

省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムの開発(その3)

－再飛散・モータ発塵・設備機器の低騒音化に関する検討－

長谷部 弥 山田 容子

(技術研究所)

(技術研究所)

Development of an Energy and Resource-saving-Air Cleaning System (part 3)

－Study on reentrainment of particles deposited on surfaces, particle generation from motors and noise reduction of fan coil units and fan filter units－

Hisashi Hasebe and Yoko Yamada

T&A システムの課題である堆積塵の再飛散、モータ発塵、設備機器の低騒音化について検討を行った。歩行による再飛散は堆積塵量の20～40%で気中濃度への影響は少ない。また、気流による再飛散は風速2m/sで開始され、T&A方式CRの気流(0.8m/s以下)では再飛散しない。モータからの発塵量は作業者の発塵量と比較して桁違いに少なく、対策により更に低減できる。騒音については、FCU・FFUの機器単体で10dB以上低減し、部屋全体で15dBの低減となった。

In this paper, particle generation, reentrainment of deposited particles and noise of equipment are examined. The amount of reentrainment of particles from walking is 20 to 40% of the amount of deposited particles, and there is little influence of the particle concentration on reentrainment. Moreover, it was clarified that the deposited particles disperse at an air velocity of about 2.0 m/sec or more, and the particles hardly re-disperse under the influence of air velocity (0.8 m/sec) in a T&A system cleanroom. The amount of generated particles from an electric motor is less than the amount of generated particles of worker's. The amount of generated particles decreases by less than one tenth by means of closing an opening of an electric cord and adding a small chamber through the shaft above the motor case. The noise value of FCU-FFU has been reduced by 10dB or more and the noise value of the room has been reduced by 15dB.

1. はじめに

半導体デバイスやフラットパネルディスプレイなどの電子デバイス製造クリーンルームは、1960年代初頭に実用化されて以来その基本構造(空気循環のための床・壁・天井の2重構造)に変化がなく、建設資材を多量に消費している。また、クリーンルーム(以降、CR)に供給するすべての空気をHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタやULPA(Ultra Low Penetration Air)フィルタなどで清浄化するために、清浄化設備と熱処理設備がダクト等で連結されており、空気搬送に多大なエネルギーを消費している。

筆者らはCRの省エネ・省資源を目的として、従来方式と異なる空調システム「タスク&アンビエントクリーン空調システム(以降、T&A方式)」を開発し、従来FFU(Fan Filter Unit)方式と比較して清浄化性能が高く¹⁾、建設段階と運用段階のCO₂排出量が半分程度に削減されることを報告²⁾してきた。

T&A方式では、床がグレーチングではなくコンクリート(長尺シートなどによる仕上げ)であり、システム天井やリターンシャフトがなくダクト・配管・設備機器(以降、ダクト等)がCR内に露出で設置されているため、床やダクト等の堆積粒子が人の移動や気流の変動により再飛散し、製品歩留まりに悪影響を与えるのではないかと懸念があった。また、熱処理設備のFCU(Fan Coil Unit)からの発塵が懸念されていた。これらの課題に対して、実CRで実験的に検討を行い、再飛散や発塵があっても気中粒子濃度にほとんど影響がないことを報告¹⁾してきたが、なぜそうなるかが明らかでなかった。さらに、作業者の適正な作業環境維持のため、FCU・FFUの低騒音化が課題であった。

本報では、床堆積塵の歩行による舞い上がり現象、気流による堆積塵の再飛散現象、モータからの発塵機構とその対策に関して詳細な検討を行った。また、FCU・FFUの低騒音化を実現した。

2. 床堆積塵の歩行による舞い上がりに関する検討

床堆積塵は、汚染制御の観点からよく問題視されるが、床堆積塵の歩行による舞い上がり、堆積塵の挙動について CR を対象とした研究例は無い。そのため、まず、舞い上がり量を含めた歩行時の総発塵量を測定し、床堆積塵舞い上がりの影響を検討した。次いで、T&A 方式 CR 内で、堆積塵床を歩行した場合の生産装置への影響を検討した。

2.1 床堆積塵の測定

2.1.1 測定方法

堆積塵の舞い上がり量を気中粒子濃度で評価したく、堆積塵量を光散乱式粒子計数器(以降、PC)で測定する方法を検討した。既往研究として PC と直結させて測定する方法³⁾があるが、ここでは効果的に堆積塵を測定する方法として、**図-1**に示すように、測定面積 12cm²に対して風速 130m/s の清浄な高速空気を吹きつけ堆積塵を吹き飛ばし、脱離した粒子を PC(LASAIR II 310、PMS、吸引流量 28.3L/min)で吸引した。測定個数(粒径 0.3μm 以上)が 1 ケタになるまで測定を繰り返し、総粒子数を求めた。測定台の側面に FFU を置いて雰囲気的清浄にした。

2.1.2 堆積塵検出率

上記測定方法の堆積塵検出率は、ガラス板及び塩ビシートを外気及び室内に静置し微小粒子を堆積させ、吹き飛ばし前後の付着粒子数を顕微鏡(倍率 100~1000 倍)で観察し、式(1)により算出した。付着粒子数は、0.31×0.23mm の視野を 4 か所観察し、粒径 1μm 以上の粒子を計数した。**表-1**に算出結果を示す。平均検出率は 76.7%であった。

$$D = \frac{N_b - N_a}{N_b} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 D : 堆積塵検出率[%]、 N_b : 吹き飛ばし前の付着粒子数[個]、 N_a : 吹き飛ばし後の付着粒子数[個]である。

2.2 総発塵量による堆積塵舞い上がり量の評価

2.2.1 実験方法

1) 実験条件及び測定概要

図-2に示す歩行者発塵測定箱を用いて、歩行による総発塵量を測定した。測定箱の天井面に FFU を設置し、床はグレーチングとした。FFU から供給された清浄空気は、グレーチング下の側面に接続されたダクトから排出される。グレーチングの中央部

表-1 堆積粒子検出率

試験条件	堆積シート	吹き飛ばし前付着粒子数[個]	吹き飛ばし後付着粒子数[個]	検出率[%]
外気放置	ガラス板	273	43	84.1
	塩ビシート	102	28	72.3
室内放置	ガラス板	79	23	71.1
	塩ビシート	60	13	79.2
平均検出率				76.7

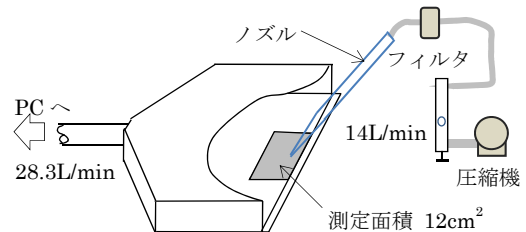


図-1 堆積塵量測定装置

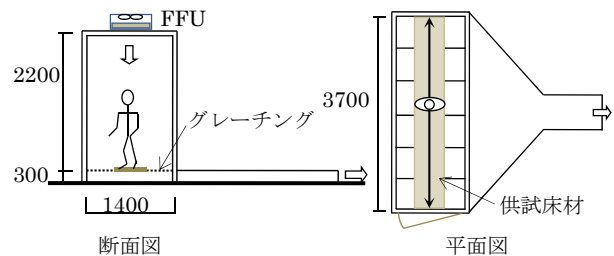


図-2 発塵量測定箱

には粒子を堆積させた供試床材(幅 500mm)を敷き、クリーンスーツ着用被験者が 80 歩/min のスピードで床材上を往復歩行し、排出空気中の粒子濃度(粒径 0.3μm 以上)を PC (LASAIR II 310、PMS)で測定した。測定結果と排出空気量(13.4m³/min)の積より歩行による総発塵量を求めた。粒子を堆積させない清浄床歩行時の発塵を歩行による人からの発塵と考え、堆積塵床歩行時の発塵との差を床からの舞い上がりとした。PC による測定は 44 秒/回で行い、歩行なし時 2 回、歩行中 10 回、歩行なし時 5 回、歩行中 10 回、歩行なし時 5 回の計 32 回を連続測定し、実験 1 工程(1,408 秒、約 23 分)とした。

2) 供試床材と粒子の堆積法

供試床材は、帯電防止用長尺シートを用いた。この床材を、屋根のある半屋外(外気暴露)、及び室内(室内暴露、中性能フィルタで外気塵除去)に、数時間~2 日間静置し、粒子を堆積させた。

