

耐火被覆吹付けロボットの開発 (その2)

—吹付ロックウールの定常圧送性の検討—

熊谷 敏 男

(技術研究所)

山崎 康 博

(技術研究所)

山崎 忍

(機材部)

末松 茂 正

(建築本部技術部)

庄川 選 男

(建築本部技術部)

吉田 哲 二

(技術研究所)

上野 高 敏

(技術研究所)

§ 1. はじめに

耐火被覆の吹付ロボットの開発に、約2年前より取り組んでいる。本開発の目的は、従来の耐火被覆吹付工事の問題点である次の3項目を改善するところにある。

(1)劣悪な作業環境からの吹付作業者の解放

吹付ロックウールの吹付作業は、写真-1に示すようにロックウールファイバーやセメントによる多量の粉塵が生じる。そのため、この吹付作業は建設工事の種々な作業の中でも、極めて劣悪な作業の一つに数えられている。ロックウールファイバーは針状繊維であり、吸込むとひどく咳込んだり、また皮膚に刺るとチクチクとした痛みを生じる。これらを含んだ吹付作業場所の総粉塵量は、他の作業階の約15倍にも達している¹⁾。そのため、吹付工にとっては夏でも首にタオルを巻き防塵マスクをつけ、頭からアノラック状のナイロン製衣服を着用しなければならぬつらい作業となっている。

(2)吹付工の高令化と熟練工の不足に対応するための省人化

吹付ロックウールの品質は、吹付層の厚さと密度とで管理されている。これを所定の規定値以上に保つためには高度の熟練度を要し、一人前の吹付工になるには3~5年かかるといわれている。熟練度を要し、しかも悪環境下で作業しなければならないこの工事においては、職人ばなれが進み、かつ作業者の高令化も進んでいる。

(3)吹付作業の能率向上

吹付工による施工能率は、現状80~110m²/人・日といわれている。ロボットは人間と違い、作業による疲れやムラが生じない。圧送量を増し、吹付ノズルの走査速度を上げることによって、現状の2倍程度の施工能率の向上を図ることも可能となる。しかし、このような施工能率の向上を図った場合でも、所定の品質の確保はいまでもないことである。

開発第1段階の吹付ロボット(SSR-1:塗装用のプレイバックロボットを台車の上に乗せて牽引する方式)は

三田森ビルに適用された。また、第2段階の吹付ロボット(SSR-2:SSR-1を自走式にするとともに走行距離センサと位置確認センサを具備している。写真-2参照)は東芝本社ビル(SKP建設所)に適用された¹⁾。

SSR-1の開発の問題点として、ロボットによって吹付けられた岩綿の品質、特に吹付厚さのばらつきを少なくするためには、岩綿を定常圧送することが肝要であることが分かった。そこでSSR-2の開発に当たっては、吹付ロックウールの定常圧送性に関する実験的検討を行なった。その結果を受けて、岩綿および圧送システムの改善を図り、東芝本社ビルで現場施工実験を行ない施工能率、品質等の性能の確認を行なった。

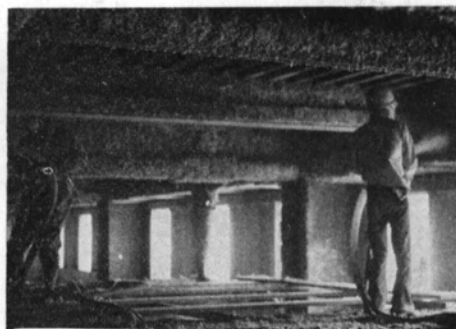


写真-1 吹付ロックウールの吹付作業

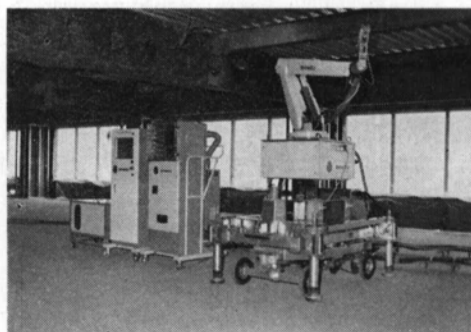
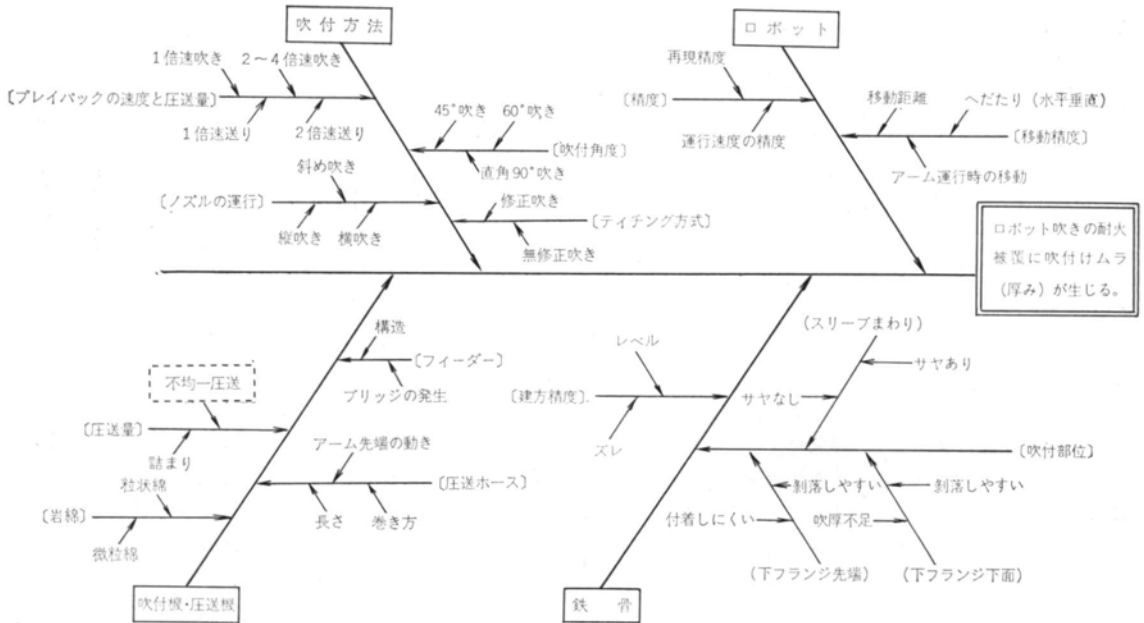
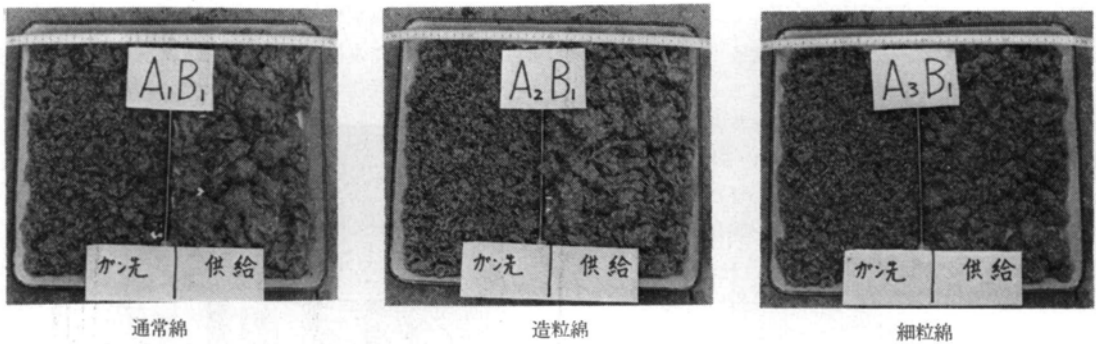


写真-2 SSR-2の外観(左側:吹付ロボット,右側:コントロールユニット)



