耐火被覆吹付け作業の自動化に関する基礎実験

瀬　川　紘　史　　坂　上　　肇
池　田　雄　一

Basic Test for Automated Spraying Process for Fire Protection

Hirofumi Segawa　Hajime Sakagami
Yuichi Ikeda

Abstract

In the process of spraying of a fire protection coating, there is a strong demand for saving labor in construction because of the labor shortage. The authors performed a basic test for spraying of a fire protection coating using a manipulator with the objective of automating the fire protection coating process. Accordingly, the following conclusions were drawn: (1) A relationship between the coating thickness variation and the control condition of the manipulator movement was found. (2) The fireproof coating applied using the manipulator did not exhibit significant unevenness, and its specific gravity satisfied the construction management standard value.

概　　要

耐火被覆工事は，労働者が不足している建設工事の中でも特に省人化が求められている。そこで，耐火被覆吹付け作業の自動化を目指し，ロボットアームを用いた耐火被覆吹付けの基礎実験を行い，以下を確認した。(1)ロボットアーム動作の制御条件に対する被覆厚さおよびそのばらつきの関係性を把握した。(2)ロボットアームを用いて施工した耐火被覆には極端な不陸は無く，吹付け精度は良好であり，比重はロックウール工業会の施工管理基準値を満足した。

1.　はじめに

近年，耐火被覆工事では，作業環境の悪さから建設技能者不足が顕著であり，省人化が可能な技術開発が求められている。省人化につながる技術開発として，過去に耐火被覆吹付け作業のロボット化に取組んだ例[1)]があるが，当時は装置の開発コストが高かったため，実適用に十分な性能を備えたロボットは実現しなかった。今般，市販の産業用ロボットが比較的安価になり，簡単な教育を受ければ誰でも利用できる技術レベルになってきた。そのような状況において，建設作業の様々な方面でロボット化が進められており，既に実用化されたものもある[例えば, 2)]。そこで，筆者らは，耐火被覆の吹付け作業の自動化を目指し，ロボットアームを用いた半乾式吹付けロックウール耐火被覆の基礎実験を行った。本稿では，その概要と結果を報告する。

2.　基礎実験

2.1　実験目的および概要

実験の目的は，半乾式吹付けロックウールをロボットアームで施工した場合における，ロボットアームの動作制御条件と被覆の吹付け精度(被覆厚さのばらつき)の関係を把握することである。吹付け対象は，H形鋼梁のウェブ面(以下，ウェブ)および下フランジ下端面(以下，下フ

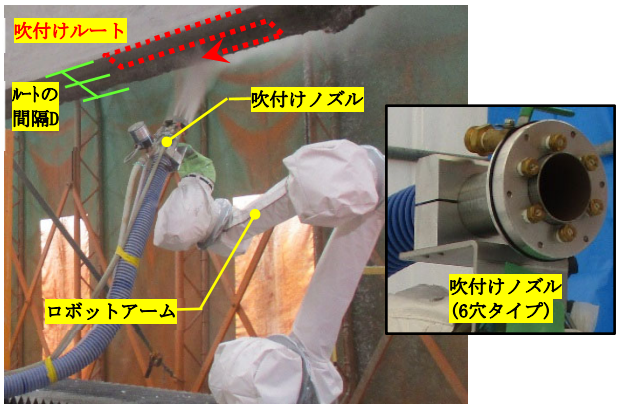

Photo 1　下フランジ模擬の吹付け状況
Spraying Situation of Simulated Lower Flange

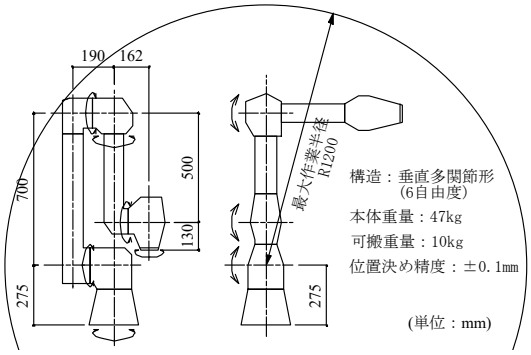

Fig. 1　ロボットアームの作業範囲および寸法
Work Range and Dimension of Manipulator

Table 1　ロボットアームの動作の制御条件(平板試験体)
Operation Condition of Manipulator(Specimen of Plate)