2.2.2 実験結果

図-3に歩行時の発生粒子濃度の測定結果、**図-4**に歩行実験前後の堆積粒子数を示す。外気及び室内に暴露した床の堆積塵量は清浄床に対して、500~1000 倍高いが、発生粒子濃度は約 2 倍である。これは歩行による発塵量に対し、舞い上がり量が少な

いためである。100歩/minの高速歩行実験ではこの傾向は顕著になり、清浄床歩行と堆積塵床歩行での発生粒子濃度はほとんど変わらず、堆積塵の舞い上がりの気中濃度への影響は明確ではない。

堆積塵の行方を推定するために靴底に付着する塵埃量を次式より算出した。

靴底付着量=(堆積粒子数-残留堆積粒子数)・(堆積塵歩行時総発塵量-清浄床歩行時総発塵量)

表-2に堆積塵量で基準化した靴底付着量算出結果を示す。堆積塵の21~39%が気中に放出され、12~37%が床に残留し、靴底に42~49%付着して床から除去される。

2.3 T&A方式CR内における堆積塵舞い上がりの影響評価

2.3.1 実験方法と条件

図-5に示すようにCR中央部に供試床材(幅500×10800mm)を敷き、クリーンスーツ着用被験者が90歩/minで往復歩行した。靴底は実験前に洗浄した。実験1工程で、歩行なし時2回、歩行中10回、歩行なし時5回、計17回の連続測定を行った。

測定点は、堆積塵の舞い上がり検出のため足元測定点(床上75mm)を堆積塵床の左右⑤⑥、生産装置への影響確認のためミニエン上部①④、装置間③、空間の平均濃度測定のためFCU吸込口②の合計6点とした。足元発塵確認実験は床材1.8mで行い、他は床材10.8mとした。供試床材と堆積法は前述と同じである。表-3に実験パラメータを示す。

2.3.2 実験結果および考察

図-6、図-7、図-8に名目換気回数17回/h、加熱なし条件の結果を示す。この条件における堆積塵量は、清浄床では、実験前69個/12cm²、実験後90個/12cm²、堆積塵床は実験前4,763個/12cm²、実験後1,555個/12cm²であり、実験後においても清浄床の実験後の17倍の塵埃が残留していた。

図-6に示すように、足元測定点の粒子濃度は、堆積塵床は清浄床より約1.5倍の濃度であり、堆積塵が歩行により床から舞い上がり空間へ放出されている事実を把握できた。図-7に示すように、ミニエン上部①の濃度は、清浄床と堆積塵床は同等であった。T&Aクリーン空調の作り出す気流形状⁴⁾、及び堆積塵発塵量が少ないため、ミニエン上部の濃度変化は無い。図-8に示すように、空間の平均濃度を示すFCU吸込口②でも、清浄床と堆積塵床の差異は見られない。表-4に実験結果(歩行時粒子濃度の平均)を示す。これを分散分析し、表-5が得られた。要因A[床の汚染]は、誤差の範囲内であり、

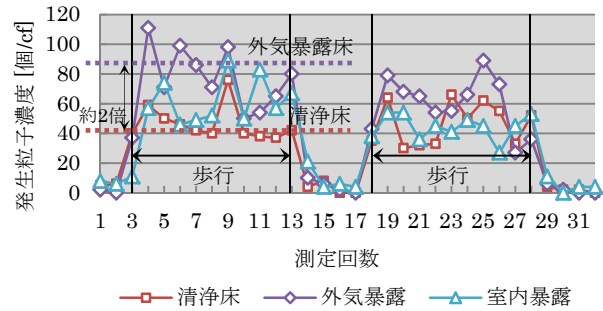


図-3 歩行時の発生粒子濃度

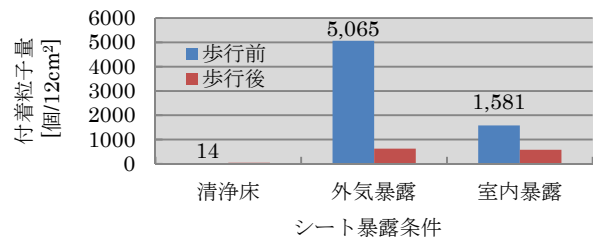


図-4 歩行実験前後の堆積粒子数

表-2 実験結果

項目	清浄床歩行時 総発塵量 [個]	堆積塵床歩行時			
		外気暴露床		室内暴露床	
		測定結果 [個]	比 [-]	測定結果 [個]	比 [-]
堆積粒子数		7,597,784	1.00	2,372,229	1.00
残留粒子数		936,767	0.12	872,229	0.37
除去粒子数		6,661,017	0.88	1,500,000	0.63
総発塵量	6,276,900	9,205,700	—	6,777,400	—
気中に発生した粒子数		2,928,800	0.39	500,500	0.21
靴底付着量		3,732,217	0.49	999,500	0.42

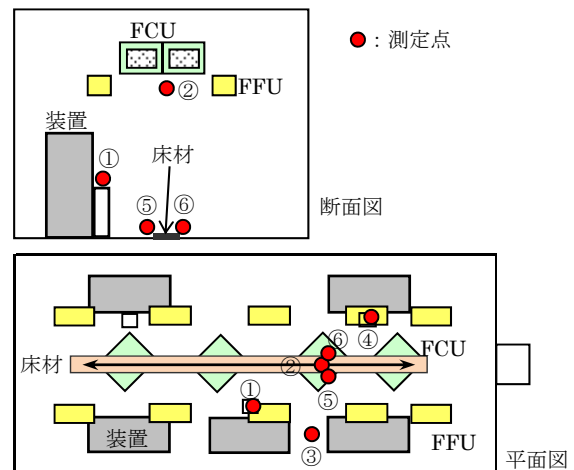


図-5 T&A方式CRと測定点

表-3 実験パラメータ

要因	水準
A:床の汚染	A1:清浄床、A2:堆積塵(外気暴露)
B:換気回数	B1:17回/h、B2:35回/h
C:加熱の有無	C1:なし、C2:600W/m ²
D:歩行者	D1、D2
E:測定点	E1:①、E2:④、E3:③

床堆積塵があっても生産装置への影響は無いといえる。

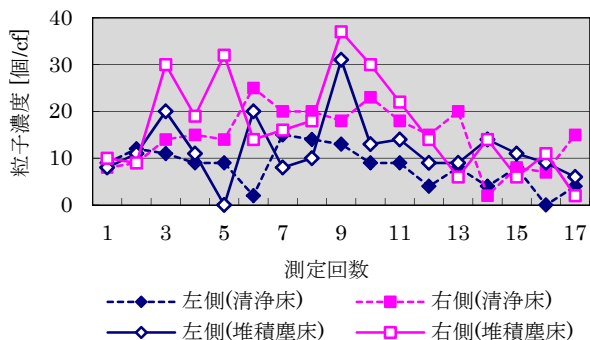


図-6 歩行時の足元⑤⑥における粒子濃度

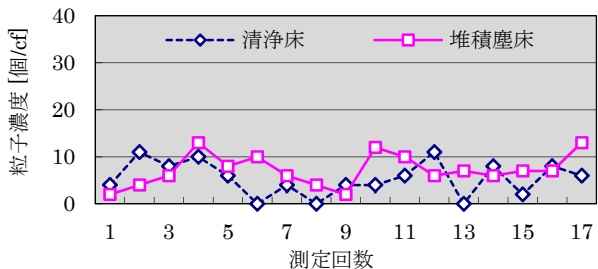


図-7 歩行時のミニエン上部①における粒子濃度

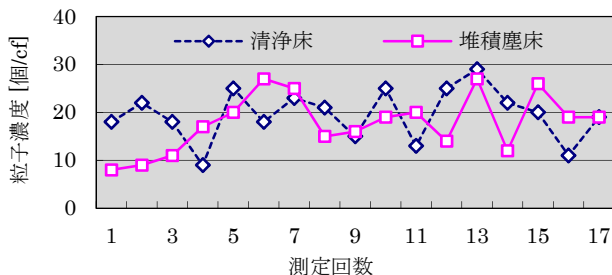


図-8 歩行時のFCU吸込口②における粒子濃度

分散分析表より効果の大きい要因は、B 換気回数、E 測定点、C 加熱の有無である。しかし、表-4の結果は、20 個/cf 以下(粒径 0.3 μ m 以上)であり、循環換気回数(設定清浄度：1,000~100,000 個/cf)を考慮すると、問題にならないレベルである。