図一 吹付けムラに関する特性要因図



写真一 3 実験に用いた岩綿の種類

本報告はこれらの検討のうち、岩綿の定常圧送性を得るための岩綿の選定および解綿ホップの改善と、吹付けられた吹付ロックウールの品質について取りまとめたものである。吹付ロボットの機構、施工能率等に関しては前報¹⁾に報告のとおりである。

§ 2. 実験 I : 定常圧送性を得るための岩綿の選定実験

2.1 実験目的

吹付ロックウール(半湿式吹付岩綿, 通則指定: ロックウール工業会)に要求される品質としては、厚さ(1時間耐火30mm以上, 2時間耐火45mm以上, 3時間耐火60mm以上)および密度(0.3g/cm³以上)の規定がある。

要因	水準		
A. 岩綿の粒度	(通常綿) (1)ハンマーで粉砕したもの	(造粒綿) (2)ハンマー粉砕の後、粒状化したもの	(細粒綿) (3)ハンマー粉砕の後、シユレツダにかけたもの
B. 岩綿の油量	(1)油の混入量 0.03%/wt(硬)	(2) " " 0.1%/wt	(3) " " 0.2~0.3%/wt(軟)
C. 岩綿の吐出量	(1) 4 kg/min	(2) 6 kg/min	—
D. スプレーの有無	(1) 有	(2) 無	—

表一 1 実験に取上げた要因と水準

吹付厚さを一定のばらつきの範囲内に納めるためには、吹付けムラを少なくする必要がある。また、吹付密度の

規定を満足させるためには、配合の管理およびコテ押えが重要であることが分かっている。

ロボット吹きにおける吹付ロックウールの品質管理上の最重点項目としては、吹付けムラを少なくすることである。この吹付けムラに最も影響する因子としては、図一1の特性要因図に示すように岩綿の不均一圧送にあるといえる。本実験は、定常圧送に適する岩綿の選定が主目的である。

2.2 実験方法

岩綿の選定実験に取上げた要因とその水準は、表一1に示すとおりである。「岩綿の粒度」は従来から用いている通常綿を基準に、通常綿の岩綿の塊を粒状化した造粒綿と、通常綿をシュレツダにかけて、さらに細かくした細粒綿の3水準とした(写真一3参照)。「岩綿の油量」は、吹付けによる粉塵の防止と岩綿を軟らかくする効果がある。従来から採用している0.1°/wtを基準に、量の少ない0.03°/wtと量の多い0.2~0.3°/wtの3水準とした。「岩綿の吐出量」は、従来から実施している一般的な値である4 kg/minと、その5割増の6 kg/minの2水準とした。「スプレーの有無」は、圧送される岩綿と塩化ビニール製ホースの内壁との間に生じる静電気を調整する効果がある。

実験の組み合わせは、以上の要因と水準を表一2に示すように直交表 $L_9(3^4)$ に割付けた9組と、追加の3組の計12組とした。

測定は次の3項目とした。

- (1) 吐出岩綿の流量
- (2) 吐出合材^{注)}の吹付厚さ
- (3) 吐出合材の吹付密度

2.2.1 岩綿の流量測定

実験は表一2の各々の実験条件に従って、岩綿を圧送し筒先から吐出される岩綿の状況を調べることにした。その方法は次の3つの方法とした。

(1) 連続計測法(光電管方式)

JIS A 1321に規定されている光量測定装置を図一2に示すように組込み、吹付ノズルから吐出される岩綿の^{注)} 岩綿とセメントを混合したもの。

No	因子	A. 岩綿の粒度	B. 岩綿の油量	C. 岩綿の吐出量	D. スプレーの有無	実験の組み合わせ			
						岩綿の粒度	岩綿の油量	岩綿の吐出量	スプレーの有無
1		1	1	1	1	通常綿	0.03%	4 kg/min	有
2		1	2	2	2	〃	0.1	6	無
3		1	3	2'	2'	〃	0.2~0.3	6	無
4		2	1	2	2'	造粒綿	0.03	6	無
5		2	2	2'	1	〃	0.1	6	有
6		2	3	1	2	〃	0.2~0.3	4	無
7		3	1	2'	2	細粒綿	0.03	6	無
8		3	2	1	2'	〃	0.1	4	無
9		3	3	2	1	〃	0.2~0.3	6	有
*1 10(6')		2	3	1	1	造粒綿	0.2~0.3	4	有
*2 11(5')		2	2	2'	2	〃	0.1	6	無
*3 10(6')		2	3	1	1	〃	0.2~0.3	4	有

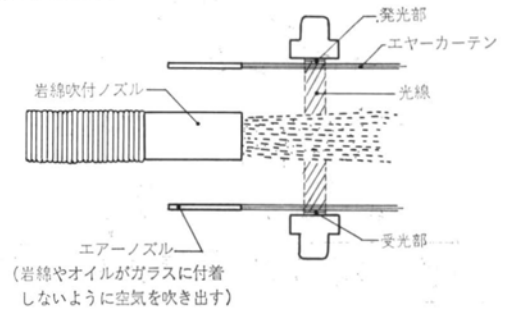
注) 吐出岩綿の流量計測実験および合板へのロボット吹き吹付実験は、表一2の実験の組み合わせに基づいて行なっているが、スプレー効果を推定するための参考実験として

*1と*2に示す組み合わせの実験を追加して行なった。

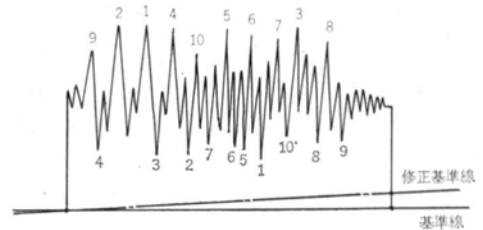
*1: 吐出岩綿の流量測定の実験追加組み合わせ

*2: ロボット吹き吹付実験の実験追加組み合わせ

表一2 実験の組み合わせ(直交表 $L_9(3^4)$)



図一2 連続計測法(光電管装置)



図一3 光電管による測定グラフ

濃度変化を30秒間連続してとらえた。実験により得られたグラフについては、図一3に示すように測定前と測定後の記録ペンのゼロ点を結び、計測基準線とした(これは、発光部および受光部のガラスに岩綿やオイルが付着し光量に変化するのを修正するためである)。図一3に示す修正基準線から高さの高い方および低い方から、

各々5点および10点の距離を測り、その距離のばらつき(標準偏差)から吐出岩綿の流量のばらつきを推定することにした。

(2)断統計測法(バッチ方式)

図-4に示すように、岩綿の捕集袋の付いた10cm幅の

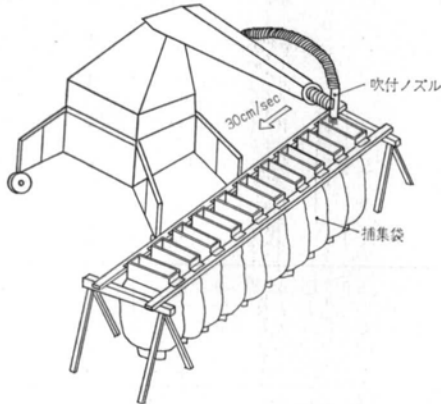


図-4 断統計測法

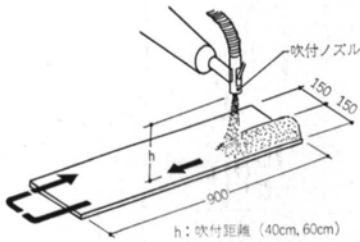


図-5 合板へのロボット吹付実験

スリットの上をロボットのアームを 30 cm/sec で走査させ、捕集した岩綿の重量を測定し、その値からばらつき(標準偏差)を算出した。

(3)積分計測法(30秒間捕集方式)

岩綿捕集袋に30秒間岩綿を吐出させ、捕集袋に捕集した岩綿の重量を測定し、その値からばらつき(標準偏差)を算出した。

2.2.2 吹付厚さの測定

図-5に示すように、ロボットのアームを 10 cm/sec で合板上を走査させ、合材を吹付ける。吹付ノズルの先端から合板までの距離は40cmと60cmの2水準とした。

