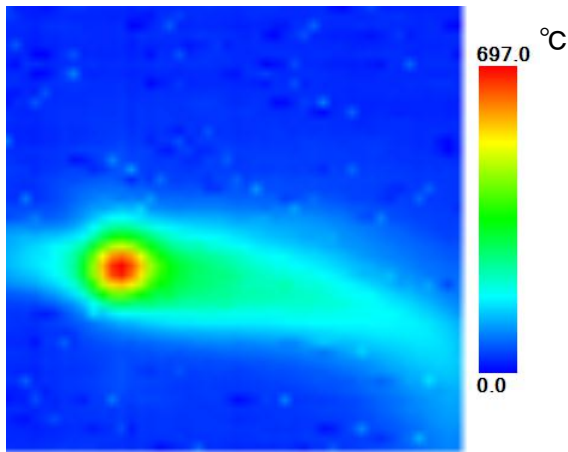
筒身の当板溶接では、通常溶接中の裏面塗膜の様子を見ることはできない。特に、原子力発電所の排気筒などでは、内部に入ることができないため、裏面塗膜の状態を確認できない。そのため、低入熱溶接法で施工する際には、裏面塗膜が損傷していないことを確認する手法が不可欠である。つまり、溶接中にリアルタイムで裏面温度を管理し、何らかの要因で入熱が過大になった時には、いったん、溶接を停止させるなどの対策が必要である。実際に施工中に裏面温度を管理するために、測定可能な項目として、溶接表面側の温度が考えられる。本研究では、溶接中の溶接部表面側の温度をリアルタイムで測定することにより、裏面塗膜の保証をおこなう。

4.2 表面温度測定方法

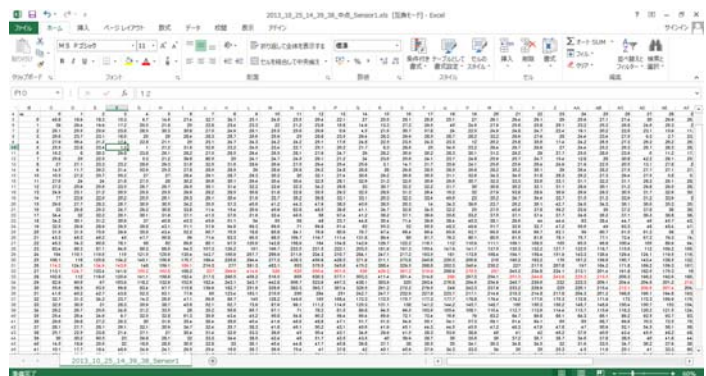
本システムでは、溶接部表面側の温度を測定するために溶接ロボットのトーチ先端に軽量・小型の熱画像センサを取り付けている。使用している熱画像センサの仕様を表 4.1 に示す。熱画像センサの視野は一辺が約 100mm の正方形であり、トーチ先端に搭載しているため、常に溶接個所に追従して温度データを測定することができる。熱画像センサから、図 4.1 に示すような溶接中の温度分布を画像データおよび各画素の温度のテキストデータを 1Hz のサンプリング速度で取得している。取得した温度データは、溶接中の温度管理、溶接後の施工記録に活用している。また、溶接トーチの位置を試験体から遠ざけることで、熱画像センサにより当板全体の温度を測定し、パス間温度の管理も行っている。

表 4.1 熱画像センサ仕様

温度測定範囲	100°C～800°C
フレームタイム	最大 3Hz
温度分解能	0.5°C(100°C 黒体において)
精度定格	測定値の±1%または±3°Cの大きい方
検出素子	2000 画素
測定波長	中心波長 10 μm
視野角	25° × 25°
空間分解能	9.1mrad
フォーカス	固定
重量	150g