2.4 まとめ

清浄床と堆積塵床を歩行し発生粒子濃度を測定した。濃度は最大2倍で、堆積塵の気中濃度への影響は少ない。高速歩行では歩行による発塵が多く、気中濃度への影響は確認できなかった。

T&A方式CRにおいて、歩行時の生産装置への影響を検討し、堆積塵床歩行と清浄床歩行の影響が同等であることが明らかになった。

3. 堆積粒子の気流による再飛散に関する検討

床堆積塵の歩行による舞い上がりと同様に、CR内の堆積粒子の気流の影響による再飛散もよく問題視されるが、CR内の堆積粒子の再飛散に関する研

表-4 実験結果 (個/cf、粒径 0.3 μ m 以上)

		B1				B2			
		C1		C2		C1		C2	
		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	A1	5.3	5.5	7.3	5.8	1.2	1.0	5.6	3.1
	A2	7.7	7.1	5.9	6.3	1.8	2.0	2.3	3.3
E2	A1	5.5	9.4	8.5	9.5	3.9	3.1	3.5	3.5
	A2	6.3	3.7	7.0	9.0	3.8	4.3	3.6	3.3
E3	A1	9.9	9.9	10.7	10.0	3.4	4.9	4.5	4.2
	A2	8.7	8.7	11.7	13.9	3.8	3.7	6.5	5.6

表-5 分散分析表

要因	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	0.02	0.02			
B	1	240.32	240.32	140.23**	238.61	58.1
C	1	18.76	18.76	10.95**	17.05	4.2
D	1	0.13	0.13○			
E	2	77.61	38.81	22.64**	74.18	18.1
A×B	1	0.22	0.22○			
A×C	1	0.25	0.25○			
A×D	1	0.01	0.01○			
A×E	2	3.56	1.78○			
B×C	1	0.69	0.69○			
B×D	1	0.79	0.79○			
B×E	2	11.4	5.70○			
C×D	1	0.04	0.04○			
C×E	2	1.61	0.81○			
D×E	2	1.51	0.76○			
e	27	53.46	1.98			
e' (プール○)	43	73.69	1.71			
合計	47	410.38				

究はほとんど行われていない。そこで、ダクト等の堆積粒子の再飛散に関して、ガラスビーズ(以降、GB)などの標準粒子や大気塵(以降、APM)を吹き飛ばすことにより、飛散開始条件を実験的に求めた。また、その結果から、気流による抗力と粒子に働く付着力に関して理論的な検討を行った。さらに、T&A方式CRの気流速度的実測結果から堆積粒子の再飛散に関する考察を行った。

3.1 実CRでの堆積粒子の飛散

実CRにおいて、浮遊微粒子が自然に堆積した梁(目視で確認できるぐらい堆積量が多い)をFFU吹出口30cm下に配置して吹出し気流(0.28~0.42m/s)をあてて堆積粒子の飛散の有無をPC(LASAIR II 110、PMS)を用いて1時間以上にわたって確認したが(図-9)、0.1 μ m以上の微粒子の飛散は確認できなかった。

堆積面近傍は、空気の粘性の影響を強く受ける境界層であり、境界層内の堆積面のごく近傍では、粘性の作用が支配的な粘性底層が存在するため、粒子近傍の風速が遅くなり、飛散させる力が不足すると考えられる。

以上のことから、粘性底層内の風速・気流による抗力・粒子に働く付着力に着目し、気流の影響による堆積粒子の再飛散について検討を行った。

3.2 粒子吹き飛ばし実験

3.2.1 実験方法

図-10 に実験装置の概要を示す。堆積粒子が飛散する風速を求めるため、実験ダクト内に粒子を堆積させた平板(90mm×300mm)を配置して、一方から HEPA フィルタを通した清浄空気を供給し、堆積粒子を吹き飛ばした。実験ダクトの反対側で PC により飛散粒子をカウントし、粒子をカウントした時の風速を飛散開始風速とした。平板の種類はアルミ板・塩ビ板とした。堆積粒子は GB(5 μ m、20 μ m、30 μ m、60 μ m、100 μ m)・石松子(35 μ m)・APM とした。粒径 5 μ m の GB は GB(5)と表記する。同様に 20 μ m は GB(20)、30 μ m は GB(30)、60 μ m は GB(60)、100 μ m は GB(100)と表記する。石松子(日本粉体工業技術協会の標準粉体)は、中位径 28.64 μ m、粒子密度 1.05g/cm³の粉体である。

実験ダクトの中心風速を 0.3m/s から 7.5m/s まで 16 段階(0.3m/s、0.5m/s から 7.5m/s まで 0.5m/s ピッチ)で増大させた。飛散粒子の計測は、サンプリングチューブを平板の下流側近傍に配置して、大粒径用 PC(LC-20、リオン)と微粒子用 PC(LASAIR II 110、PMS)で同時に行い、風速 1 段階あたり 5 回計測を行った。実験は温度 18~22℃、相対湿度 30~40% の雰囲気で行った。相対湿度 40%以下では液架橋力の影響は小さくなる。また、静電気の影響を小さくするためアースをとった。

3.2.2 粒子の堆積方法と堆積粒子数の測定方法

1) GB・石松子

堆積箱(0.4m×0.4m×1mH)上部に粒子を入れた小皿を配置し、圧縮空気で吹き飛ばした。吹き飛ばし後、1~12 時間放置し、堆積箱下部に静置した平板に沈降・堆積させた。なお、圧縮空気は、ろ過度 0.01 μ m のオイルミストフィルタによりろ過されたものを使用し、吹き飛ばし時にオイルミスト等により付着力が増すことがないように考慮した。

粒子堆積時にスライドグラスも配置し、粒子を堆積させた。スライドグラス上の堆積粒子数を顕微鏡で計数し、面積倍して平板上の堆積粒子数とした。

堆積した粒子数は、GB(5) : 1,000,000~1,500,000 個/板、GB(20) : 400,000~500,000 個/板、GB(30) : 500,000~700,000 個/板、GB(60) : 300,000 個/板、GB(100) : 100,000 個/板、石松子 : 2,000,000~3,000,000 個/板であった。

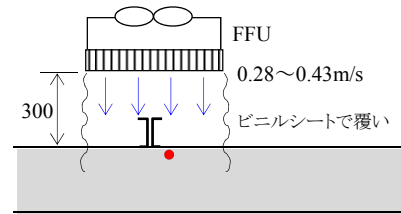


図-9 堆積塵の再飛散確認実験

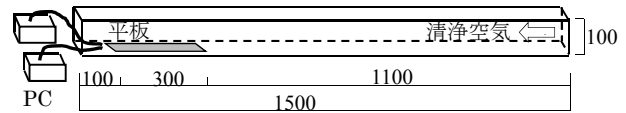


図-10 吹き飛ばし実験装置

2) APM

平板を室内の床面に 2 週間から 2 ヶ月間静置し、室内の浮遊粒子を自然に沈降・堆積させた。平板を静置した室はほとんど使用されることがなく静穏な状態で、空調は中性能フィルタでろ過した外気を供給するシステムとなっている。

複数枚の平板に同時に APM を堆積させ、そのうちの 1 枚の堆積粒子数を図-11 に示す堆積粒子計数装置を用いて同じ方法で計数した。平板 1 枚当たり 3 か所で計数して測定対象エリア面積当たりの平均堆積粒子数を求め、面積倍して平板に堆積した粒子数を求めた。

平板 1 枚当たりの粒子数は 1,400,000~3,000,000 個で、粒径は 0.3 μ m が 48~51%、0.5 μ m が 30~32%、1 μ m が 2%、5 μ m が 0~1%であり、ほとんどが 1 μ m 以下であった。