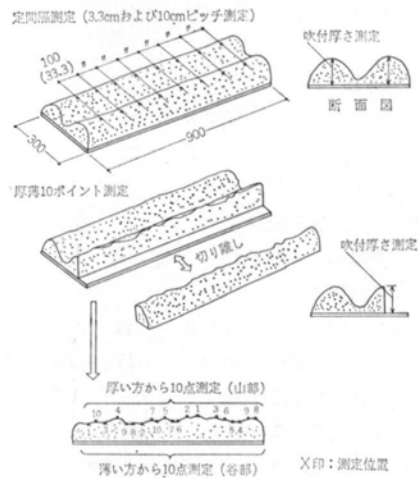


図-6 吹付厚さの測定方法

No	実験の組み合わせ				連続法: 上下10ポイント測定 (mm)		断続法: 吐出量 (g/sec)		積分法: 吐出量 (kg/min)		厚薄10ポイント測定・吹付距離60cmの吹付厚さ (mm)		吹付距離60cmの吹付け密度 (g/cm ²)	
	岩綿の粒度	岩綿の油量	岩綿の吐出量	スプレ-の有無	平均 (x̄)	標準偏差 (σ _{n-1})	平均 (x̄)	標準偏差 (σ _{n-1})	平均 (x̄)	標準偏差 (σ _{n-1})	平均 (x̄)	標準偏差 (σ _{n-1})	平均 (x̄)	標準偏差 (σ _{n-1})
1	通常綿	0.03%	4	有	39.39	15.417	57.39	11.247	3.86	0.404	32.35	7.125	0.314	0.070
2	"	0.1	6	無	41.71	11.264	80.88	13.704	6.00	0.510	38.00	8.621	0.284	0.016
3	"	0.2~0.3	6	無	34.95	12.821	72.54	15.684	5.10	0.906	42.05	10.758	0.414	0.008
4	造粒綿	0.03	6	無	42.03	22.030	92.70	18.342	6.22	0.130	45.40	7.803	0.400	0.011
5	"	0.1	6	有	43.24	12.419	66.87	11.025	6.44	0.541	50.05	9.600	0.309	0.017
6	"	0.2~0.3	4	無	19.15	8.060	55.47	12.369	3.70	0.332	34.25	7.504	0.313	0.030
7	細粒綿	0.03	6	無	51.74	19.778	93.66	24.165	6.08	0.536	46.35	9.799	0.398	0.011
8	"	0.1	4	無	33.77	15.509	61.62	13.521	4.04	0.305	37.55	6.917	0.366	0.013
9	"	0.2~0.3	6	有	38.18	15.242	98.25	36.483	6.30	0.548	42.00	6.759	0.395	0.004
11 (5')	造粒綿	0.1	6	無	—	—	—	—	—	—	51.50	8.069	0.373	0.030
10 (6')	"	0.2~0.3	4	有	28.70	7.815	3.72	0.372	53.86	14.363	31.85	7.457	0.328	0.046

注) 表には次のデータは省略してある。連続法(上下5ポイント測定)、吹付厚さ(10cmピッチ、3.33cmピッチの吹付距離40、60cmおよび厚薄10ポイントの吹付距離40cm)

表-3 吐出岩綿の流量測定結果

吹付材料の条件は表-2に示す実験の組合わせとした。吹付厚さの測定は図-6に示すように、定間隔測定と厚薄の10点測定の方法による。

2.2.3 吹付密度の測定

合材の吹付けは2.2.2と同じ方法による。密度測定用試料は、各吹付条件ごとに5×5cmの大ききで切り出し、吹付け上面をカッティングした後105℃で恒量になるまで乾燥させ、絶乾密度を求めた。

2.3 実験結果および考察

吐出岩綿の流量、吹付ロックウールの吹付厚さおよび吹付密度の測定結果は表-3に示すとおりである。直交表(L₉(3⁴))に割付けたNo.1~9について吐出岩綿の流量のばらつき、吹付厚さおよび吹付密度のばらつきを特性値として分散分析を行なった。その結果は表-4に示すとおりである。

吐出岩綿の流量を計測する3つの方法(連続計測法、断続計測法、積分計測法)の概念を示すと、図-7のとおりである。

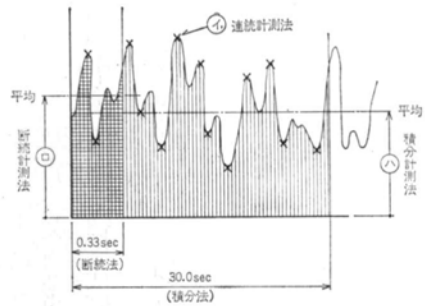


図-7 計測法の概念

連続計測法は、30秒間の脈動の中で変動の大きい④の×印がばらつきとして測定される。断続計測法は1/3秒間の積分量の平均が⑤として測定される。また、積分計測法は30秒間の積分量の平均が⑥として測定される。

吐出岩綿の変動を最も sensitive にとらえる方法は連続計測法であり、これと他の2つの方法との関係を示すと図-8のとおりである。断続計測法はある程度連続計測法との間に正比例の関係が見られるが、積分計測法は負の関係になっており相関性が認められない。積分計測

法は、実際に生じるばらつきが平均化されて測定されるためにこのようになるもので、分散分析の結果とも一致している。

吐出岩綿の流量のばらつきに関しては、連続計測法と断続計測法においては、「油量」「吐出量」および「粒度」が危険率1~5%で有意となった。「吐出量」については、吐出量の少ない4 kg/minが最適水準として選ばれた。これは、今回のスプ

実験	要因		A. 粒度	B. 油量	C. 吐出量	D. スプレアの有無	寄与率*1 ρ (%)
	特性値						
吐出岩綿の流量計測実験	[連続計測法] 流量変化の標準偏差		4.51** (通常綿)	(8.59) (0.2~0.3°/wt)	5.31 (4 kg/min)**	—	50.5
	[断続計測法] 単位時間当り吐出量(g/sec)の標準偏差		7.05 (通常綿)	(9.92) (0.1°/wt)	8.84 (4 kg/min)	—	59.2
	[積分計測法] 単位時間当り吐出量(kg/min)の標準偏差		—	—	—	—**	—
ロボット吹き吹付実験	吹付標準厚さの差	10cmピッチ測定	—	—	—	—	—
		3.33cmピッチ測定	—	—	—	—	—
	密度標準度の差	吹付距離40mm	—	—	—	—	—
		吹付距離60mm	—	—	(26.02) (6 kg/min)*	—	41.7

*1: 取上げられた要因の寄与率の和を示す。

*2: ()内は取上げられた要因の最適水準を示すが、要因効果の推定図において極めて差の少ない場合は水準を2つ示している。

*3: 有意とならなかったもの。

*4: 分散比(F₀値)を示す。

表-4 分散分析結果

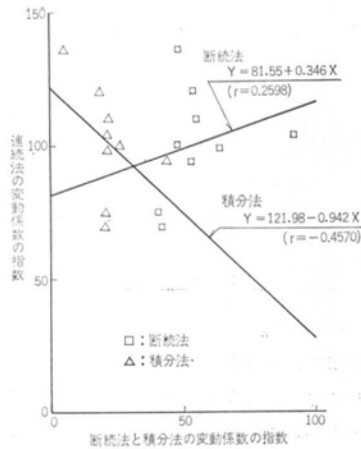


図-8 連続法と断続法および積分法との関係

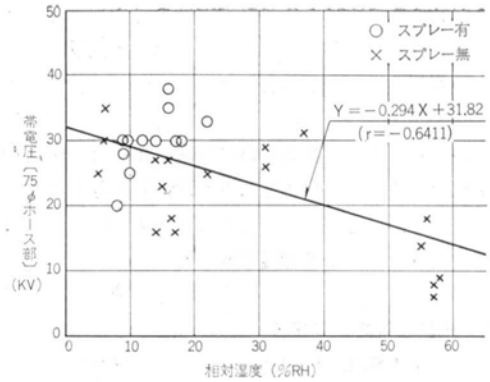


図-9 相対湿度とホースの帯電圧との関係(スプレーの有無の効果)