(a) 画像データ

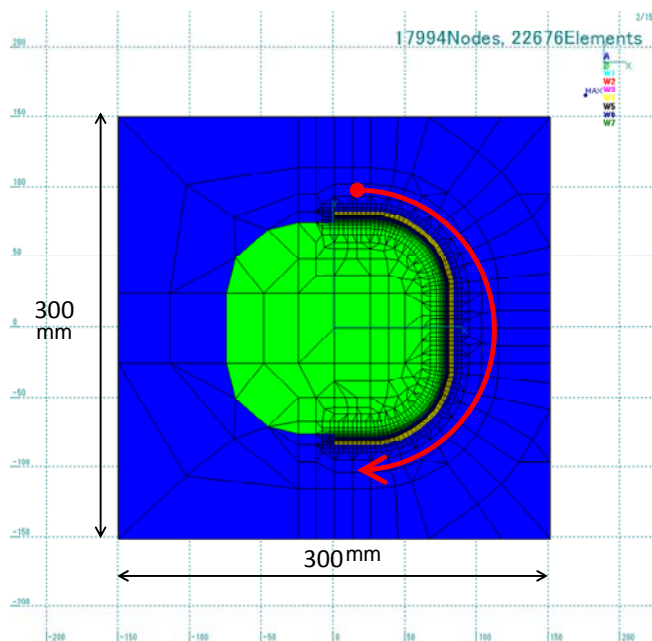


(b) テキストデータ (各画素の温度)

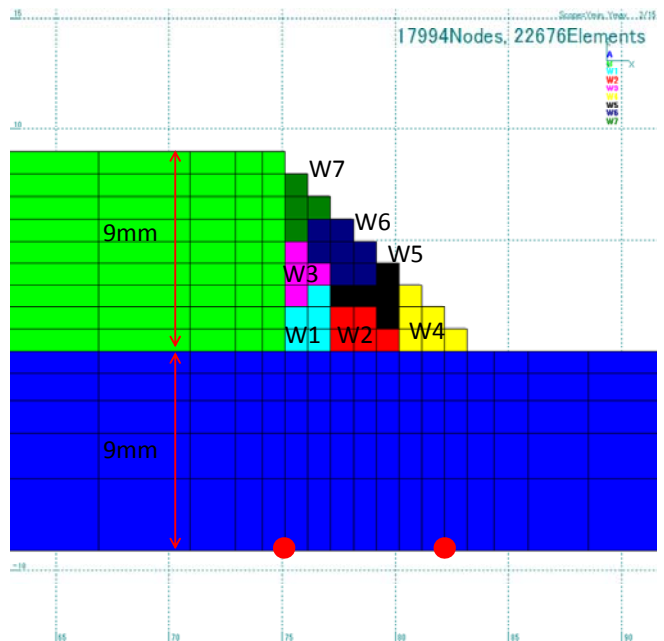
図 4.1 溶接中に熱画像センサから取得される温度データ (例)

4.3 裏面温度計測および熱伝導解析による裏面温度計算

溶接時の裏面温度履歴を調べるために熱電対を用いて温度測定実験を行った。温度測定箇所は溶接線の真裏、パス間温度 40°Cとした。前述までの施工は 6 パスであるが、ここでは、より塗膜が損傷しない条件である 7 パスで施工した。溶接条件としては、電流 160A、電圧 16V、溶接速度 100cm/min とした。さらに有限要素法による熱伝導解析を行い、同様の条件での裏面温度履歴を求めた。用いた解析モデルを図 4.2 に示す。(b)図中の W1~W7 は、溶接後のマクロ試験結果、ロボットの狙い位置から決めた溶接のパス順を示している。有限要素モデルは、実験で用いた試験体寸法と同じサイズとし、要素分割は、最小の部分で溶接方向に約 3mm、溶接断面では約 1mm とした。



