

慣性分離形集じん器 (ハイルーバフィルタ) の開発

Development of Inertia Type Air Filter (Hi-Louver Filter)

岡田 定五* 坪井 信義*
 Sadayuki Okada Nobuyoshi Tsuboi
 佐々木 昭夫** 筒井 隆**
 Akio Sasaki Takashi Tsutsui

要 旨

車両用エアフィルタの耐雪性能、保守の低減を目的とした慣性分離形集じん器 (商品名・ハイルーバフィルタ) を開発した。

本論文は“ハイルーバフィルタ”について基礎的研究を中心とし、その試験結果について述べたものである。

1. 緒 言

現在使用されている車両用エアフィルタは油を付着させた繊維にじんあいを付着させ集じんする形のフィルタ、いわゆる粘着形のフィルタがおもなものである。このフィルタは目づまりによる効率低下を防ぐため定期的洗浄を必要とし、また耐雪性能についても問題がある。これに代わるものとして慣性分離形集じん器があるが、この集じん器は気流を急激に偏向させ、空気中に含まれる粉じんその他の異物を慣性により分離集じんするもので、一般に慣性分離式あるいはルーバ式と呼ばれており、その原理も古くから存在している。この集じん器に関しては Smith 氏ら⁽¹⁾や、井伊谷氏ら⁽²⁾⁽³⁾の論文、また重力を利用した横形ルーバ式の新津氏ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾の論文が見られるがいずれも特殊なルーバについて述べられている。

筆者らはこの種集じん器の構造上、性能に影響すると考えられる因子 (たとえば気流を偏向させるルーバの羽根の傾斜角、ピッチなど) について種々実験を行ない、車両用として最適な形状を求めて試作し、現車試験により粉じんの集じん効率、耐雪性能 (乾 (かわ) き雪および湿り雪) を確認したのでその結果について述べる。

2. 集じん機構と実験装置

2.1 集じん機構と諸因子

本集じん器の特長は、図1に示すように汚染空気の流れに対し、ある角度で傾斜したV字形の平面上に、多数の平行な羽根を配列させた構造である。外気中の汚染空気 (粉じんを含む空気) を→印のようにある速度で流入させれば気流が各羽根を通過する際、その向きが急激に偏向されるので、粉じん粒子などの異物はその慣性により直進運動を続け、偏向気流から分離される原理を利用したものである。各羽根を通過した偏向気流は清浄空気となって第1送風機で送風される。一方、分離後の粉じんはV形の谷底より排出ダクトに集められ第2送風機より一部の空気とともに外部に排出される構造である。ところで図1の装置は本集じん器を吸込式に利用した場合であり、逆に押込式として使用すれば排出用第2送風機が不用となる。

次に前述の集じん機構からわかるように集じん性能である集じん効率および圧力損失はルーバを構成している諸因子、すなわち図2に示すように羽根ピッチ p 、傾斜角 θ 、また気流速度を減少させないためのV形角度などが影響すると考えられる。したがって、本実験ではこれらの諸因子の影響を系統的に調べるため供試集じん器を図3に示すようにフィルタわくとルーバに分割し各因子を種々変化させる構造とした。表1は性能に及ぼす諸因子の仕様を列記したも