サイ 実験 No.	要因 No.	岩綿の 粒度	岩綿の 油量	岩綿の 吐出量	管内ス プレーの 有無	ルーフ アプレ の回転 (RPM)	マノメ タ(mmAq)	ロータ リブル アの回 転数 (RPM)	帯電圧(KV)	75φホ ース部 での測 定値	岩綿を 入れる人	気温 (℃)	湿度 (%RH)	(連続計測法) 流量変化の 標準偏差	(断続計測法) 吐出量(g/33sec) の標準偏差	(積分計測法) 吐出量(kg/min) の標準偏差
1	1	1	1	3.2	1	1110	2992	21.2	2.5	30.0	4	10.0	12.0	10.62	3.96	0.404
	2	1	1	3.9	1	1110	3046	21.0	10.0	25.0	4	11.0	10.0	12.62	3.58	0.404
	3	1	1	4.3	1	1110	3019	21.0	7.5	30.0	4	12.5	9.0	15.04	3.21	0.404
2	1	1	2	6.6	2	1070	5168	30.0	32.5	25.0	1	12.0	22.0	10.84	2.93	0.510
	2	1	2	6.2	2	1070	4801	31.0	25.0	30.0	1	14.5	16.5	11.40	2.38	0.510
	3	1	2	6.0	2	1065	4842	30.5	26.5	18.0	1	15.0	16.5	10.19	4.07	0.510
3	1	1	3	6.2	2	1060	5345	26.5	45.0	30.0	1	15.0	16.5	16.15	6.25	0.906
	2	1	3	5.4	2	1085	4107	26.0	23.5	27.0	1	14.0	14.0	9.64	5.14	0.906
	3	1	3	5.2	2	1085	4121	26.0	38.5	27.0	1	13.5	16.0	11.57	3.28	0.906
4	1	2	1	6.2	2	1100	3169	33.5	0.8	23.0	2	14.5	15.0	16.07	6.08	0.130
	2	2	1	6.3	2	1100	3298	33.5	0.5	16.0	2	15.0	17.0	22.93	4.33	0.130
	3	2	1	6.4	2	1100	3250	33.8	1.5	16.0	2	15.0	14.0	25.11	6.61	0.130
5	1	2	2	6.6	1	1050	3998	36.5	20.0	30.0	3	13.0	14.0	9.93	2.04	0.541
	2	2	2	6.6	1	1065	4515	35.0	20.0	30.0	3	13.0	18.0	11.95	2.95	0.541
	3	2	2	6.9	1	1055	4338	36.5	30.0	35.0	3	13.0	16.0	13.91	3.28	0.541
6	1	2	3	3.4	2	1090	4243	18.0	25.0	25.0	4	14.0	5.0	7.38	4.09	0.332
	2	2	3	4.0	2	1085	4311	18.2	30.0	35.0	4	11.5	6.0	8.56	2.30	0.332
	3	2	3	3.3	2	1075	4665	18.2	25.0	30.0	4	11.0	6.0	8.18	4.08	0.332
7	1	3	1	6.7	2	1100	3278	44.0	1.5	9.0	2	9.0	58.0	21.60	9.81	0.536
	2	3	1	6.6	2	1100	3332	45.0	1.0	6.0	2	8.0	57.0	14.92	7.47	0.536
	3	3	1	5.8	2	1100	3142	44.0	2.0	8.0	2	8.0	57.0	19.02	6.42	0.536
8	1	3	2	4.4	2	1110	2870	23.0	1.3	24.0	2	8.0	56.0	14.80	4.43	0.305
	2	3	2	3.7	2	1110	2734	23.2	1.2	18.0	2	8.0	56.0	15.06	3.66	0.305
	3	3	2	4.0	2	1108	2638	23.5	1.1	14.0	2	8.0	55.0	16.68	2.64	0.305
9	1	3	3	6.9	1	1095	3794	31.5	24.0	33.0	2	16.5	22.0	13.55	8.45	0.548
	2	3	3	6.4	1	1100	3468	31.0	20.0	30.0	2	17.0	17.0	16.19	4.93	0.548
	3	3	3	6.4	1	1110	3250	31.0	19.5	38.0	2	17.0	16.0	15.77	4.51	0.548
10	1	2	3	3.2	1	1110	2679	18.0	6.5	20.0	4	11.0	8.0	6.74	0.95	0.335
	2	2	3	4.0	1	1110	2638	18.0	6.5	28.0	4	10.5	9.0	9.14	1.18	0.335
	3	2	3	3.6	1	1110	2516	18.0	6.5	30.0	4	10.0	9.5	7.24	7.24	0.335
11	1	1	2	6.0	2	1095	3618	30.0	20.0	31.0	1	8.5	37.0	/	3.19	/
	2	1	2	5.9	2	1095	3577	30.0	20.0	29.0	1	10.0	31.0	/	1.99	/
	3	1	2	6.0	2	1100	3414	30.0	22.0	26.0	1	10.0	31.0	/	3.62	/

表-5 重回帰分析入力データ(吐出岩綿の流量計測実験)

計測方法	入力データの条件	岩綿の粒度	岩綿の油量	岩綿の吐出量	管内スプレアの有・無	ルーツプロアの回転数	マノメータ	ロータリバルブの回転数	* 帯電圧	岩綿を入れる人	気温	湿度	寄与率
連続法	全11因子 順位		②	④				③		①			77.0
	全30データ F ₀ 値	1.382	10.995	2.134	0.999	0.718	0.456	5.017	1.336	11.435	0.183	0.863	
	上F10ポイント 偏相関係数	0.783	0.826	0.463	0.040	0.086	-0.036	-0.750	0.051	0.732	0.459	0.002	
	最適水準		0.1*/wt	4kg/min				大		経験者			
断続法	全11因子 順位		①	③								②	55.4
	全30データ F ₀ 値	0.047	15.038	11.182	0.072	0.458	0.614	0.163	0.040	0.092	0.455	12.670	
	偏相関係数	-0.052	0.720	0.540	-0.052	0.127	-0.144	0.065	0.034	-0.020	-0.123	0.586	
	最適水準	0	0.1*/wt	4kg/min								低	
積分法	全11因子 順位	②	①		⑦	⑤	⑥	④		③			99.97
	全30データ F ₀ 値	12075.3	12093.1	0.1530	4.4200	20.6014	9.4384	529.8	0.7331	3462.5	0.0001	0.4383	
	偏相関係数	0.9990	0.9997		0.6799				0.4295	0.9998	0.3896	0.5949	
	最適水準	通常粒	0.1*/wt		無	大	大	大		経験者			

*1: 帯電圧のデータは75φホース部の値を用いている。

表-6 重回帰分析結果(吐出岩綿の流量計測実験)

計測方法	重回帰式
連続法	$Y = 19.99 + 1.18x_3 - 3.31x_7 + (0.00, -6.73, -6.36) + (0.00, 4.37, 1.97, -4.63)$ <p style="text-align: center;"> <small>[吐出量] [ロータリバルブの回転数] [岩綿の油量(%wt)] [岩綿を入れる人]</small> <small>x₂₁ x₂₂ x₂₃ x₂₄</small> <small>(0.03) (0.1) (0.2-0.3) (経験者) (経験者) (経験者)</small> </p>
断続法	$Y = 0.51 + 0.66x_3 + 0.06x_{11} + (0.00, -2.96, -0.03)$ <p style="text-align: center;"> <small>[吐出量] [湿度] [岩綿の油量(%wt)]</small> <small>x₂₁ x₂₂ x₂₃</small> <small>(0.03) (0.1) (0.2-0.3)</small> </p>
積分法	$Y = 2.2931 - 0.0776x_5 - 0.0009x_6 - 0.0131x_7 + (0.000, 0.049, 0.593) + (0.000, -0.502, -0.161)$ <p style="text-align: center;"> <small>[ルーツプロアの回転数] [マノメータ] [ロータリバルブの回転数] [粒度] [岩綿の油量]</small> <small>x₁₁ x₁₂ x₁₃ x₂₁ x₂₂ x₂₃</small> <small>(通常粒) (造粒) (細粒) (0.03) (0.1) (0.2-0.3)wt</small> </p> $+ (0.000, -0.008) + (0.000, -0.882, 0.031, -0.724)$ <p style="text-align: center;"> <small>[スプレアの有・無] [岩綿を入れる人]</small> <small>x₄₁ x₄₂ x₉₁ x₉₂ x₉₄</small> <small>(有) (無) (未経験) (経験) (未経験) (経験)</small> </p>