(a) モデル全体



(b) 溶接パス割

図 4.2 熱伝導解析モデル

実験で得られた裏面温度履歴の実験結果と解析結果の比較を図 4.3 に示す。実験結果と解析結果を比較すると、最高到達温度に少し差があるが、パス毎の温度の傾向は概ね一致している。また、裏面の塗膜としてタールエポキシ塗料を使用しており、その耐熱温度は煙突内面に使用される塗料の中でも耐熱温度が低いものである。本条件で、溶接を行った試験体について、3 章に示した塗膜性能試験を行った。その結果、塗膜の剥離や耐食性の劣化は起こらず、本手法を用いて 7 パスで溶接した場合にも裏面塗膜に問題ないことが確認できた。実験結果と解析結果における各パスの 80℃以上を上昇している時間 T を表 4.2 に示す。実験結果の場合、T が 7 パス合計で 100 秒以下であれば、裏面塗膜は損傷しなかった。また、同じ溶接条件の解析結果は、200 秒となっている。つまり、解析結果の方が、時間が長く、解析結果で評価することにより、より安全に評価することになる。T は、板厚と入熱量により変化するため、板厚ごとに溶接条件を確立する必要がある。板厚ごとに同様の溶接実験、温度解析を行い、T をデータベース化することで、様々な条件に対応している。

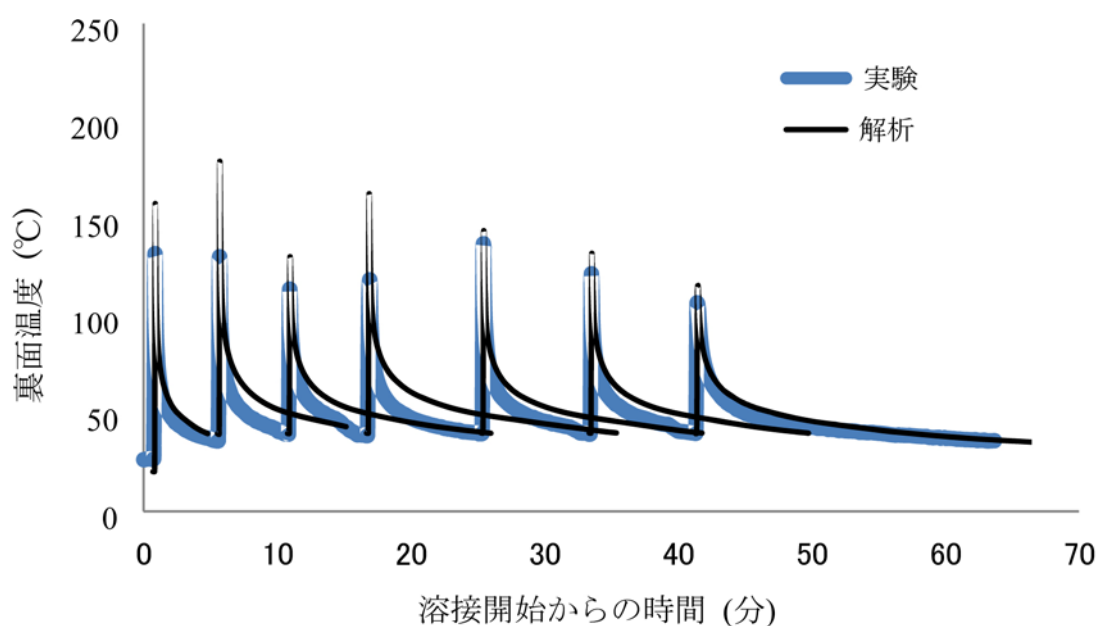


図 4.3 溶接裏面の温度履歴

表 4.2 80℃以上の時間

パス	1	2	3	4	5	6	7	合計
実験結果(秒)	10	10	10	15	15	15	25	100
解析結果(秒)	16	28	27	40	33	29	27	200

4.4 表面温度から裏面塗膜の判定方法

熱画像センサにより取得される溶接中の表面温度データから、入熱量が適切かどうかを判定する。図 4.4 に下板の板厚 9mm で重ね板の板厚 9mm の場合の重ねすみ肉溶接中の熱画像センサによる計測結果および解析結果を示す。具体的には、図 4.4 に示すように溶接中の表面温度データから、高温部 T_h (例えば、450℃) から低温部 T_l (例えば、250℃) までの長さ L を求め、各板厚に対して決めら