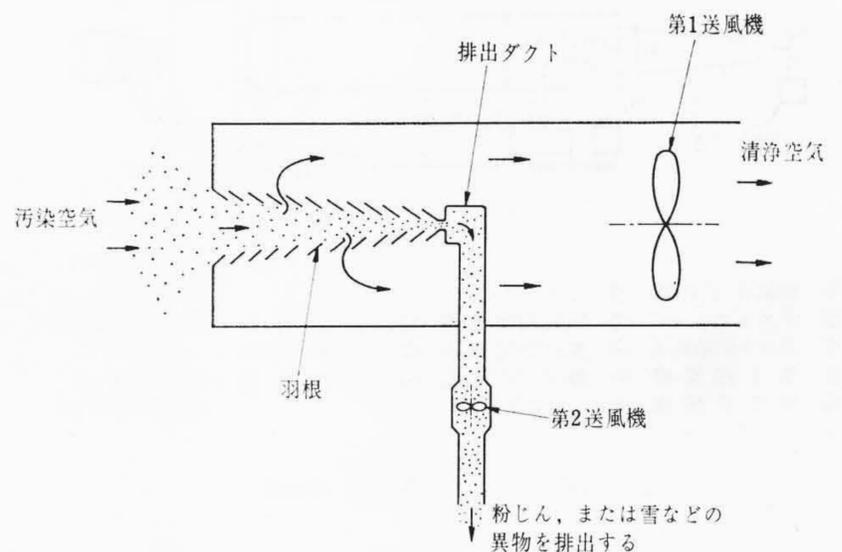


図1 慣性集じん器の原理図

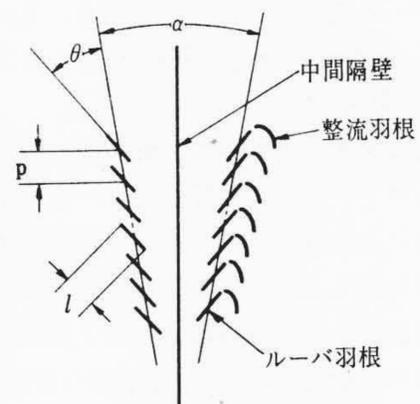


図2 集じん器の諸因子

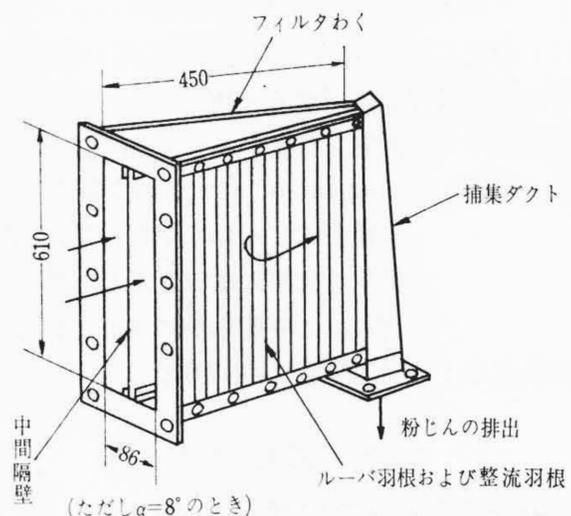


図3 供試集じん器の構造

のである。ここでV形角度 α については4~20度までの4区分とした。また羽根ピッチ p は羽根長さ l とも関連があるのでこれを2系統に分け、羽根相互に重なりのある場合とルーバの製作容易な打抜

* 日立製作所日立研究所
 ** 日立製作所水戸工場

表1 各因子の仕様

各因子	数					値	
1. V形角度: α 度	4	8	12	20			
2. 羽根の傾斜角: θ 度	10	15	20	25	30		
3. 羽根ピッチ P (mm)	羽根長 $l=30$ 一定 打抜形羽根 $P=l$ のとき	10	15	20	25	30	
		10	15	20	25	30	40
4. 中間隔壁	無孔板, 有孔板						
5. 整流羽根	羽根の傾斜角: 20度, 30度の2種						

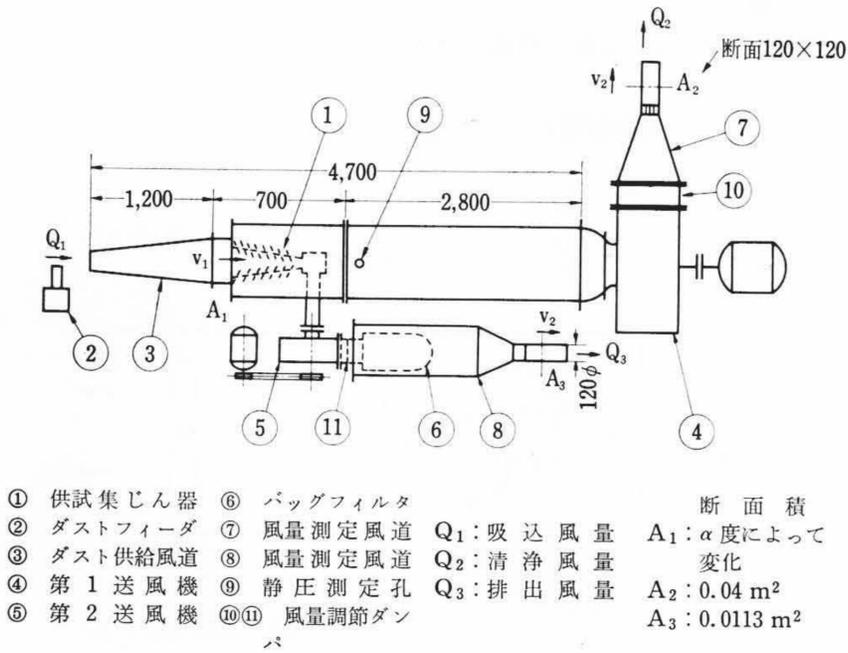


図4 実験装置 (平面図)