3.2.3 実験結果

実験ダクト内のレイノルズ数は、約 2,000 (0.3m/s)~33,000 (5.0m/s)で、風速 0.3m/s では層流、それ以上の風速では乱流であった。図-11 に実験結果を示す。横軸に平板の材質と堆積粒子の種類を示し、縦軸に飛散開始風速(ダクト中心)を示す。複数回の実験を行ったものは平均値と最大値・最小値をエラーバーで示す。アルミ板と塩ビ板の違いは見られなかった。GB(5)・GB(20)は、ダクト中心風速が 4.0~7.5m/s で飛散が確認された。同様に、GB(30)・GB(60)・GB(100)は 2.5m/s~5.0m/s、石松子は 2.0m/s~3.0m/s、APM は 3.5~4.5m/s であった。GB は粒径が大きい方が飛散開始風速(ダクト中心)が遅く、粒径が小さくなるにしたがい飛散開始風速(ダクト中心)が速くなる傾向がある。ほぼ同じ粒径の GB(30)と石松子を比較すると、GB(30)は 4.5~5.0m/s、石松子は 2.0m/s~3.0m/s で、GB(30)の方が、飛散開始風速(ダクト中心)が速い結果となった。

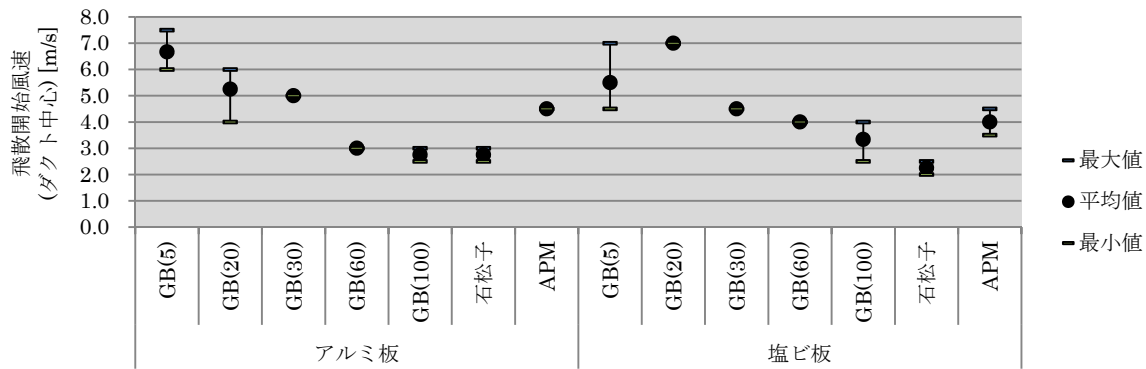


図-11 堆積粒子吹き飛ばし実験結果

3.3 考察

3.3.1 堆積粒子に働く力

堆積粒子に働く力には、粒子を動かす力として気流による抗力(F_W)と粒子をとどめる力として表面への付着力(F_{ad})がある。堆積粒子が気流により飛散するかどうかは、この F_W と F_{ad} の大小関係に影響される(図-12 参照)。この比を α とすると以下の式で表せ、 α がある値より大きい場合に飛散し、それ以下の場合には飛散しないと考えられる。

$$\alpha = \frac{F_W}{F_{ad}} \quad (2)$$

ここに、 α : 抗力・付着力比[-]、 F_W : 気流による抗力[N]、 F_{ad} : 付着力[N]である。

CR を検討対象としているので、対象とする堆積粒子の粒径は大きくても $100\mu\text{m}$ 以下として差し支えない。粒子の付着表面から $100\mu\text{m}$ の空間は粘性底層であり、気流による抗力は粘性底層内の風速から算出できる。

粒子に働く表面への付着力はファンデルワールス力(以降、VW 力)、重力、静電気力、液架橋力などがあるが、吹き飛ばし実験で影響を緩和した静電気力と液架橋力は無視し、VW 力と重力を考慮する。

3.3.2 粒子に働く気流による抗力

1) 実験ダクト内の気流

吹き飛ばし実験では、ダクト中心風速が 0.5m/s 以上ではダクト内流れが乱流であったので、乱流の場合について考察する。

プラントルの混合距離理論では、粘性底層内の平均風速分布は表面からの距離に比例し、下式で表される。

$$u = \frac{u_\tau^2}{\nu} y \quad (3)$$

ここに、 u : 平均速度[m/s]、 u_τ : 摩擦速度[m/s]、 y : 壁面からの距離[m]、 ν : 動粘性係数[m²/s]である。

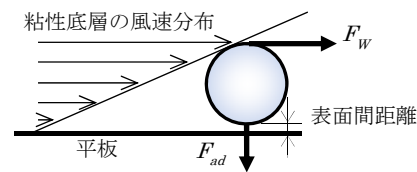


図-12 粒子に働く力

ここで、 u_τ は摩擦速度で $u_\tau = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ で表される。壁面の摩擦応力 τ_0 を求めれば、任意の位置 y における粘性底層内の風速 u を求めることができる。

τ_0 は、ダルシーワイズバッハの式と管内圧力損失と壁面摩擦力の釣合いから、下式で表される。

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{4} \frac{\rho u^2}{2} \quad (4)$$

ここに、 τ_0 : 壁面の摩擦応力[kg/m²]、 λ : 管摩擦係数[-]、 ρ : 流体の密度[kg/m³]である。

ここで、 λ は管摩擦係数で流れのレイノルズ数により以下のように分けられる。

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (3 \times 10^3 < \text{Re} < 1 \times 10^5) \quad (5)$$

Blasius の式

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}} \quad (1 \times 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^6) \quad (6)$$

Nikuradse の式

ここに、 Re : レイノルズ数[-]である。

Re は管内流れのレイノルズ数で下式のように表される。

$$\text{Re} = \frac{DV}{\nu} \quad (7)$$

ここに、 D : 管の直径[m]、 V : 管内の平均風速[m/s]である。

なお、角ダクトの場合、管の直径 D は相当直径 De で下式により表される⁶⁾。

表-6 粒子に働く気流抗力

粒子の種類	GB(5)	GB(20)	GB(30)	GB(60)	GB(100)	石松子	APM
気流抗力[N]	3.028×10 ⁻¹¹	4.329×10 ⁻¹⁰	6.46×10 ⁻¹⁰	1.582×10 ⁻⁹	3.162×10 ⁻⁹	2.997×10 ⁻¹⁰	1.46×10 ⁻¹³

$$De = 1.3 \times \frac{(ab)^{0.625}}{(a+b)^{0.25}} \quad (8)$$

ここに、 De : 相当直径[m]、 a : 長辺長さ[m]、 b : 短辺長さ[m]である。

以上の式(3)～式(8)から、流体密度(20℃の空気)1.2 kg/m³、動粘性係数(20℃の空気)1.5×10⁻⁵ m²/s、相当直径 0.109 m(100mm×100mm)の場合に、ダクト中心風速(1.5m/s、3.5m/s、5.5m/s、7.5m/s)を変化させて粘性底層内の風速分布を算出した結果を図-13に示す。粘性底層内の風速はダクト中心風速の1/100～1/5000と非常に遅くなることが分かる。また、吹き飛ばし実験で求めた各粒子の飛散開始風速(ダクト中心)から飛散開始風速(粒子上端)を算出した結果も合わせて図-13に示す。APM(粒径は0.5μmとした)は粒子上端の風速が0.001～0.003m/sで飛散している。同様に、GB(5)では0.02～0.05m/s、GB(20)では0.05～0.2m/s、GB(30)・GB(60)では0.1～0.2m/s、GB(100)では0.1～0.4m/s、石松子では0.03～0.08m/sであった。粒径が大きくなるほど、飛散開始風速(粒子上端)が速くなる傾向がある。

2) 気流による抗力

直径 d_p の粒子に風速 u のような気流が当たる場合の気流による抗力は次の式で表わせる。

$$F_W = C_D \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \frac{\rho u^2}{2} \quad (9)$$

ここに、 C_D : 抵抗係数[-]、 d_p : 粒径[m]、 ρ : 流体密度 1.2 kg/m³、 u : 風速[m/s]、 μ : 粘性係数 1.8×10⁻⁵ Pa·s である。

C_D は粒子レイノルズ数により、ストークス、アレ、ニュートンの各関数で表される。

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (Re < 2) \quad (\text{Stokes の式}) \quad (10)$$

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re}} \quad (2 < Re < 500) \quad (\text{Allen の式}) \quad (11)$$

$$C_D = 0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re}} \quad (500 < Re < 10000) \quad (12)$$

(Newton の式)