れた基準値 L_c と実際の長さ L を比較して、入熱量が適正かどうかを判定する。1Hz でその処理を行い、 L が L_c より大きくなると過大入熱と判定し、ロボットの制御装置に対して停止信号を送る仕組みとしている。実験と解析も併用して、 Th および Tl は板厚ごとに、 L_c はそれぞれの板厚に対するパスごとに決定している。様々な板厚や溶接条件に対応する Th 、 Tl 、 L_c のデータベースを搭載した溶接システムを開発した。

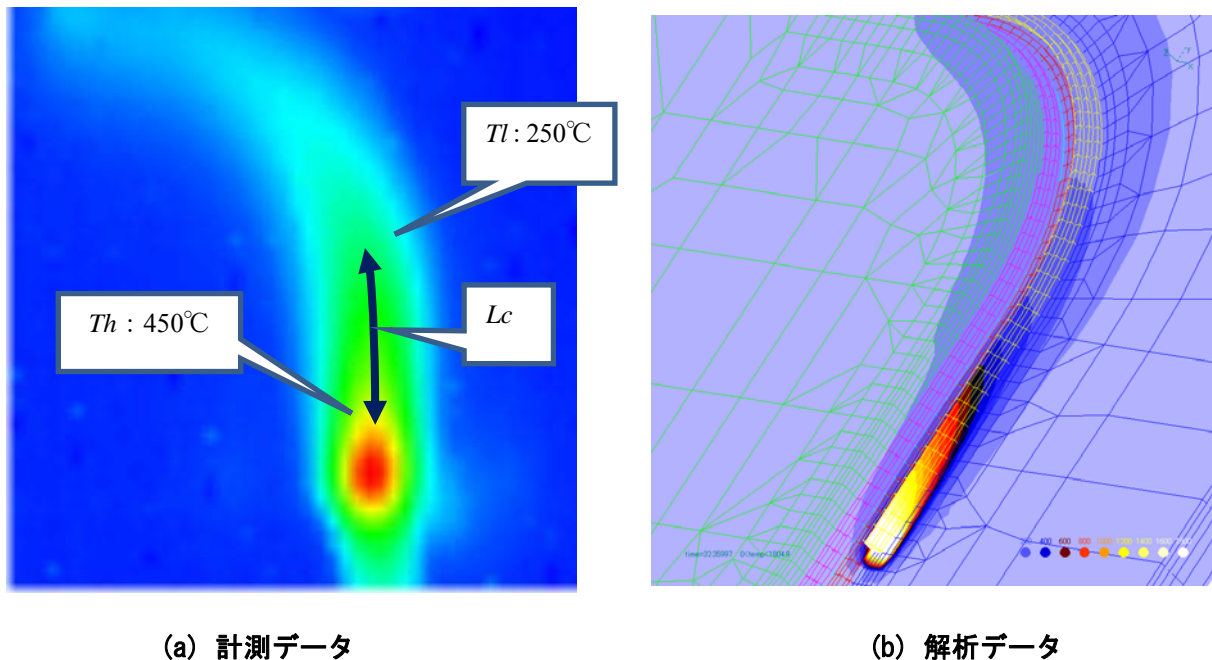


図 4.4 溶接中の温度分布

5. 実証実験

5.1 実証試験

火力発電所内の煙突の補修工事において、本開発手法を適用した。図 5.1 に当板溶接を行った煙突を示す。施工現場は地上 130m の高さの足場上であり、実証試験中に測定された風速は最大 6m/s であった。煙突には腐食減肉箇所があり、そのうちの 2 か所に本手法による当板溶接補修を行った。図 5.2 に当板溶接補修を行った箇所を示す。使用した当板は、 $300 \times 300 \times 12\text{mm}$ 、 $250 \times 250 \times 12\text{mm}$ 各 1 枚であり、角部は R50 とした。また、排気筒の筒身の板厚は 12mm で、6 パスでの溶接を行い、脚長 6mm を確保した。図 5.3 に示すように、ロボット台座はスタッドボルトにより固定し、当板を仮付けした後にロボットの教示作業を行った。