形に着目して $p=l$ の場合に分けた。なお、実験の際には上記諸因子のうち (1) V形角度 α , (2) 羽根傾斜角 θ , (3) 羽根ピッチ p の3項目はルーバの基本因子となるもので、まずこの3項目を中心に検討し続いて中間隔壁や整流羽根の検討を行なった。

2.2 実験装置と方法

実験装置の概要は図4のとおりで、風道内にある供試集じん器①の吸込口へダストフィーダ②より粉じんを一定流量で送る。さらにハンドブロワで粉じんを分散させながら吸込風量 Q_1 とともにダスト供給風道③に吸い込ませて供試集じん器①内に投入する。本集じん器のルーバを通過した清浄風量は④の第1送風機を経て⑦の測定風道から外部に排風させる。一方、分離後の粉じんは排出風量 Q_3 とともに、⑤の第2送風機を経てバッグフィルタ⑥(東洋レーヨン, ナイロンスエード織り #702製)に捕集させる。集じん効率は、②のダストフィーダの供給粉じん量に対する⑥のバッグフィルタに堆積(たいせき)した粉じん量(捕集量)の重量比(%)で表わすことにした。次におもな実験条件を列記すると次のようである。

- (1) 供試粉じん: 東電フライアッシュ(東電, 千葉火力発電)
- (2) 粉じん濃度: 0.5 g/m^3 of air なお文献⁽¹⁾⁽²⁾によればこの種の集じん器の場合粉じん濃度の大小は集じん効率にはほとんど影響しないことが実験により明らかにされている。
- (3) 排出風量 Q_3 : 吸込風量 Q_1 の10%

3. 実験結果と検討

3.1 基本因子と集じん効率の関係

(1) V形角度: α 度

α と集じん効率の関係は図5に示すとおりである。 $\alpha=8$ 度付近に最大値がみられる。また吸込風量 Q_1 の多いほうが全般的に効率がよい。 α と Q_1 の関係からみても8度が慣性集じん器として最も安定した特性を示している。