Re は粒子のレイノルズ数で、次の式で表される。

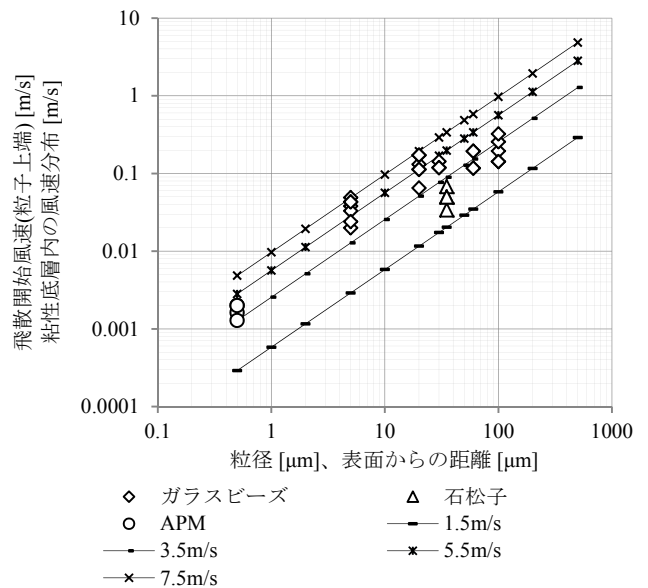


図-13 粘性底層内の風速分布と飛散開始風速(粒子上端)

$$Re = \frac{u d_p \rho}{\mu} \quad (13)$$

以上の式(9)～式(13)から、流体密度(20℃の空気)1.2 kg/m³、粘性係数(20℃の空気)1.8×10⁻⁵ Pa·sとして、吹き飛ばし実験で粒子が飛散した時の風速から算出した F_W を粒子の種類ごとに平均して表-6に示す。粒径 0.5～100μm では 1.0×10⁻¹³～1.0×10⁻⁸ Nの F_W が粒子に働いていることが分かる。式(9)は宙に浮いた粒子に一樣な気流が当たった場合の抗力を求める式であるが、現実には、粒子は表面に付着しており気流は図-12に示すように粘性底層の影響で勾配のある分布で一樣ではない。本論文では、粒子頂部の風速を用いて抗力を計算しているため、実際より大きく算出されていることになる。

3.3.3 堆積粒子に働く付着力

堆積粒子に働く付着力として、VW力と重力を考慮する。

球形粒子と表面の間に働くVW力は次の式で表される。

$$F_V = \frac{A d_p}{12z^2} \quad (14)$$

ここに、 F_V : VW力[N]、 A : Hamaker定数 1.57×10⁻¹⁹ J (アルミ-ガラス)、 z : 表面間距離 4.0×10⁻¹⁰ m である。

粒子に働く重力は次の式で表される。

$$F_g = mg \quad (15)$$

ここに、 F_g : 重力[N]、 m : 質量[kg]、 g : 重力加速度 9.8 m/s^2 である。

図-14 に Hamaker 定数 $A=1.57 \times 10^{-19} \text{ J}$ (アルミとして Al_2O_3 の値で $A1=1.65 \times 10^{-20} \text{ J}$ 、ガラスとして SiO_2 の値で $A2=1.5 \times 10^{-20} \text{ J}$ から $A=\sqrt{A1 \times A2}$ として計算した)、表面間距離 $z=4.0 \times 10^{-10} \text{ m}$ (一般的に言われている原子間距離 δ) として式(14)より計算した粒径ごとの F_V と式(15)より計算した3種類の密度(石松子: 1.05 g/cm^3 、GB: 2.5 g/cm^3 、鉄: 7.87 g/cm^3)の粒子に働く F_g を示す。粒径 $100 \mu\text{m}$ 以下では F_g より F_V の方が約3桁以上大きく付着力としては F_V が支配的である。また、図-14 に粒子が飛散した時の風速から算出した F_W も合わせて示す。30~100 μm では F_W は F_g と同等であり、0.5~20 μm では F_W は F_g より約1~2桁大きい値である。

図-15 に粒子飛散時の風速から算出した F_W と F_{ad} (F_V と F_g の合計)を示す。飛散時の気流による抵抗力は、付着力の約2乗に比例することが分かる。

3.3.4 抵抗力・付着力比

図-16 に粒子飛散時の F_W と F_{ad} から式(2)により計算した抵抗力・付着力比 α と粒径の関係を示す。 α は複数回行った実験の平均値を示している。粒子の種類によりばらつきはあるが、粒径と α は線形関係にあることが分かる。

α は静止摩擦係数を意味するが、傾斜法により実験的に求めた静止摩擦係数より約2ケタ小さい値であった。この違いの理由を明確にするために、図-17 に示すように小紙片に GB(30) を多数付着させ、傾斜法により静止摩擦係数を求め、 F_g と F_V のみを考慮し表面間距離(z)を算出した。現実的には F_g と F_V 以外に液架橋力・静電気力等が働いているため、これらの力を F_V とした場合、 F_V は現実よりも大きな力となり表面間距離は最初に計算に使用した $4.0 \times 10^{-10} \text{ m}$ (0.4nm) よりも小さく算出されるはずであるが、 $z=135 \sim 580 \text{ nm}$ となった。このことから、実際の表面間距離は、GB やアルミ板の表面の凹凸や介在物等の要因により理論値よりも大きくなっており、結果として F_V は理論値より小さくなっていると考えられる。

3.4 実CRの堆積微粒子の再飛散に関する考察

T&A方式CRにおいて、ダクト等が露出で設置されている空間上部の風速の実測値は最大で 0.8 m/s

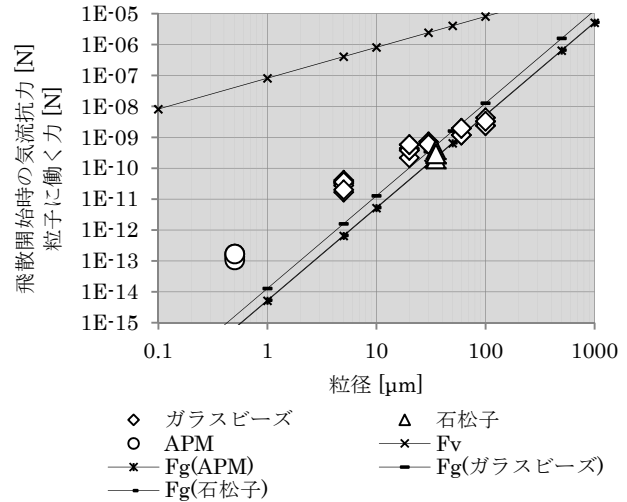


図-14 粒子に働くVW力と重力の比較

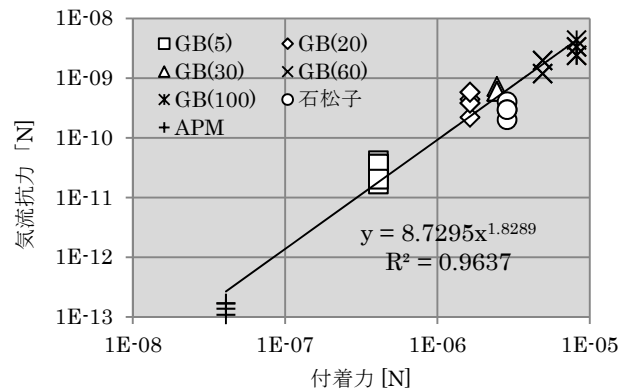


図-15 気流抵抗力と付着力の関係

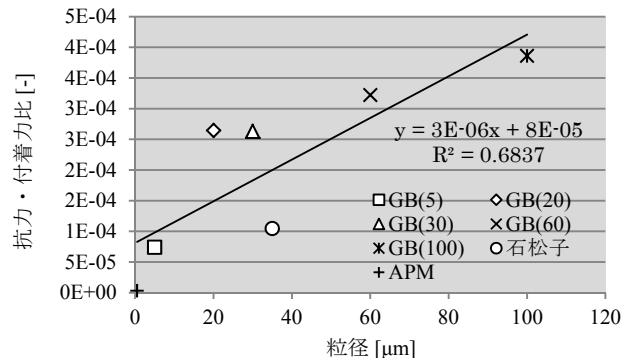


図-16 粒径と抵抗力・付着力比の関係

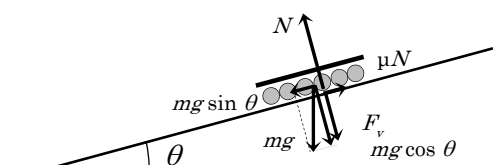


図-17 実験装置の概要図

程度であった。上述の検討結果を考慮すると、T&A方式CRでは、CR上部の露出配置ダクト等に堆積した微粒子は、気流の影響で再飛散することはないと言える。

3.5 まとめ

CR内のダクト等の堆積粒子の気流の影響による再飛散に関する検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) GB・石松子などの標準粒子やAPMを吹き飛ばし、飛散開始風速を実験的に求めた。飛散開始風速(ダクト中心)は、2.0m/s以上であった。
- 2) T&A方式CRでダクト等が設置されているCR上部の風速は最大で0.8m/s程度であり、堆積粒子が気流の影響で再飛散しないことを理論的に検証した。