吹付け部位	吹付けケース	動作制御パラメータ	
		ノズルの送り速度V (mm/秒)	ルートの間隔D (芯間距離) (mm)
ウェブ	W1	150	40
	W2	175	
	W3	250	
下フランジ	F1-1	225	30
	F1-2	250	
	F1-3	300	
	F2-1	225	40
	F2-2	250	
	F2-3	300	

※各吹付けケースにつき，2～3回吹付けを実施した。

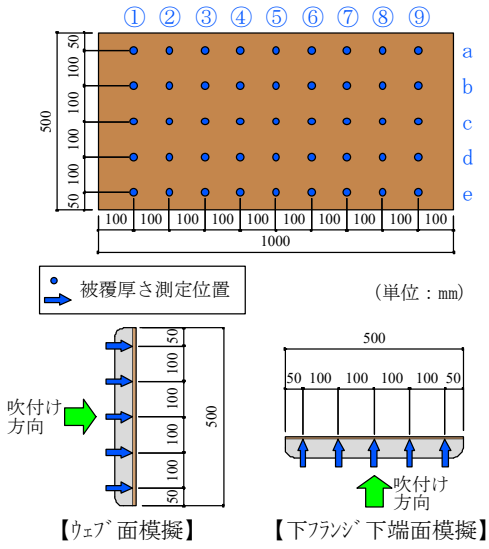

Fig. 2　被覆厚さの測定位置(平板試験体)
Location of Measurement of the Coating Thickness (Specimen of Plate)

ランジ)を模擬した単一のベニヤ板(以下，平板試験体)およびH形鋼梁の下半分程度を模擬した逆T字のベニヤ板(以下，T形試験体)とした。平板試験体，T形試験体のいずれに対しても，水平方向(ウェブ模擬)および鉛直上向き(下フランジ模擬)に吹き付けた後，技能工によりコテ押さえを実施した。材料の吐出量は，技能工が建築現場で通常吹き付ける場合と同程度とした。下フランジ(平板試験体)の吹付け状況をPhoto 1に示す。セメントスラリーが6箇所の穴から吐出するノズルをロボットアームの先端に取付けて吹付けを実施した。

2.2　ロボットアームの仕様および動作制御

ロボットアームには，市販の産業用ロボットを使用した。ロボットアームの作業範囲と寸法および仕様をFig. 1に示す。ロボットアームの教示作業は，吹付けロックウールの施工条件に合わせて，パソコン上の専用シミュレーターで動作を確認しながら行った(オフラインプログラミング)。ロボットアームの動作の制御条件一覧を，平板試験体を対象とした吹付けについてはTable 1に，T形試験体を対象とした吹付けについてはTable 2に示す。本

Table 2　ロボットアームの動作の制御条件(T形試験体)
Operation Condition of Manipulator(Specimen of T-Shape)

吹付け部位		動作制御パラメータ	
		ノズルの送り速度V (mm/秒)	ルートの間隔D (芯間距離) (mm)
ウェブ		250	40
下フランジ	上端	200	30
	小端	200	50
	下端	250	50