表-7 重回帰式

レーが、解綿ホッパの出口において圧送ホースの中央部で岩綿にスプレーする方式であるが、図-9に示すようにスプレー有りと無しとで帯電圧に明らかな差が生じておらず、スプレー自体の効果がほとんどなかったためと思われる。

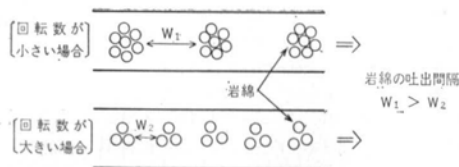
吹付厚さのばらつきに関しては、いずれの要因も有意とはならなかった。

吹付密度のばらつきに関しては、吹付距離6cmで「吐出量」が危険率5%で有意となった。「吐出量」の最適水準は6kg/cm²であった。これは吐出圧力が高くなるため、その結果としてばらつきが少なくなったと考えられる。

以上の分散分析の結果は、妥当な結論とそうではない結論が混在している点、および寄与率が40~60%と低い点を考えると必ずしも適切な結果とはいえない。

そこで説明変数として岩綿に関する4要因の他に、岩綿の吐出性状に影響すると考えられる圧送機の諸特性、すなわち「ルーツプロアの回転数」「マノメータ値」「ロータリバルブの回転数」「帯電圧」「ホッパで岩綿を攪拌する人」「気温」「湿度」を、また従属変数として「吐出岩綿の流量のばらつき」を用いて重回帰分析(数量化I類:変数増減法)を行なった。重回帰分析の入力データは表-5に示すとおりである。

重回帰分析の結果は表-6に、また得られた重回帰式は表-7に示すとおりである。3つの計測法のうち、連続計測法と断続計測法とでは、寄与率の大きい前者の結果の方が信頼度が高いといえる。積分計測法の寄与率は極めて高いが、先に記したように吐出岩綿の変動を適切に表わしているとはいえないので、考察には加えないこととした。



図一10 ロータリバルブの回転数の違いによる岩綿の吐出状態
連続計測法での測定結果を従属変数とした重回帰分析で、重回帰式に取上げられた要因と最適水準を示すと次のとおりである。

- 岩綿を攪拌する人：経験者
- 岩綿の油量：0.1°/wt
- ロータリバルブの回転数：大
- 岩綿の吐出量：小(4 kg/min)

「岩綿を攪拌する人」に関しては、ホップ内で岩綿のブリッジが生じないようにこまめに攪拌する人、すなわち経験者が最適とされた。「岩綿の油量」に関しては、油量が少ないと岩綿がからみあい、ほぐしにくくなるため、また油量が多いと岩綿同士がべたつきあい、吐出流量にばらつきが生じるものと考えられる。「ロータリバルブの回転数」に関しては、回転数の大小によってホップから吐出される岩綿がどのようになるかを示すと図一10のとおりである。回転数が小さくなると岩綿の吐出間隔が大きくなるとともに、岩綿の粒形が大きくなるため、ばらつきが大となると考えられる。「岩綿の吐出量」に関しては、吐出量が少ない方が多いときよりもばらつきは小さくなると思われるので、ほぼ妥当な結果といえる。

要因	最適水準	考	察
岩綿の油量	0.1°/wt	油の混入量により岩綿は次のような状態になる。 〔0.03 °/wt パサパサ状(繊維のからみが生じる) 0.1 " サラサラ状 0.2~0.3 " ベタベタ状(繊維が互いに粘着する)〕 油量が少ない場合および多い場合は岩綿が圧送中にほぐれにくくなり、ばらつきが大きくなると考えられる。	
岩綿の粒度	造粒綿	通常綿および細粒綿は形状に丸味がなく粒同士がからみ合い、フィーダーへの充填に不均一を生じる。これに対し造粒綿は粒同士のからみ合いが少なく、ホップ内での攪拌により容易にほぐれ、フィーダーへの供給が均一になると思われる。	
岩綿を攪拌する人	経験者	経験者はホップ内で岩綿のブリッジが生じないように、タイミング良く岩綿の送出口を攪拌棒で調整している。	
岩綿の吐出量	4kg/min	吐出量が少ない方がばらつきは少なくなると考えられる。	
ロータリバルブの回転数	大	回転数が多いと岩綿の吐出される間隔が小さくなり、岩綿の吐出量のばらつきが小さくなる。	

表一8 実験Iの分析結果のまとめ

2.4 実験Iのまとめ

以上の分散分析および重回帰分析の結果より、定常圧送性を図るための岩綿および圧送機の条件を総合的に判断して示すと表一8のとおりである。

§ 3. 実験II：定常圧送を得るための解綿ホップの改良実験

3.1 実験目的

吹付系耐火被覆工事のロボット化の目的の一つに§1.に記した省人化がある。吹付作業のロボット化とともに岩綿を供給するプラントの省人化も、重要な課題の一つである。

岩綿の供給プラントにおいて人手を要する作業としては、岩綿供給ホップへの岩綿の提供と、ホップ内にブリッジが生じないようにするための岩綿の攪拌作業とがある。後者についてはホップの改善により省人化が可能であり、かつスムーズに岩綿を供給することは岩綿の定常圧送性に関しても重要であることが実験Iにより分かったので、その検討を行なった。

実験IIでは、次の3つの実験を実施した。

Step 1: パイブレータをホップに取付けた場合の岩綿の供給性状の検討

Step 2: ホップに取付けたパイブレータの最適条件および岩綿の供給性状の検討

Step 3: パイブレータと攪拌翼とを組合わせた場合の岩綿の供給性状の検討

3.2 Step 1 実験

(1) 実験方法

実験Iで選定された岩綿を用い解綿ホップの側面の中央に、パイブレータ(型枠用パイブレータ KM 20-2P, 出力 200W, 振動数 2,850 VPM, 重量 12kg)を取付け、岩綿の攪拌方式の違いによる(有人, 無人, パイブレータ取付)吐出岩綿の流量のばらつきを測定した。本実験では、ロータリバルブの回転数は吐出量が 4 kg/min になるように調整した。

実験の組合わせは表一8に示すとおりである。実験はホップを岩綿でほぼ満杯にした状態で供給を

No.	実験の組合わせ				1分間当たり吐出量*1 (kg/min)			n*2
	岩綿の 粒度	岩綿の 油量 (%)	吐出量 (kg/ min)	攪拌方 法	平 均 (\bar{x})	標準偏差 ($\hat{\sigma}_{n-1}$)	変動係数 (%)	
1	造粒	0.1	4	人	4.06	0.898	22.12	12
2	"	"	"	無人	1.84	1.928	104.78	7
3	"	"	"	人	4.12	0.952	23.11	12
4	"	"	"	無人	1.96	2.144	109.39	6
5	"	"	"	人	3.88	1.036	26.70	13
6	"	"	"	パイ ブ レ ー タ	3.98	2.550	64.07	12
7	"	"	"	"	4.42	2.024	45.79	11
8	"	"	"	"	4.32	2.326	53.84	11

*1: 実験では30秒間の吐出量測定であったが、ここでは1分間の値に直している。

*2: 計算に用いたデータ数を示す(吐出量が0になる手前までの計測数)。

*3: パイブレータの状態は中央取付、加振力大、常時作動とした。

表一 9 岩綿の単位時間当たりの吐出量 (Step 1)