4. モータからの発塵機構とその対策

FCU・FFUのモータは高速回転体のため軸受け等からの発塵が予測される。ここでは、深溝玉軸受を用いた3相かご形誘導モータ(ACモータ)及び永久磁石モータ(DCモータ)からの発塵量の把握、その発塵機構の推定、発塵対策について検討した。

4.1 既往研究

軸受メーカーが独自の方法で軸受単体からの発塵量を評価しているが^{9)・11)}、モータ本体からの発塵を扱った研究例はない。

文献(9)はフッ素系グリスに替わる低発塵性グリスの評価において、シールの効果、温度の影響、回転速度の影響などの発塵に係る要因の影響を記述している。文献(10)には、搬送ロボット用軸受の低発塵性グリスの発塵データが記載されている。文献(11)は、軸受内の玉の走行面にグリスが随時供給されるようなグリスの充填された軸受は長寿命であるとし、グリスが移動する道筋を明らかにしている。

4.2 モータからの発塵機構の想定

既往研究の知見とモータ内部の観察より、モータからの発塵機構を以下のように想定した。

4.2.1 粒子の発生

軸受を構成する玉と内輪及び外輪との接触面には皮膜状のグリスがあり、玉と内外輪が離れる部位で、グリスが膜状から粗面状となりその先端部が遠心力で剥離し粒子化すると考える(図-18)。モータ内には、軸受が2個あり、ここから粒子が発生する。

4.2.2 モータからの発塵

モータケースには、回転軸とケーブルの貫通部があり、隙間がある。モータ回転子の高速回転により内部空気も回転する。ACモータはフィン付回転子、DCモータはフィンなし回転子である。また、モータの発熱による煙突効果により内外空気の流動も考

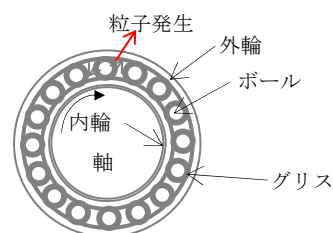


図-18 ボールベアリングと粒子発生

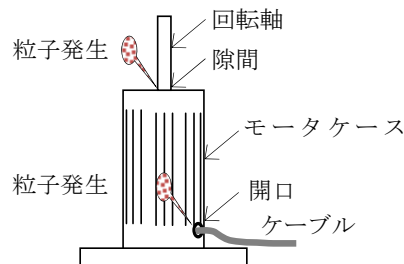


図-19 モータと粒子発生

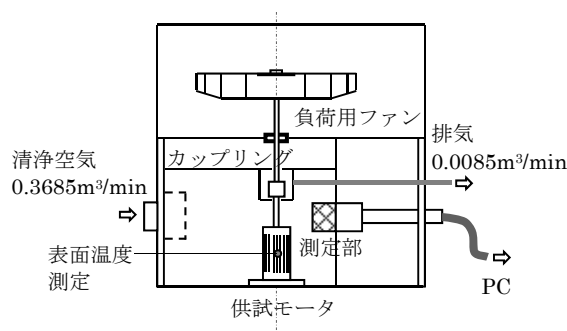


図-20 モータ発塵測定装置

えられる。モータからの発塵は、ケース隙間から内部の汚染空気が流出することにより発生すると想定する(図-19)。

4.3 発塵量評価実験

4.3.1 モータ発塵測定方法と条件

図-20にモータ発塵測定装置を示す。モータはカップリングを介してファンと接続し、負荷をかけた。測定部へ清浄空気を送り、カップリング部から空気を排出し、カップリング部からの粒子汚染を防止した。粒子濃度は測定部出口ダクト内の空気をサンプリングし測定した。粒子測定はPC(LASAIR III 310(PMS)、LASAIR II 110(PMS)、KC-01A(リオン))、温度計測はデータロガー(8422-50、HIOKI)で行った。表-7に実験パラメータを示す。

4.3.2 実験結果及び考察

発塵量は、粒径0.3μm以上の粒子の累積値で示す。図-21に①ACモータの周速度0.94m/s時の発塵量を示す。発塵量はモータ表面温度(代表測定点:側面中央)の上昇に比例して増加する。2回の測定結果は整合し再現性はよい。発塵の定常性を確認するため

に、1時間運転(温度 60~70°C)し、直ちに発塵量を測定した結果を定常時発塵として示した。温度変化している場合の発塵量に一致している。温度に比例して発塵量が増加する理由は、昇温によりグリスの粘性が低下するためである。

図-22 にモータ別、周速度別の発塵量を示す。①AC モータは、③④DC モータより 10 倍以上発塵量が多い。周速度 0.47m/s では③④DC モータは無発塵、周速度 0.71m/s で④DC モータが無発塵である。発塵量は周速度に比例して増加している。

負荷の有無で発塵量に差が無いことが判明した。新グリスの効果が若干見られ、粘性が高い方が粒子化しにくいと考えられる。

4.4 発塵機構

4.4.1 モータ内発塵量の測定

①AC モータ・④DC モータ内部での発塵量を測定した。ケーブル口にアルミパイプを挿入し隙間をシールした。このアルミパイプを PC に直結し、モータ作動約 8 分後より 4 分間測定した。

4.4.2 モータ内発塵及び外部への発塵

図-23 にモータ内発塵量を示す。①AC モータは初期より安定した発塵を示し、④DC モータは初期発塵量が多く、徐々に安定した。④DC モータの発塵量は多く、①AC モータの約 4 倍である。

図-24 に周速度の違いによるモータ内外部発塵量を示す。①AC モータでは、モータ外部への発塵量は内部発塵量増加率以上で増加している。④DC モータでは、周速度 0.94m/s の時のみ、外部に発塵している。この相違の理由を探るために、モータの回転子を透明管に納め、内部に煙を入れ、煙の挙動観察をした。①AC モータでは、回転子のフィンの効果でラジアル方向への気流が起こり、ケーブル口から空気が噴出する。透明管上面に開けた小孔からも内部空気の漏出が見られた。④DC モータでは内部流動は明確でなく、開口部から空気の漏出は認められなかった。

以上の結果から、以下のことが考えられる。

①AC モータでは、軸受から発生する粒子のうち、1/10~1/3 を外部へ放出する。この放出は回転子フィンの高速回転により生じる気流によるものである。

④DC モータも軸受から大量の粒子を発生するが、ケース外部へ放出する気流の駆動力がないため、放出粒子量は少なく、発生粒子は内部表面に付着しているものと考えられる。

表-7 実験パラメータ

要因	水準
A:モータ	A1:AC950W (グリス B1) (①AC モータ) A2:AC300W (グリス B2) (②AC モータ) A3:DC280W (グリス B2) (③DC モータ) A4:DC280W (グリス B3) (④DC モータ)
B:グリス	B1:グリス(基油:ジエステル鉱油、粘度 29mm ² /s) B2:グリス(基油:鉱油、粘度 40.6mm ² /s) B3:新グリス(基油:鉱油+PAO、粘度 100mm ² /s)
C:周速度	C1: 0.47m/s、C2: 0.71m/s、C3:0.94m/s
D:負荷	D1:負荷あり、D2:負荷なし