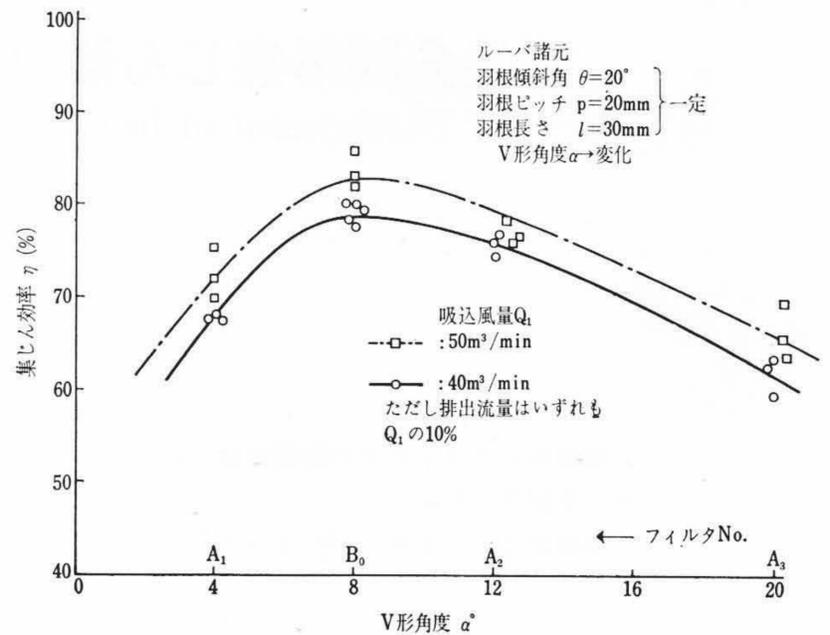


図5 V形角度と集じん効率の関係

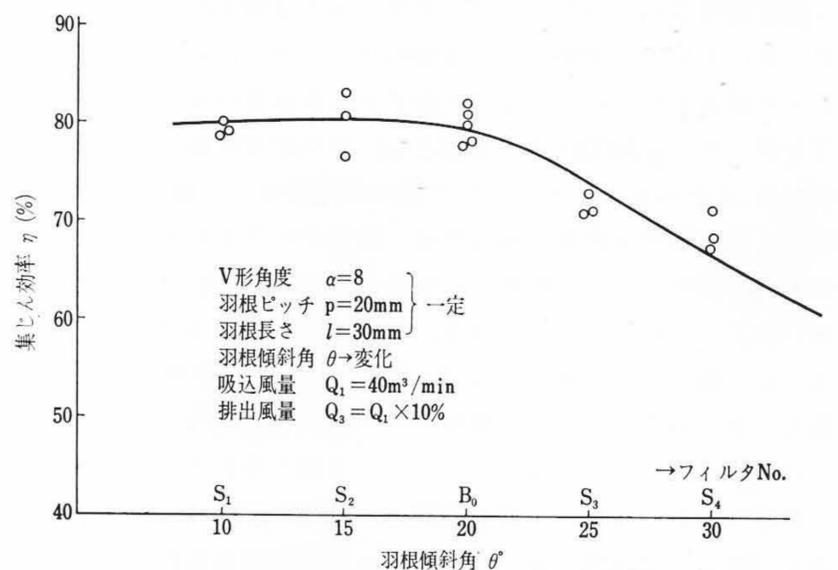


図6 羽根傾斜角と集じん効率の関係

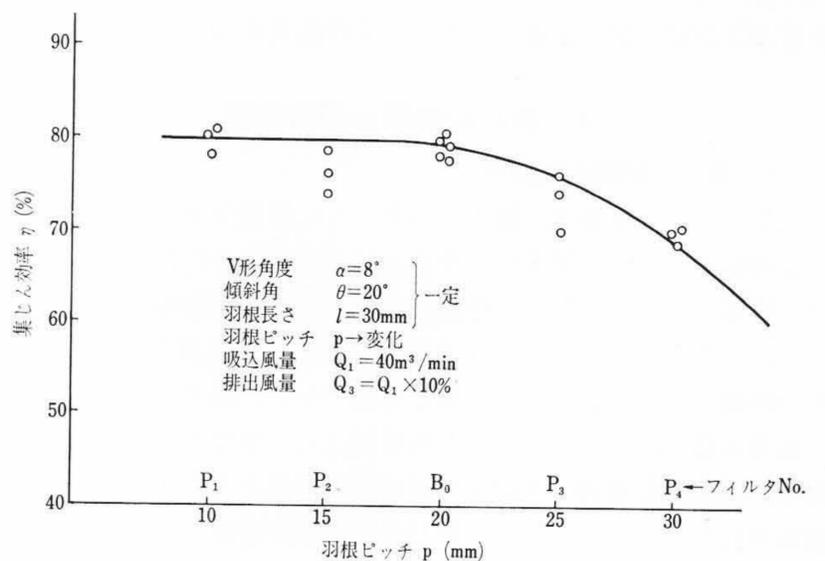


図7 羽根ピッチと集じん効率の関係

(2) 羽根傾斜角: θ 度

集じん効率をよくするためには θ を小さくしたほうが好ましいが、図6に示すように20度以下ではそれほど良くなならないで頭打ちとなる。

(3) 羽根ピッチ: p (mm)

まず図7の羽根長さ $l=30$ mm一定で p が変化するとき、 $p=20$ mmより大きくなるほど効率が急に低下する。一方、 p が小さくなり羽根相互間に重なりが増しても20 mm以下ではそれほど効率は良くなならない。次に打抜形の場合に、図8に示すように $p=l=20$ mm付近で最大値となっている。いずれの場合も羽根ピ