※同一条件下で4回吹付けを実施した。

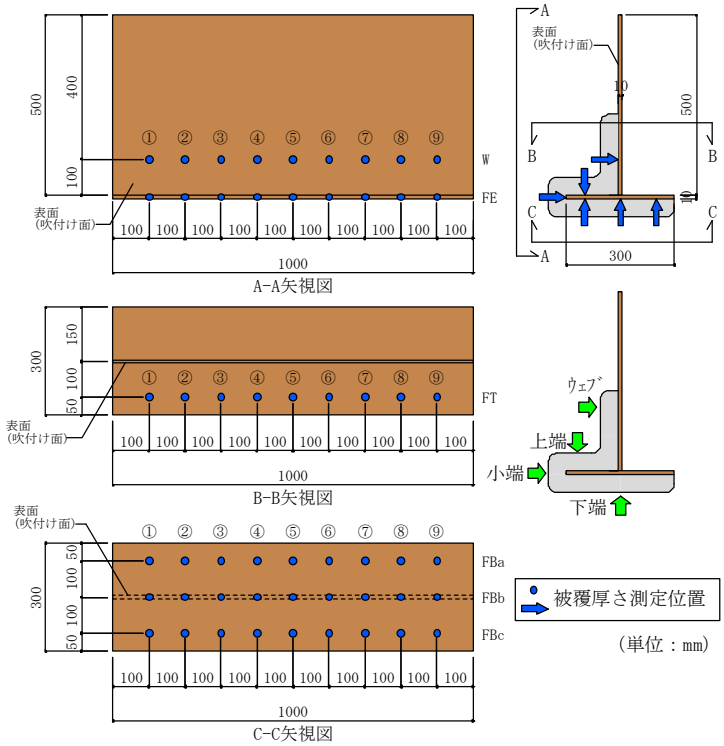

Fig. 3　被覆厚さの測定位置(T形試験体)
Location of Measurement of the Coating Thickness (Specimen of T-Shape)

実験においては，ノズルの送り速度(ロボットアーム先端の移動速度)Vと吹付けルートの間隔(芯間距離)Dを動作制御のパラメータとした。吹付けルートは，ノズルの折り返し点でのノズル先端位置の座標をオフラインプログラミングで登録し，座標間は直線補間した。吹付けルートの間隔は，吹付け面内でノズルが折り返して次のルートに移った際のルート間の距離であり，同一の吹付け面においては，ルート間隔は変えないものとした。

2.3　測定方法

実験では，吹き付けた被覆厚さ(技能工によるコテ押さえの実施後)および吹き付けた被覆の比重を測定項目とした。被覆厚さの測定位置を，平板試験体についてはFig. 2に，T形試験体についてはFig. 3に示す。被覆厚さは測定ピンを用いて測定し，比重(平板試験体のみ測定)は被覆の吹付けおよび技能工によるコテ押さえを行った翌日に，被覆から採取した試料を乾燥炉に入れて絶乾にし，

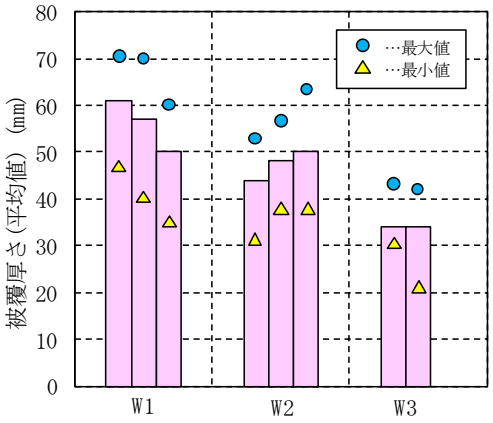

Fig. 4　被覆厚さの測定結果(平板試験体，ウェブ)
Result of Measurement of the Coating Thickness
(Specimen of Plate, Simulated Web)

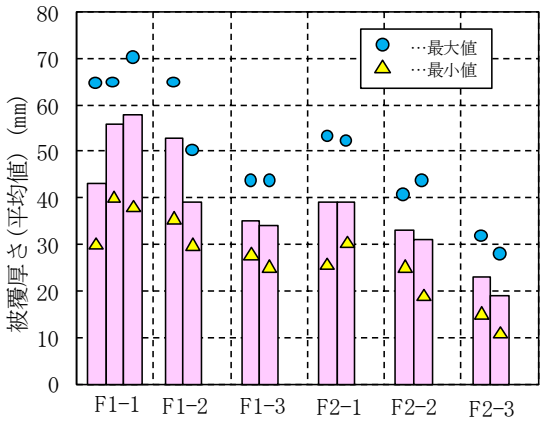

Fig. 5　被覆厚さの測定結果(平板試験体，下フランジ)
Result of Measurement of the Coating Thickness
(Specimen of Plate, Simulated Lower Flange)

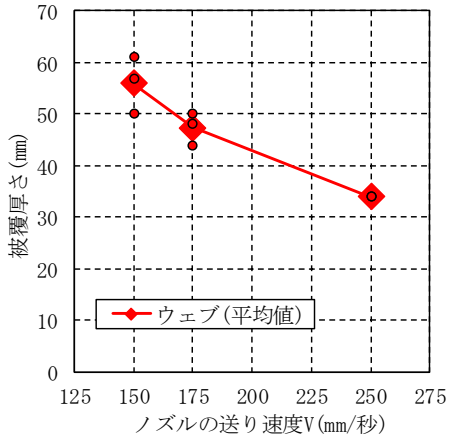

Fig. 6　被覆厚さとノズルの送り速度の関係
(平板試験体，ウェブ)
Relations Between Coating Thickness and Forwarding Speed of Nozzle(Specimen of Plate, Simulated Web)