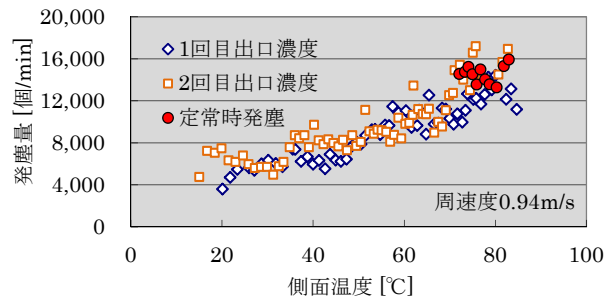


図-21 ①ACモータの発塵量

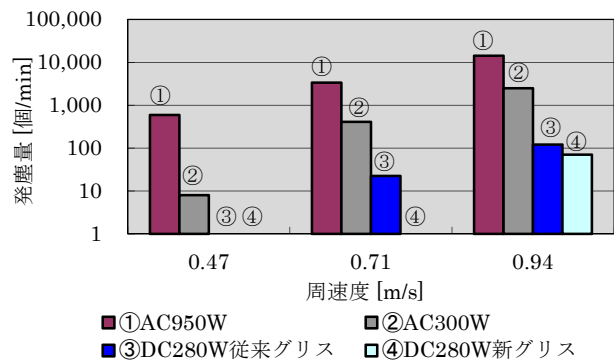


図-22 各種モータの発塵量

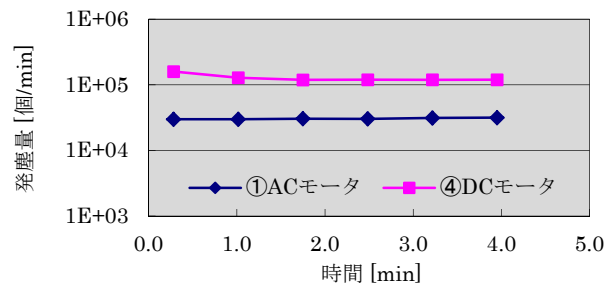


図-23 モータ内発塵量

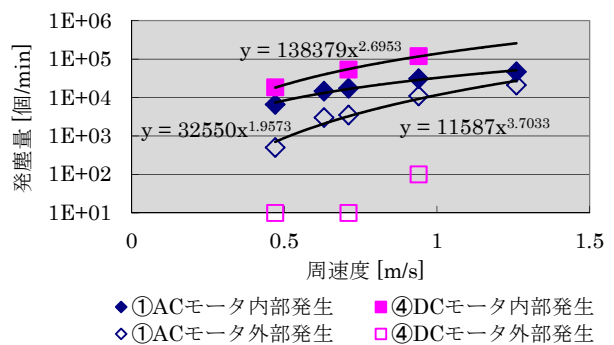


図-24 周速度の違いによるモータ内外部の発塵量

4.5 発塵量低減対策の検討

4.5.1 対策方法

発塵量を低減するには、隙間を塞ぐ対策とモータケース内部を負圧にする対策が考えられる。

表-8、図-25 に発塵対策の概要を示す。軸貫通部は稼働しておりシールすることができないため、軸貫通部の周囲に小型チャンバを設け、軸との隙間を1mmに保つ対策とした(対策A)。元々の軸とモータケースの隙間は2mmであった。また、ケーブル貫通部はシールが可能のため、シールをする対策(対策B)とシール部分からケース内部の空気を吸引し負圧にする対策(対策C)を考えた。内部吸引時には、軸貫通部の隙間からケース内部に空気が供給される。吸引するには、そのための設備が追加で必要となるため、吸引を行わない方法として対策A+Bの効果も確認した。

4.5.2 発塵対策効果

図-26 に発塵対策の効果を示す。対策Aは①ACモータでは若干の効果が見られた。軸貫通部の隙間を通過する空気に抵抗を与え、通過しにくくした効果と考える。

対策Bは①ACモータでは明らかな効果が見られたが、④DCモータでは元々発塵量が少ないため、効果は見られない。前述のように、①ACモータでは回転子のフィンにより外向き気流が発生しケーブル口からの空気漏出による発塵があったが、シールにより空気漏出が防止されたと考えられる。

対策A+Bは、①ACモータでは発塵量を97%、④DCモータでは100%低減させた。

対策Cでは、吸引空気量を変化させ、発塵量ゼロとなる吸引量に設定し連続測定した。吸引することで①ACモータ・④DCモータとも発塵量をゼロにすることができた。

設計上の対策を含め、省エネ、低コストの実用的な対策は以下のようになる。

- 1) DCモータを選択する
- 2) 大容量のモータを選択し低周速度で運転する
- 3) 粘性の高いグリスを選択する
- 4) ケーブル口をシールし、軸貫通部に小型チャンバを設置する

4.6 まとめ

CR内で使用されるFCU・FFUのモータの発塵特性、発塵機構を明らかにした。モータからの発塵量はCR内作業員の発塵量(400,000個/cf)¹²⁾より桁

表-8 モータ発塵対策の概要

対策	実施モータ
対策A	①ACのみ
対策B	①AC、④DC
対策C	①AC、④DC
対策A+B	①AC、④DC

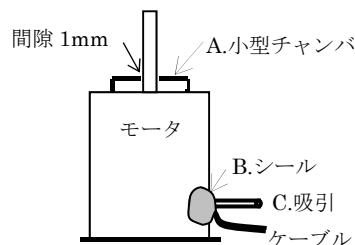


図-25 モータ発塵対策

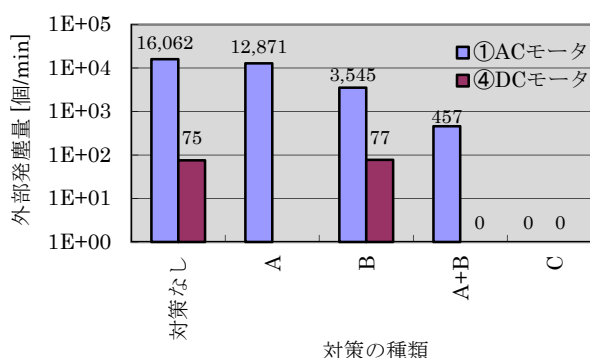


図-26 発塵対策の効果

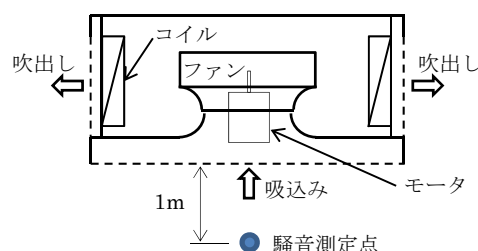


図-27 FCUの概要

違いに少ないが、適切なモータの選定、対策を実施することにより更に発塵量を大幅に低減できる。

5. FCU・FFUの低騒音化

5.1 FCUの低騒音化

対策前のFCU(風量:8,500m³/h、能力:26.8kW、サイズ:1.4m×1.4m×0.7mH、モータ容量:950W)は、FFUに気流を受け渡すことを第一に考えて、大型4方向吹出し型を改造したもので、吸込み面から直接ファン・モータが見え、また、吹出口からも音が漏れやすい構造になっていた。ファンもそのまま使用しており、プラグファンを搭載していた。吸込み口面の1m下での騒音値は76dBAと非常に高かった(図-27)。

FCU の性能(本体の下面から空気を吸込み、冷却して FFU に向かって緩やかに吹出す)を考慮すると、構造を変えることが不可能であったため、騒音源対策と漏れ量を少なくする対策を基本方針とした。

この FCU は多風量であるが、フィルタがなく、構造も簡単で圧力損失が少ないため、比較的低騒音な大口径の軸流ファンをゆっくり回すこととした。また、プラグファンから軸流ファンに変更したことにより生まれたスペースに、アウトガス発生が非常に少ないポリエチレンテレフタレート系の吸音材を設置し、天板からの反射音が吸込口や吹出口から抜けてくる音を低減した(図-28)。対策後の FCU のモーター容量は 810W である。