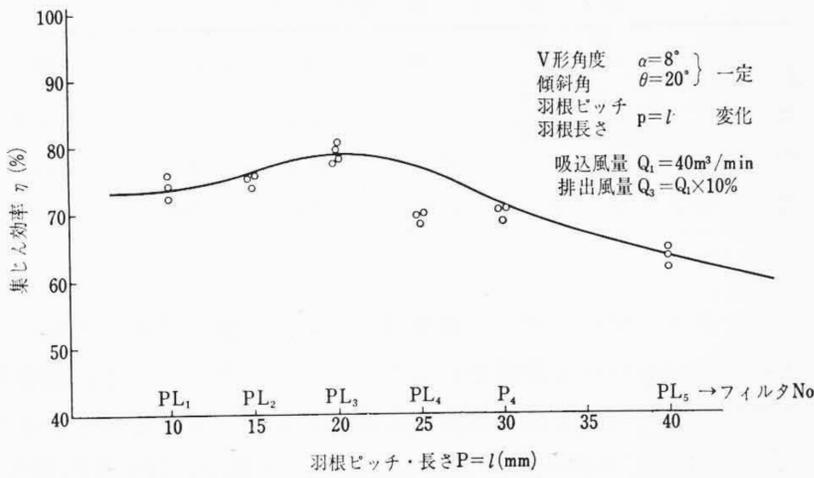


図8 打抜形羽根ピッチ・長さ集じん効率の関係

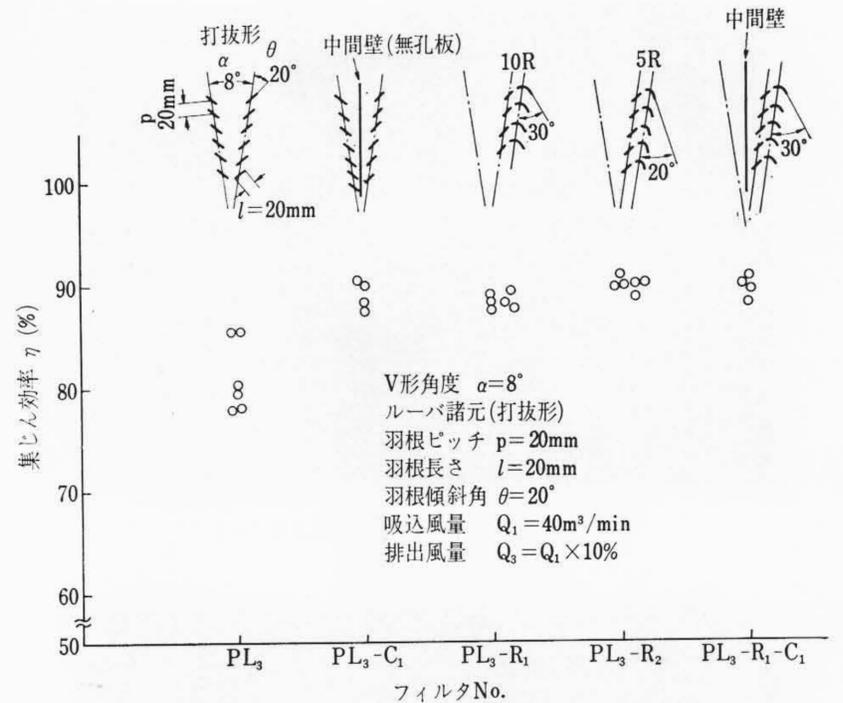


図11 各組合せ集じん器の効率

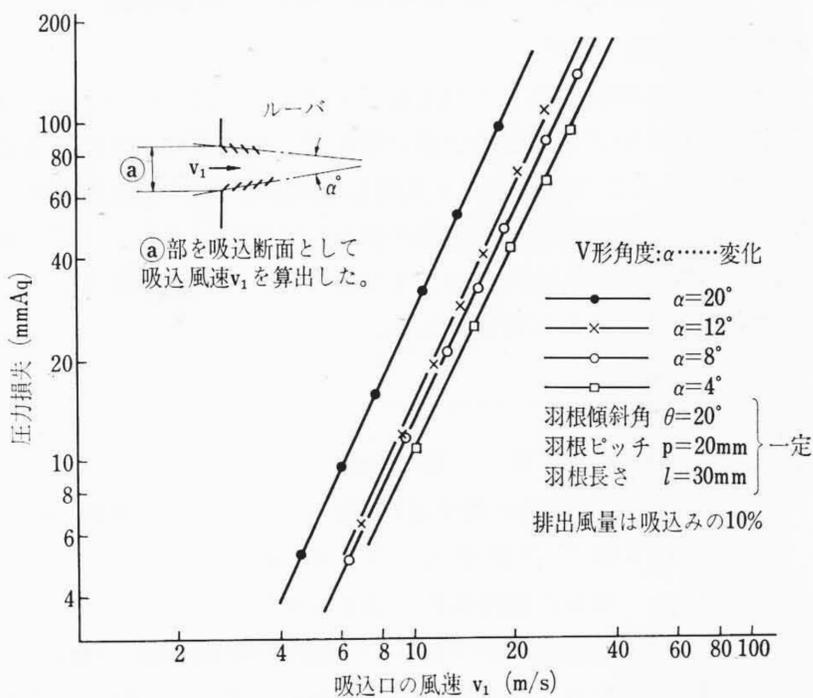


図9 V形角度に対する吸込風速と圧力損失の関係

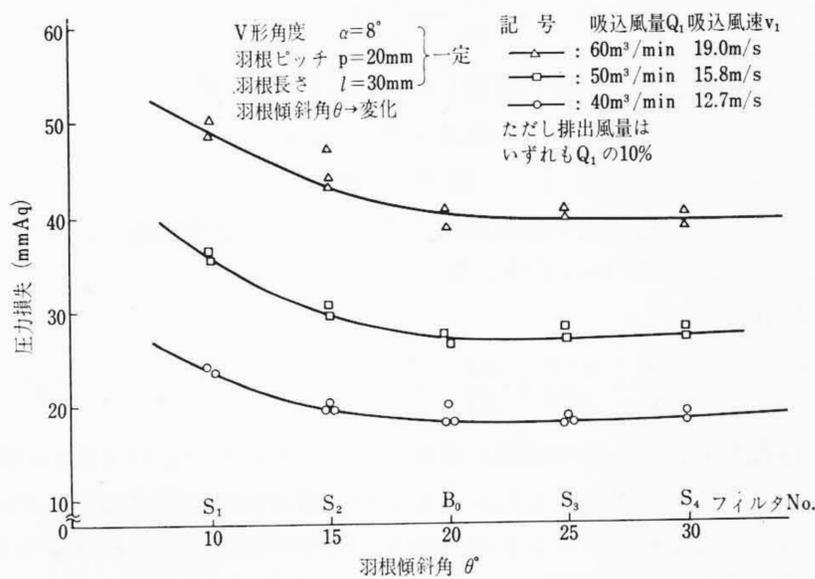


図10 羽根傾斜角と圧力損失の関係

ピッチを大きくすると効率が低下しているのは、直進流がルーバで偏向される際に偏向気流の幅が大きくなり、羽根背面で大きな渦を生ずるためであり好ましくない。また羽根相互間に重なりがなくとも打抜形⁽⁶⁾でじゅうぶんな集じん効率を得られる。

3.2 基本因子と圧力損失の関係

まずV形角度と圧力損失の関係は図9に示すように、いずれも圧力損失が吸込風速 v_1 の2乗に比例して変わることは一般の乱流理論と同様である。また同一吸込風速 v_1 で α が大なるほど圧力損失が大となっており、これはV形角度の増大により先細りが著しくな

り直進気流の増速と気流の乱れが大きくなるためと考えられる。次に図10の羽根傾斜角との関係では θ が小さくなるほど偏向気流の向きが大きくなり圧力損失が増大し20度以下では著しい。この θ については圧力損失からは $\theta \geq 20$ 度であり、また前述の集じん効率より $\theta \leq 20$ 度が好ましいことから両者の性能を満足する最適値としては $\theta = 20$ 度付近となる。

次に圧力損失はルーバを通過する気流によって生ずるものであり、羽根ピッチが変わった場合にはルーバの通過断面積が変化しないで圧力損失には影響しないものと考えられる。実験結果でも羽根ピッチは圧力損失にはほとんど影響しないことが知られた。