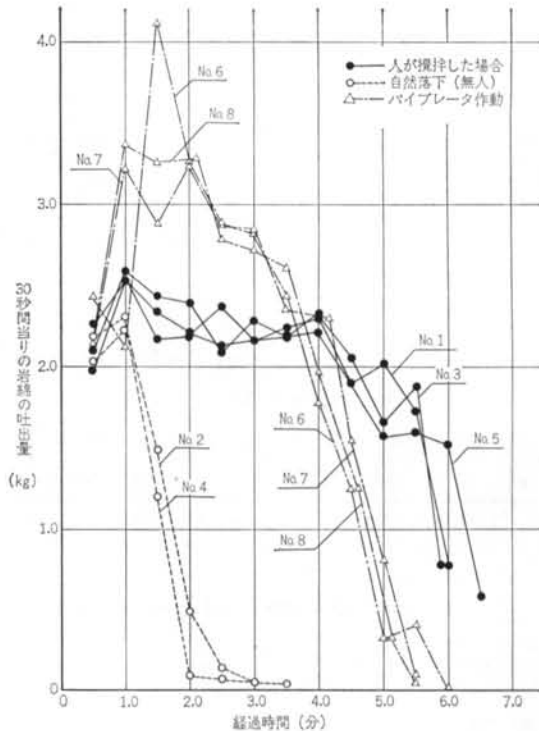
始め、岩綿が無くなるまで30秒間ずつ岩綿を捕集する方法で吐出岩綿の供給性状をとらえることとした。

吐出岩綿の流量の測定として、積分計測法(30秒間捕集方式)を採用した理由は次のとおりである。これは、ホッパ内の岩綿にブリッジが生じることなくスムーズに供給されるかどうかのチェックであるため、積分計測法を採用したものである。

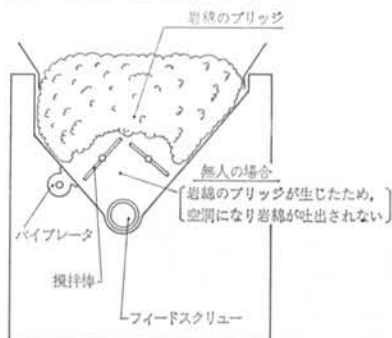
(2) 実験結果および考察

吐出岩綿の流量の計測結果は表一 9 に示すとおりである。30秒間の岩綿の吐出量と経過時間との関係を示すと図一 11 のとおりである。

安定供給の点からみると、人間が攪拌した場合が最も安定した吐出量を示しており、4分位までは2.0~2.5 kg/30sec を保っているが、それ以降はホッパ内の岩綿が減るため急激に減少している。無人の場合は1分まではほぼ人間が攪拌した場合の吐出量を示しているが、それ以降は図一 12 に示すようにホッパ内にブリッジが生じ急激に減少し、2.0~2.5分で吐出量がゼロになっている。一方、ホッパにパイブレータを取付けた場合は、1.0~2.0分の段階では人間が攪拌した場合よりも多い3.0 kg/30 sec の吐出量を示すが、それ以降は減少し5.5~6.0分で吐出量がゼロになっている。パイブレータの作動は岩綿のブリッジの破壊には有効であるが、吐出量の変動が大きく、十分とはいえない状態である。



図一 11 岩綿の吐出量の経時変化 (Step 1)



図一 12 ホッパの岩綿のブリッジの発生状況

3.3 Step 2 実験

(1) 実験方法

Step 1 の実験でホッパにパイブレータを取付けることにより、人間の攪拌による吐出状態に近づけることが可能であることが分かった。そこで本実験では、パイブレータの性状、すなわち「取付位置」「加振力」「作動方式」を可変要因として人間の攪拌による吐出量と比較し、パイブレータの最適条件を検討した。

実験の組合わせは、表一 10 に示すとおりである。吐出岩綿の流量の測定は Step 1 実験と同様に積分計測法で行なった。

(2) 実験結果および考察

No	実験の組合わせ			1分間当たり吐出量*1 (kg/min)			n*2
	取付位置	加振力	作動方式	平均 (\bar{x})	標準偏差 (σ_{n-1})	変動係数 (%)	
1	中央	小*3	常時	2.14	1.838	86.05	10
2	〃	〃	間欠	2.47	1.828	74.13	7
3	〃	大*3	常時	5.45	0.546	10.02	11
4	人間	攪拌		4.56	0.492	10.79	12
5	中央	大	間欠	4.32	1.222	28.29	13
6	前	〃	〃	5.24	0.452	8.63	14
7	〃	〃	常時	6.49	0.652	10.05	12
8	〃	小	間欠	2.37	2.042	86.16	9
9	〃	中*3	常時	4.89	0.806	16.48	13

*1: 実験では30秒間の吐出量測定であったが、ここでは1分間の値に直している。

*2: 計算に用いたデータ数。

*3: 加振力の大きさは振動力200kg, 中は150kg, 小は100kgである。

(付記)岩綿の条件は表-9と同じ造粒綿, 0.1°wt, 4 kg/minとした。

表-10 岩綿の単位時間当たりの吐出量 (Step 2)

Step 2			Step 3		
(要因)	(水準)	(カテゴリ -スコア)	(要因)	(水準)	(カテゴリ -スコア)
1. 取付位置	1. 前	0	1. 取付位置	1. 前	0
	2. 中央	0.1582		2. 中央	-0.6540
2. 加振力	1. 小	0	2. 加振力	1. 小	0
	2. 中	-0.8490		2. 中	-0.1440
	3. 大	-1.1228		3. 大	-0.3860
3. 作動方式	1. 間欠	0			
	2. 常時	-0.2133			
定数項		1.8683	定数項		1.3920

表-11 数量化I類の結果 (Step 2 および Step 3)

吐出岩綿の流量の計測結果は表-10に、また30秒間の岩綿の吐出量と経過時間との関係は図-13に示すとおりである。

実験要因の組合わせは表-10に示したように、実験の配列が系統だっていないので、岩綿吐出量のばらつきを従属変数として、割付要因の効果を見るために数量化I類で分析を行なった。その結果は表-11に示すとおりである。要因効果の大きい順に最適水準を示すと次のとおりである。

- 加振力: 大
- 作動方式: 常時
- 取付位置: 前

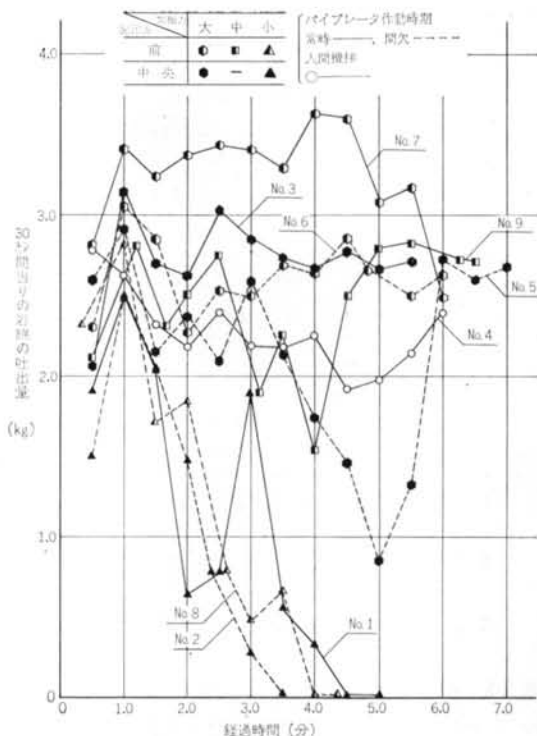


図-13 岩綿の吐出量の経時変化 (Step 2)

パイプレータの位置が、中央より前の方が良いという理由は次のように考えられる。攪拌棒の回転によって落された岩綿は、フィードスクリューによって送られるため、振動源はブリッジの生じ易い前の方が良いと思われる。しかし、ホップの前の位置にパイプレータを取付け加振力大の条件で実験中に、ホップの溶接部が破断するトラブルが発生した。そのため、このようなトラブルの生じない条件を設定する必要が生じてきた。