図-29 に対策前後の音圧レベル測定結果を示す。騒音レベルで 76dBA から 58dBA になり、18dB 低減された。

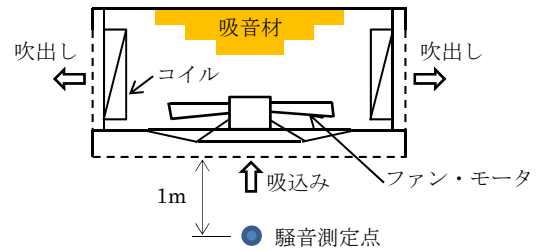


図-28 低騒音化 FCU の概要

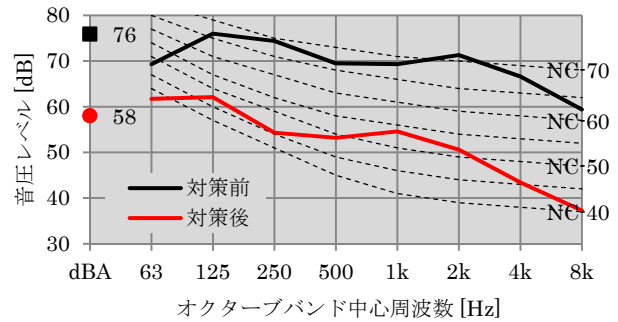


図-29 FCU音圧レベルの測定結果(対策前後)

5.2 FFUの低騒音化

FCU の対策と同様に、騒音源のファンと漏れ量の低減対策を行った。ファンは、プラグファンから現状のユニットに納まる最大径の翼型プラグファンとし、ユニットの内部に FCU と同じ吸音材を設置した(図-30)。FFU の仕様は、風量：3,300m³/h、サイズ：0.77m×1.33m×0.32mH で、対策前後で変更はない。

図-31 に対策前後の音圧レベル測定結果を示す。騒音レベルで 67dBA から 57dBA になり、10dB 低減された。

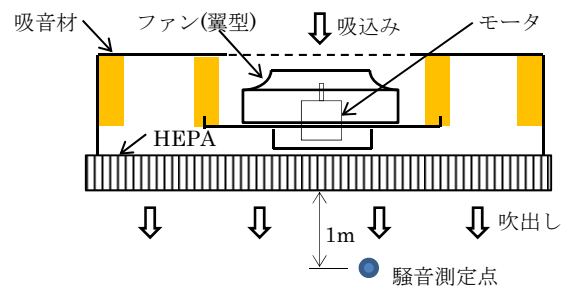


図-30 低騒音化 FFU の概要

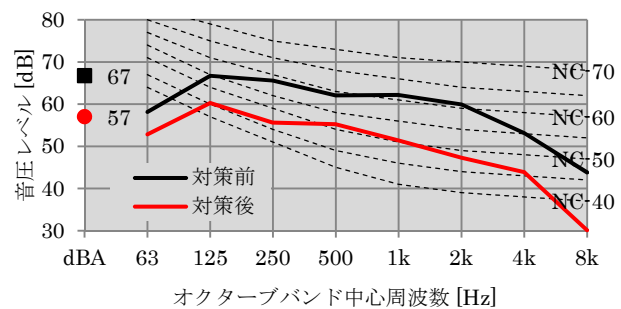


図-31 FFU音圧レベルの測定結果(対策前後)

5.3 クリーンルームの騒音値

図-5 に示すクリーンルームに低騒音化した FFU 10 台と FCU 4 台を設置し、室中央の床上 1.2m の点で音圧レベルを測定した。室内条件は、高発熱(600W/m²)で、粒子濃度 1,000 個/cf の設定とした。

図-32 に測定結果を示す。騒音レベルで 80dBA から 65dBA になり、15dB 低減された。

表-9 に T&A システムにおけるさまざまな室内条件での騒音レベルの測定結果を示す。粒子濃度 1,000 個/cf では 64~65dBA、10,000 個/cf では 60~62dBA、100,000 個/cf では 57~61dBA であった。

5.4 まとめ

ファンの変更と吸音材の設置により、FCU は 18dB、FFU は 10dB の騒音レベル低下となった。室内では 15dB の低減となった。

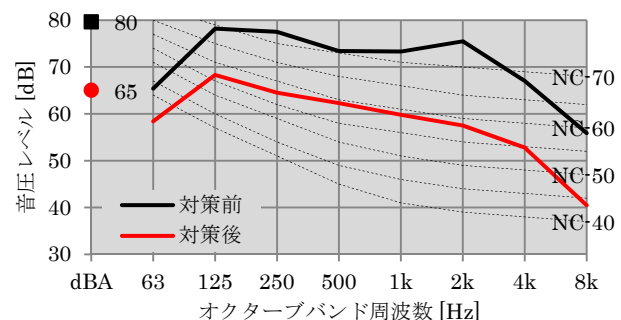


図-32 クリーンルーム内の騒音値(対策前後)

6. まとめ

本報では、T&A システムにおける諸課題(堆積塵の歩行による舞い上がり現象、気流による堆積粒子の再飛散現象、モータからの発塵、FCU・FFU の低騒音化)について検討し以下の結論を得た。

- 1) 床堆積塵の歩行による舞い上がり現象
 - ・清浄床と堆積床を歩行し、堆積塵の気中濃度への影響は少ないことが明らかになった。
 - ・T&A 方式 CR において歩行時の生産装置への影響を検討し、堆積塵床歩行と清浄床歩行の影響が同等であることが明らかになった。
- 2) 堆積塵の気流による再飛散現象
 - ・GB・石松子などの標準粒子や APM を吹き飛ばし、飛散開始風速(ダクト中心)が、2.0m/s 以上であることが明らかになった。
 - ・T&A 方式 CR でダクト等が設置されている CR 上部の気流風速は最大 0.8m/s 程度であり、気流の影響で堆積粒子が再飛散しないことを理論的に検証した。
- 3) モータからの発塵機構とその対策
 - ・モータからの発塵量は CR 内作業員の発塵量より桁違いに少ないが、適切なモータの選定、対策により更に発塵量を大幅に低減できる。
- 4) FCU・FFU の低騒音化
 - ・ファンの変更と吸音材の設置により、FCU は 18dB、FFU は 10dB の騒音レベル低下となった。室内では 15dB の低減となった。

謝辞

本研究を行うに際しては、OB 鈴木良延氏に多大なご指導・ご助言・ご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 長谷部弥, 白谷毅, 水原一樹, 小松原正幸, 梶間智明: “省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムの開発(その 1) -タスク&アンビエントクリーン空調システム概要とクリーン性能-”, 清水建設研究報告書, No.91, pp.73-82, 2014
- 2) 長谷部弥, 白谷毅, 小松原正幸, 梶間智明: “省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムの開発(その 2) -タスク&アンビエントクリーン空調システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量削減効果-”, 清水建設研究報告書, No.92, pp.119-130, 2015
- 3) 竹迫清之: “クリーンルーム床清掃方法に関する研究”, 第 11 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, pp.71-74, 1992

表-9 T&A 方式 CR におけるさまざまな条件での騒音レベル

粒子濃度設定 [個/cf]	発熱量設定 [W/m ²]	騒音レベル [dBA]
1,000	600	65.0
	400	64.8
	200	64.2
10,000	600	62.2
	400	61.6
	200	59.9
100,000	600	60.7
	400	60.1
	200	57.2

- 4) 長谷部弥, 鈴木良延, 伊澤康一: 「タスク&アンビエント」クリーン空調に関する研究(その 6 クリーン空調システムの性能比較)、プレ ISCC 空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, pp.107-110, 2010
- 5) 江見準, 遠藤茂寿, 金岡千嘉男, 河合清一: “遠心法による球形 2 粒子間液架橋力の測定”, 化学工学論文集, Vol.3, No.6, pp.580-585, 1977
- 6) 沼野雄志: “新やさしい局排設計教室 作業環境改善技術と換気の知識”, 中央労働災害防止協会, 2013
- 7) H.C. Hamaker: “The London—van der Waals attraction between spherical particles Physica”, Vol.4, No.10, pp.1058-1072, 1937
- 8) J. Visser: “On Hamaker constants: a comparison between Hamaker constants and Lifshitz-van der Waals constants”, Advances in Colloid and Interface Science, Vol.3, No.4, pp.331-363, 1972
- 9) “低発塵性 LG2 グリスの実用性能”, 日本精工精機製品技術レポート
- 10) “ウルトラ F シリーズ クリーン環境用軸受”, NTN, CAT.No.3028-III/J
- 11) 川村隆之: “高速軸受用グリスの潤滑機構の研究”, NTN TECHNICAL REVIEW, No.76, pp.39-44, 2008
- 12) 鈴木良延, 藤井修二, 早川一也: “クリーンルーム用衣服着衣者からの発塵量および発塵機構”, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 386 号, pp.43-53, 1988