以上の基本因子について検討した結果を集じん効率および圧力損失の両者からその最適値をまとめると次のようである。

- (1) V形角度: α 8度±1
- (2) 羽根傾斜角: θ 20度付近
- (3) { 羽根ピッチ: p (羽根長さ $l=30$ mm) ... 20mm 以下
打抜形羽根ピッチ長さ: $p=l$ 20mm

3.3 整流羽根および中間隔壁の影響

前述までのルーバの最適基本因子の形状に整流羽根、中間隔壁の因子を付加した場合で効率との関係を求めたのが図11でルーバの基本因子は打抜形の $\alpha=8$ 度、 $p=l=20$ mmのものであり、これに整流羽根および中間隔壁の両者を付加した場合それぞれ効果があるが、両者を同時に付加した効果はない。

ところで整流羽根がない場合と付加した場合について1/2.5のモデルで水流実験(流線は水面のAl粉の軌跡)を行なった結果、図12のように整流羽根がない場合には、偏向気流がダクト中を逆流しダクト壁面で反転し壁に沿って流れるので、ルーバとダクト壁の間に渦を生ずる。これに対して図13の整流羽根のある場合にはルーバ通過後のダクト中の流れが整流され渦を生じない。また実用上本集じん器を図14に示すようにV形セルを多数並列に使用する場合には、整流羽根がないとA部で相互干渉を起こし気流の停滞や乱流を生じ望ましくないのB部のように整流羽根が必要である。

3.4 粉じん粒子に対する部分集じん率

本集じん器は慣性式であるので粒子の大小により集じん効率が異なる。今回供試粉じんとして東電フライアッシュを用いたが、この粉じん(投入前の原粉)と捕集後の粉じんの粒子径に対する頻度(ひんど)分布がわかれば各粒子に対する部分集じん率が求められる。各粉じんの粒度分布測定には、液体沈降式光透過法(PSA-2形日立光走査迅速粒度分布測定器)⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いた。図15は各粉じん粒度分布を