3.4 Step 3 実験

(1) 実験方法

Step 2 の実験で、パイプレータの条件としてホップの前の位置に取付け、加振力が大で常時作動が良いことが分かった。しかし、加振力が大きいとホップの溶接部が破損する恐れがあるため、本実験ではパイプレータの補助的役割をもつ攪拌翼(ロータ: 写真-4 参照)を取付け、パイプレータとの組合わせで吐出流量の検討を行なった。吐出岩綿の流量の測定は Step 1 および Step 2 実験と同様に積分計測法で行なった。実験の組合わせは表-12に示すとおりである。

(2) 実験結果および考察

吐出岩綿の流量の計測結果は表-12に、また岩綿の吐出量と経過時間との関係は図-4に示すとおりである。

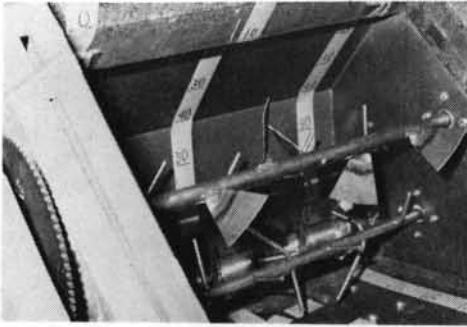


写真-4 攪拌翼の状況

Step 2 と同様に数量化 I 類で分析したところ、表-11に示すような結果が得られ、パイプレータの取付位置は前より中央が、また加振力は大の方が良かった。

加振力については図-14に示すように、攪拌翼とパイプレータの組み合わせにより、加振力が小でも人間攪拌とほぼ同等の岩綿の吐出量とばらつきが得られることが分かった(図-11および図-13の人間攪拌との比較)。

3.5 実験Ⅱのまとめ

Step 1~3 までの実験の検討により、解綿ホップにパイプレータと攪拌翼を取付けることによって、従来から行っていた岩綿の攪拌に要していた作業を無人化することが可能であることが確かめられた。

§ 4. 実験Ⅲ：現場施工実験

4.1 実験目的

実験Ⅰでは、岩綿の定常圧送性を図るための岩綿の選定と、圧送機の条件を見出した。また、実験Ⅱでは岩綿供給ホップの省人化を図るためのホップの改善を行なった。

本実験では上記の結果を受けて、東芝本社ビルで実際の鉄骨を用いて施工実験を行ない、吹付ロックウールに要求されている品質が満足されるかどうかの検討を行なったものである。また、吹付ロボット本体(SSR-2)もSSR-1に比べ走行距離センサや位置確認センサ等の改善を図っており¹⁾、その機能の検証も含めて品質の検討を行なった。

4.2 実験方法

定常圧送のために選定された岩綿を用い、改善した岩綿圧送装置を吹付ロボットに連結し、実建物の鉄骨梁を

No	実験の組み合わせ				1分間当たり吐出量*1 (kg/min)			n**2
	取付位置	加振力	作動方式	ローター	平均(̄)	標準偏差(̂ _{n-1})	変動係数(%)	
1	—	—	—	有	2.82	2.032	72.16	7
2	前	大	常時	〃	6.40	0.772	12.06	10
3	前	小	〃	〃	3.45	1.772	51.36	7
4	中央	小	〃	〃	4.86	0.504	10.37	14
5	中央	大	〃	〃	5.81	0.586	10.09	12
6	—	—	—	〃	3.31	1.654	49.97	6
7	前	小	常時	〃	4.42	1.246	28.19	9
8	中央	中	〃	〃	5.97	0.594	9.95	12

*1: 実験では30秒間の積分計測法であったが、ここでは1分間の値に直している。

*2: 計算に用いたデータ数を示す。

表-12 岩綿の単位時間当たりの吐出量 (Step 3)

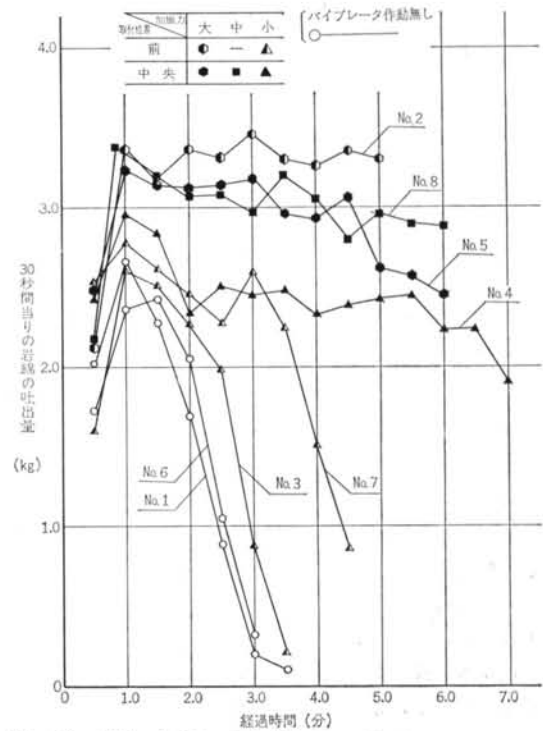
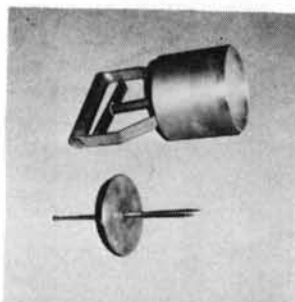


図-14 岩綿の吐出量の経時変化 (Step 3)

用いて吹付施工実験を行なった。梁を施工実験の対象としたのは、柱に比べて吹付精度を保つことが難しく(特に下フランジ先端)、梁の施工がクリアできれば他の部材は問題ないと判断されたためである。検討項目およびその内容は表-13に示すとおりである。吹付厚さおよび吹付密度は、写真-5に示すロックウール工業会製の測定用具を用いた。測定位置は図-15に示すように、各梁について吹付厚さは10箇所×各6点=60測定点、吹付

検計項目	検 討 内 容
吹付厚さ	(1)指定条件(2時間耐火 45mm 以上)に合格しているかどうか (2)ばらつき程度
吹付密度	(1)指定条件(0.3g/cm ³ 以上)に合格しているかどうか (2)ばらつき程度

表—13 検計項目および内容



写真—5 吹付厚さおよび密度測定治具
(上: 吹付密度用試料サンプリング治具)
(下: 吹付厚さ測定用治具)

密度は3箇所×各4点=12測定点とした。

吹付厚さは、吹付けられた合材のばらつきを見るため吹付けたままの状態での厚みを測定した。一方、吹付密度はコテ押え後の吹付材からサンプリングし、105℃で24時間乾燥後、重量と体積を測り密度を算出した。

4.3 実験結果および考察

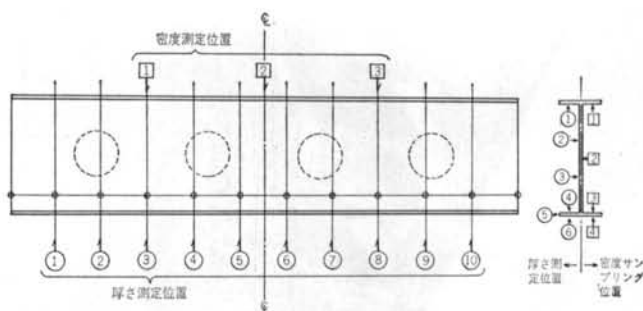
4.3.1 吹付厚さ

吹付厚さの測定結果をヒストグラムで示すと図—16のとおりである。この図には、比較のために SSR—1 (三田森ビル現場施工実験) の測定結果も示してある。

SSR—1 と SSR—2 の人間吹きでのばらつきを比較すると、吹付工や採用している岩綿が異なる等の違いもあるが(吹付施工会社が異なるため)、後の方が精度がよくなっている。ロボット吹きでの1倍速1回吹きと2倍速2回吹きのばらつきは、SSR—1 に比べ SSR—2 の方が少なくなっている。これは4.1で述べたように、岩綿の選定および解綿ホッパーの改善、さらにはロボット本体の改善等の効果によるものと考えられる。