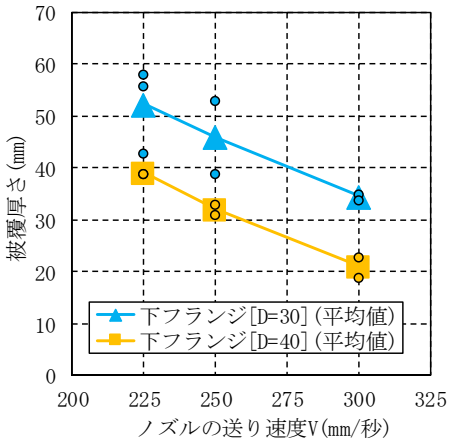

Fig. 7　被覆厚さとノズルの送り速度の関係
(平板試験体，下フランジ)
Relations Between Coating Thickness and Forwarding Speed of Nozzle(Specimen of Plate, Simulated Lower Flange)

Table 3　被覆厚さのばらつき(平板試験体)
Variation of the Coating Thickness
(Specimen of Plate)

吹付け部位	吹付けケース	標準偏差(mm)	変動係数(%)
ウェブ	W1平均	7.1	12.9
	W2平均	5.8	12.2
	W3平均	3.7	10.8
下フランジ	F1-1平均	7.7	15.3
	F1-2平均	6.6	14.3
	F1-3平均	4.7	13.6
	F2-1平均	7.0	18.0
	F2-2平均	5.2	16.0
	F2-3平均	4.5	21.3

Table 4　被覆厚さ平均値の測定結果(平板試験体)
Result of Measurement of Mean of Coating Thickness
(Specimen of Plate)

吹付け部位	測定値（全平均）		
	被覆厚さ平均値(mm)	標準偏差(mm)	変動係数(%)
ウェブ	46	5.5	11.9
下フランジ	37	5.9	16.4

乾燥後の試料重量より算出した。

3.　実験結果

3.1　被覆厚さの測定結果

3.1.1　平板試験体　平板試験体のウェブの被覆厚さの測定結果をFig. 4に，下フランジの測定結果をFig. 5に示す(青丸：最大値，黄色三角：最小値，桃色の棒：平均値)。被覆厚さの平均値は，ウェブで30～60mm程度，下フランジで20～60mm程度となった。ウェブおよび下フランジの被覆厚さのばらつきをTable 3に，被覆厚さとノズルの送り速度Vの関係をFig. 6およびFig. 7に示す。ウェブの吹付けでは，被覆厚さはノズルの送り速度と相関性が高く，速度が速いほど被覆厚さが小さくなり，被覆厚さのばらつき(標準偏差および変動係数)が小さくなった(Fig. 6)。

下フランジの吹付けでは，ウェブの吹付け同様，被覆

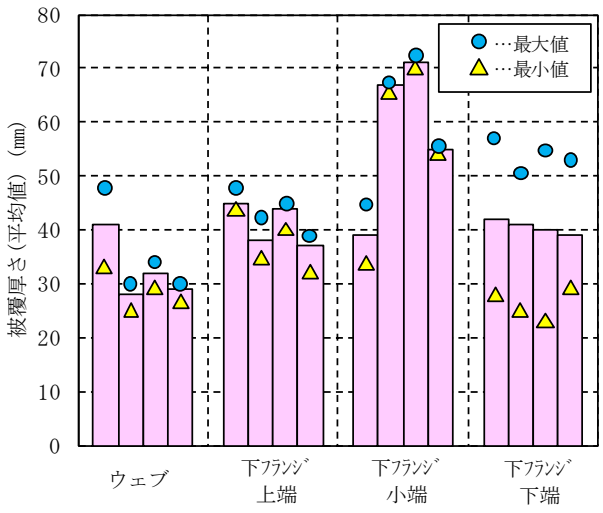

Fig. 8　被覆厚さの測定結果(T形試験体)
Result of Measurement of the Coating Thickness (Specimen of T-Shape)