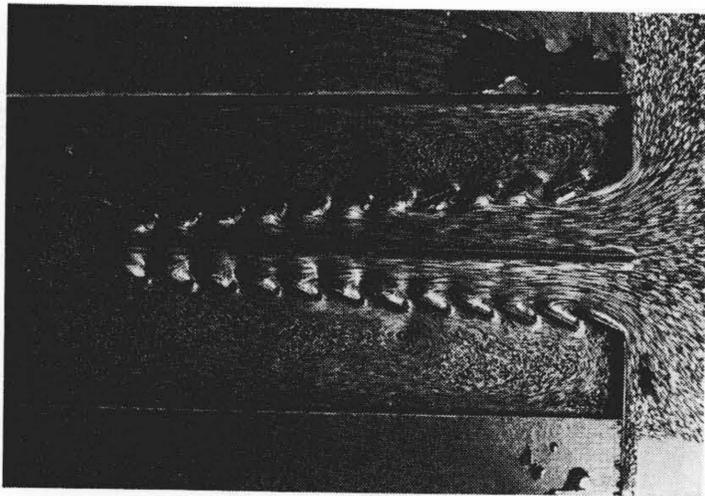
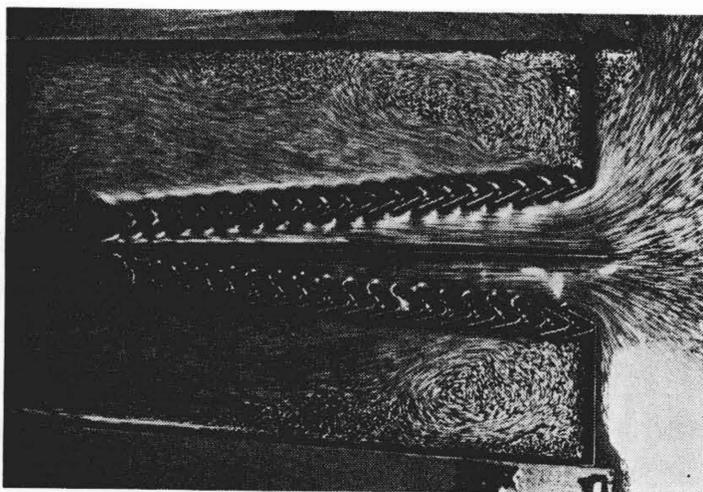


図12 水流実験結果 (1/2.5モデル)



(整流羽根有す)
図13 水流実験結果

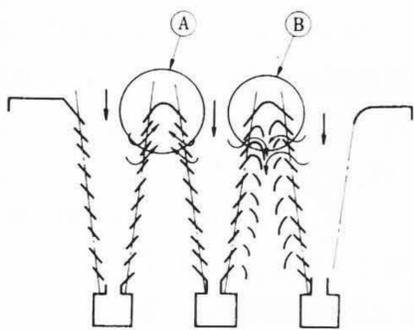


図14 集じん器の多数並列使用例

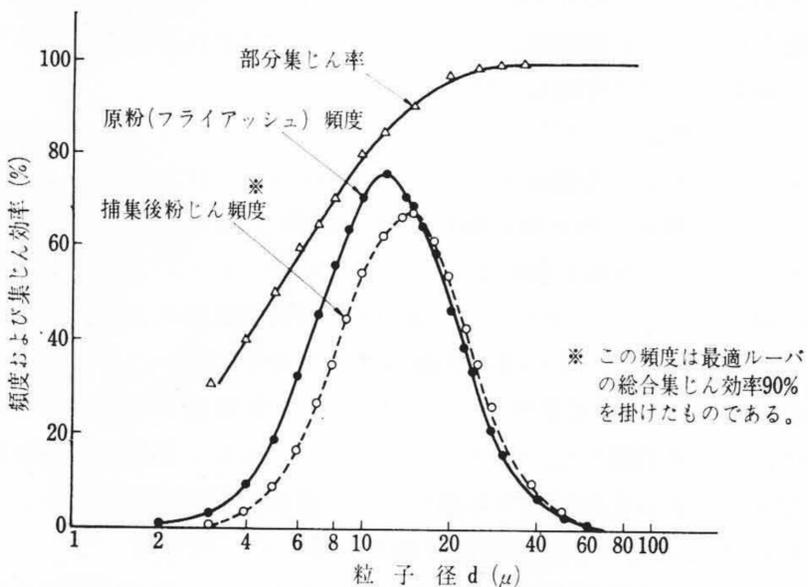


図15 各粉じん粒径対数正規分布と部分集じん率

示したものである。測定時の分散媒としてエチレングリコール〔密度、 1.11 g/cm^3 、測定温度範囲 $25 \sim 28^\circ\text{C}$ 、粘度 $(17.3 \sim 75.5) \times 10^{-2} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ 〕を用い沈降時間 $5 \sim 6$ 分間で行なったものである。図15