2倍速2回吹きは圧送岩綿の不定常性を相殺しあい、ばらつきが少なくなると考えられたが、結果は逆であった。この点に関しては今後さらに検討する必要がある。

ロボット吹きの1.1倍速1回吹きのばらつきは、人間吹きでのばらつきの範囲に入っており、当初の目標がほぼ達成されたといえる。



図—15 吹付厚さおよび吹付密度の測定位置

4.3.2 吹付密度

吹付密度の結果は図—17に示すとおりである。吹付密度に関しては、吹付厚さと異なり平均値が規格値を下廻るといえる問題が生じている。この件は、通常の吹付ロックウールの工事においても現状、大きな問題になっている点である。

吹付密度は、岩綿とセメントの配合やコテ押えの方法によって大きく左右されるため、人間吹きとロボット吹きとの比較の前に根本的に解決しなければならない課題といえる。

4.4 実験Ⅲのまとめ

本実験のロボット吹きでの吹付厚さに関しては、SSR—1 に比べ改善が図られ、人間吹きに近い状態になったといえる。その理由としては、定常圧送性実験(実験Ⅰ)により選定された岩綿の使用、および圧送ホッパーの改良(実験Ⅱ)によるところが大きいと考えられる。また、吹付ロボット本体については、位置決め精度の向上やティーチングをし易くしたマニピュレータ・アームの軽動化等¹⁾の改良による効果もあるものと思われる。

吹付密度に関しては、平均値が規格値をクリアできない状態になっており、今後解決しなければならない問題といえる。

§ 5. おわりに

耐火被覆の吹付ロボットの開発は今回の SSR—2 の実験的検討により、吹付厚さに関しては熟練吹付工の吹付状態とほぼ同程度の性能が得られるまでになった。しかし、吹付密度に関しては吹付ロックウールの配合上の問題もある。また、密度を確保するためのコテ押え作業はロボット化を図る上でネックにもなっているため、根本的問題に立ち返って検討する必要がある。

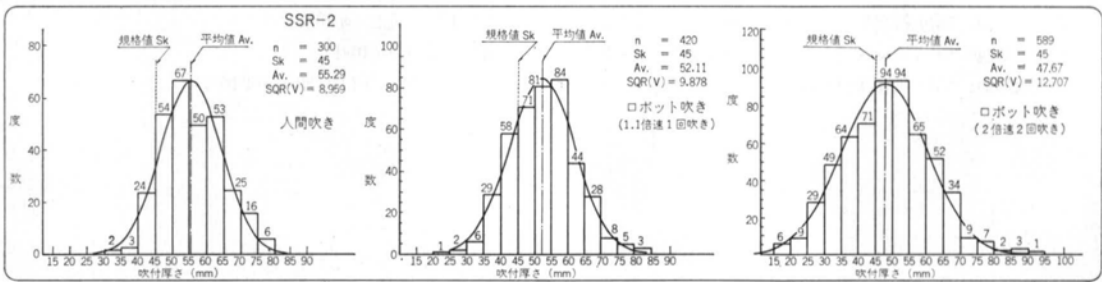
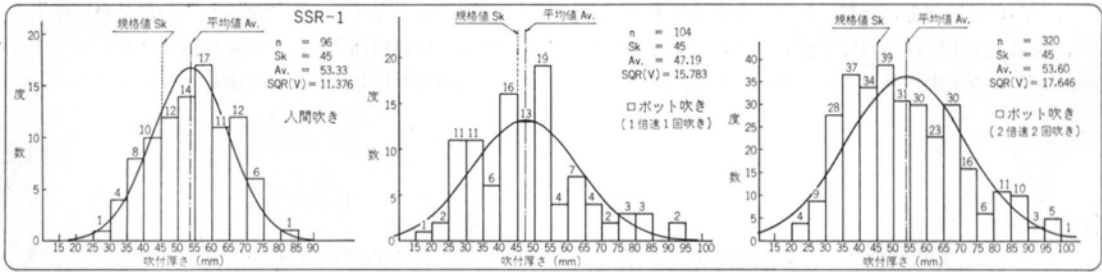


図-16 SSR-1 と SSR-2 による吹付厚さ (コテ押え前) の性状

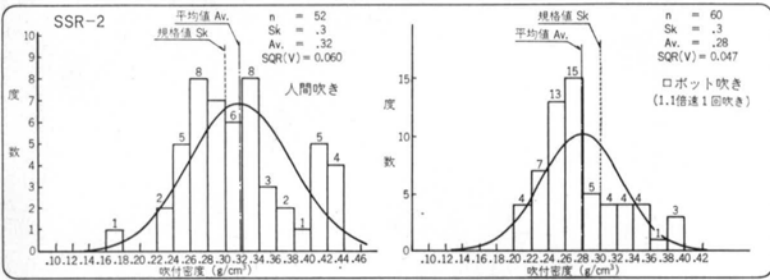
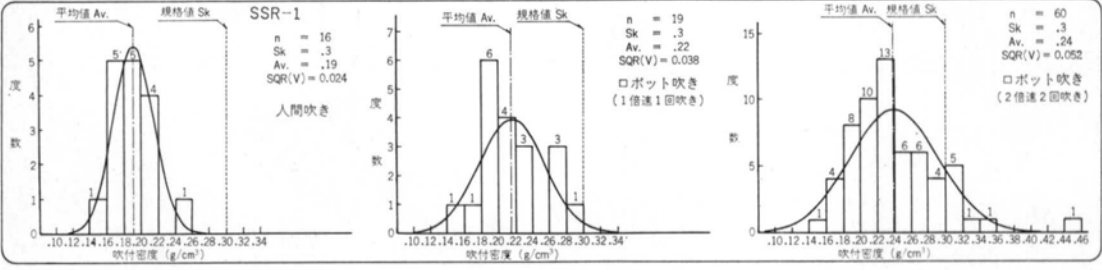


図-17 SSR-1 と SSR-2 による吹付密度 (コテ押え後) の性状

SSR-1 および SSR-2 の開発は、どちらも半年程度の期間で完成しなければならないという制約があったため、プレイバックロボットにしても吹付材料や圧送機についても、既製のものをベースにした開発に止まらざるを得なかった。そのため、新しい発想を盛込んだ革新的な技術開発に取り組むことができない状態であった。またコスト面においても実用化にもってゆけるような状態に

なっていないのが現状である。

本開発プロジェクトでは、これらの残された問題を解決するために開発の第3段階である SSR-3 の開発を進めている。SSR-3 のねらいは建設現場で使えるロボット、すなわち品質面でもコスト面でも現場で採用可能なものとするところにある。

最後に、本開発プロジェクトを推進するに当たって終

始あたにかいご助言をいただいた安田和義建築本部副本部長、現場施工実験においてご協力していただいた中村陽一 SKP 建設所現業長はじめ作業所の方々、吹付ロボット施工等に関してご協力していただいた神子史郎ニチアス株式会社材部主任、さらには開発プロジェクトのメンバーの方々に誌面をかりて謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 吉田他：“耐火被覆吹付けロボットの開発（その1）ロボットシステム” 清水建設研究報告 第39号（昭和59年4月）
- 2) 吉田他：“耐火被覆吹付けロボットの開発（その1）開発の目的とロボット” 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和58年9月）
- 3) 上野他：“耐火被覆吹付けロボットの開発（その2）ロボットによる施工” 同上（昭和58年9月）
- 4) 平林他：“耐火被覆吹付けロボットの開発（その3）作業測定” 同上（昭和59年10月）
- 5) 山崎他：“耐火被覆吹付けロボットの開発（その4）吹付けられた岩綿の品質” 同上（昭和59年10月）