図 5.1 火力発電所内の煙突



図 5.2 当板溶接箇所

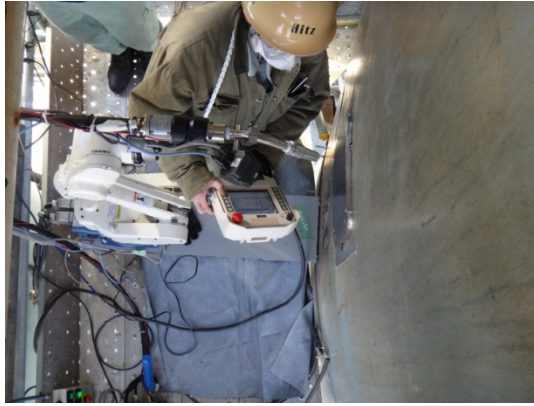


図 5.3 溶接ロボット教示作業

5.2 実証試験結果

ロボットによる当板溶接補修を行った結果を図 5.4 に、溶接ビードの拡大図を図 5.5 に示す。いずれの当板溶接補修部でも良好なビード外観が得られた。裏面の塗膜についても外観上、損傷は認められなかった。用いた溶接条件は、2 章で示した下板 9mm の場合と同様であるが、今回は筒身の板厚が 12mm であるため、裏面の塗膜に対してより安全な施工条件と言える。施工後、PT 検査に合格し、現場工事においても本手法を用いて良好な溶接が可能ということが示せた。



図 5.4 溶接ビード外観



図 5.5 溶接ビード拡大

6. おわりに

内面に塗膜が塗布された状態で外面から溶接施工して、裏面側の塗膜が損傷しない施工法を開発した。得られた成果を以下に示す。

- (1) 低電圧の溶接電源を用い、ロボットで高速で施工することにより、低入熱溶接を実現した。
- (2) 10m/s の強風下で施工可能な耐風ノズルを開発した。
- (3) 得られた継手の強度試験を行い、母材並みの静的強度を有することを確認した。
- (4) 低入熱溶接施工後の裏面塗膜の性能試験を実施し、付着性、耐食性に問題ないことを確認した。
- (5) 溶接中に溶接部表面側の温度を管理し、裏面塗膜が損傷していないことを確認するデータベースを開発した。
- (6) 電源、ロボット、耐風ノズル、温度センサを有し、上記のデータベースを搭載する低入熱溶接システムを開発した。

開発したシステムを現地適用し、有効であることを確認した。老朽化したインフラ・施設は年々増えてきており、本手法が望まれる箇所がさらに出てくると考えている。煙突、排気筒だけでなく、圧力容器、タンク、橋梁など、再塗装が困難な箇所に本手法を適用していく予定である。

<略歴>

中谷光良	1992年	大阪大学大学院 工学研究科 溶接工学専攻	修了
	1992年	日立造船株式会社 入社 技術研究所	配属
	2006年	博士(工学)	取得
	2011年	大阪大学接合科学研究所	特任准教授(在籍出向)
	2012年	技術研究所 機械・インフラ研究室 溶接グループ長	現在に至る
佐々木要輔	2012年	大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻	修了
	2012年	日立造船株式会社 入社 技術研究所	配属
	2014年	技術研究所 機械・インフラ研究室	研究員 現在に至る
東谷修	1991年	大阪大学 工学部 土木工学科	卒業
	1991年	日立造船株式会社入社	橋梁設計部 配属
	2009年	日立造船株式会社	鉄構エンジニアリング部
		構造設計課	課長 現在に至る
山田元紘	1999年	徳島大学大学院 工学研究科 建設工学	修了
	1999年	株式会社エイチイーシー入社	鉄構建設部 配属
	2010年	日立造船株式会社	鉄構エンジニアリング部 構造設計課 課長代理 現在に至る