厚さはノズルの送り速度と相関性が高く，速度が速いほど被覆厚さが小さく，被覆厚さのばらつき(標準偏差)が小さくなった。また，被覆厚さはルート間隔Dとも相関性が高く，ルート間隔が大きいほど被覆厚さは小さくなり(Fig. 7)，標準偏差は小さくなった。一方で変動係数を見ると，ルート間隔を40mmとした吹付け(F2-1, 2, 3)は，ルート間隔30mmでの吹付け(F1-1, 2, 3)より被覆厚さが小さくなった分，変動係数が大きくなる結果となった(Table 3)。

ウェブおよび下フランジの吹付けの測定結果の全平均をTable 4に示す。吹き付けた被覆(コテ押さえ前)を目視で確認したところ，極端な不陸は無かった。ウェブと下フランジの被覆厚さのばらつきを比較すると，下フランジの方がばらつき(変動係数)がやや大きくなったが，ウェブ，下フランジともに，被覆厚さの標準偏差は5～6mm程度に留まり，良好な吹付け精度を得た。

3.1.2　T形試験体　T形試験体の被覆厚さの測定結果をFig. 8に，被覆厚さのばらつき(吹付け4回分の平均値)をTable 5に示す。被覆厚さの平均値は，ウェブで30～40mm程度，下フランジ(上端，小端，下端)で40～70mm程度となった。被覆厚さのばらつきを吹付け模擬の部位ごとに比較すると，下フランジの上端および小端とウェブはばらつきが小さいのに対し，下フランジの下端はばらつきが突出して大きくなった。これは，下フランジ上端，小端，ウェブは水平方向に吹付けを行うのに対して，下フランジ下端は鉛直上向き方向に重力に逆らった状態で吹付けを行うため，ロックウール材料が不均一に脈動しながら吐出する影響を受けたものと推測される(吐出状況は目視により確認)。

今後，ロックウール材料の吐出を安定させる必要があるものの，H形鋼梁の下半分程度を模擬した逆T字のような複雑な形状を吹付け対象にした場合においても，吹付け模擬の各部位に一体的な被覆を連続して形成できることを確認した。

Table 5　被覆厚さのばらつき(T形試験体)
Variation of the Coating Thickness (Specimen of T-Shape)

吹付け部位		標準偏差(mm)	変動係数(%)
ウェブ		2.5	7.2
下フランジ	上端	2.4	5.9
	小端	1.8	4.1
	下端	8.1	19.8

Table 6　吹付けロックウール比重の測定結果(平板試験体)
Result of Measurement of Specific Gravity of Spraying Rock Wool(Specimen of Plate)

吹付けケース	吹付け部位	試料No.	試料の厚さ(mm)	試料絶乾重量(g)	絶乾比重 個値	絶乾比重 平均値
W2	ウェブ	1	48	84.0	0.35	0.35
		2	47	83.3	0.35	
		3	50	83.9	0.33	
F1-3	下フランジ	1	33	62.3	0.38	0.37
		2	35	64.5	0.37	
		3	37	65.6	0.35	

3.2　吹付けロックウール比重の測定結果

平板試験体から試料を採取して測定した吹付けロックウール比重の測定結果をTable 6に示す。比重は0.33～0.38となり，ウェブ，下フランジいずれの吹付けにおいても，施工管理基準値の0.28を満足した。

4.　まとめ

耐火被覆吹付けの自動化を目指し，ロボットアームを用いた半乾式吹付けロックウールの基礎実験を行い，吹付け精度を確認した。実験で得られた知見を以下に示す。

1) 平板のみならず逆T字のような複雑な形状を吹付け対象にした場合においても，吹き付けた試験体の各部位に一体的な被覆を連続して形成できた。
2) ノズルの送り速度が速いほど被覆厚さが小さくなり，ルート間隔が大きいほど被覆厚さが小さくなった。
3) ウェブ面と下フランジ下端面を比較したところ，下フランジ下端面の方が被覆厚さのばらつきは大きかった。
4) コテ押さえ前の被覆には極端な不陸は無く，ウェブ面および下フランジ下端面の吹付け精度は良好であった。
5) ウェブ面および下フランジ下端面の吹付けともに，比重はロックウール工業会の施工管理基準値の0.28を満足した。

参考文献

1) 熊谷敏男，他：耐火被覆吹付けロボットの開発 その2，清水建設研究報告，第41号，1985.4
2) 浅井英克，他：ロボットを活用した現場溶接技術の開発，大林組技術研究所報，No.81，2017.12