表2 粉じんと雪の慣性パラメータ

項目	種別			雪
	粉じん (フライアッシュ)			
比重 (g/cm^3)	2.2			約 0.1
粒子の外径 δ	10μ	50μ	200μ	1 mm
慣性パラメータ P	0.74	184	296	307

に示したように原粉に対して捕集後のものは下側に分布してあり、粒子の小さいものほど分離されなかったことを示している。部分集じん率は原粉に対する捕集後粉じん頻度の比をとることにより求め(△印)、本集じん器の部分集じん率は粉じん粒子、 10μ で約80%、 20μ 以上では95%以上というすぐれた値である。

4. 耐雪性能に対する理論的検討と実験結果

4.1 理論的検討

以上のように本慣性集じん器は粉じんに対しては前述のとおり高い効率を示しているが比重の小さい雪に対してはどのようになるか明らかでない、ここでは粉じんと比較して検討する。一般に慣性を扱う集じん器の場合に考慮すべき特性数として慣性パラメータ P (無次元数) がある。これは次式のような値⁽⁹⁾で、この値が大きいほど捕集効率はよくなるのが普通である。

$$P = \frac{\delta^2 v \rho_p}{18 \mu r} \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、 δ : 粒子径 (m)
- v : (障害物に対する) 気流の上流における速度 (m/s)
- ρ_p : 粒子の真空度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$)
- μ : 気体の粘性係数 ($\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$)
- r : 障害物の半径あるいは噴流の断面半径 (m)

である。(1)式は次のような物理的意味をもっている。粒子の運動方程式としては粒子と気流の相対速度 v_c をもつ粒子の気体抵抗は $T = 3\pi\mu\delta v_c$ (ストークスの法則が適用されるとして) であるから

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + 3\pi\mu\delta \left(\frac{dx}{dt} - w \right) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 M : 粒子の質量 ($\equiv \frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_p$) ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$)
- w : その点の気流速度 (m/s)
- x : 粒子の座標 (m)

である。この各変数を無次元化するために次のようにおく、

$$x = rX, \quad t = rT/V, \quad W = vU$$

(2)式は

$$\frac{Mv}{3\pi\mu\delta r} \frac{d^2 X}{dT^2} + \frac{dX}{dT} - U = 0 \dots\dots\dots (3)$$

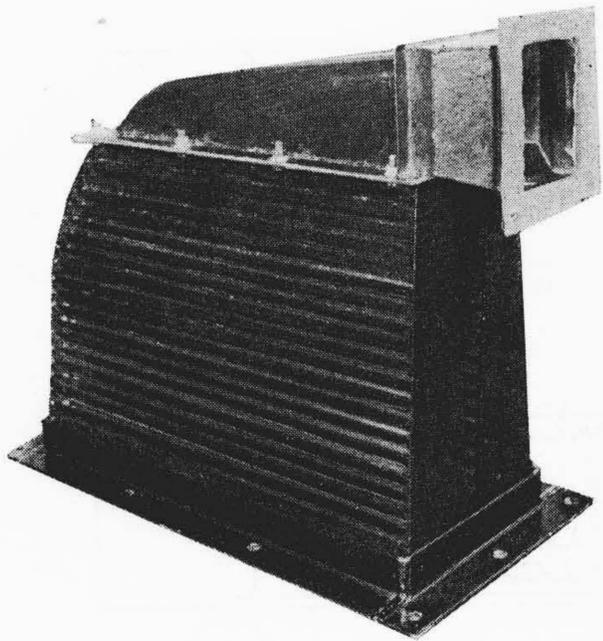
(3)式の左辺第1項の係数が慣性パラメータ P そのものではほかの係数はすべて1である。したがってこの運動方程式の解はおもに P の値によって左右されることがわかり、粒子の軌跡を考えるときの P の値は慣性項(加速度項)の大きさを示すものとして重要である。

上記の慣性パラメータ P について、球形の衝突効率との関係は今までに計算されている。ところで、本集じん器の分離作用の概略の傾向をみるため粉じんと雪に対する慣性パラメータを算出した。

まず噴流の断面半径を本集じん器ルーバの羽根ピッチの1/2とする。またその他のデータは

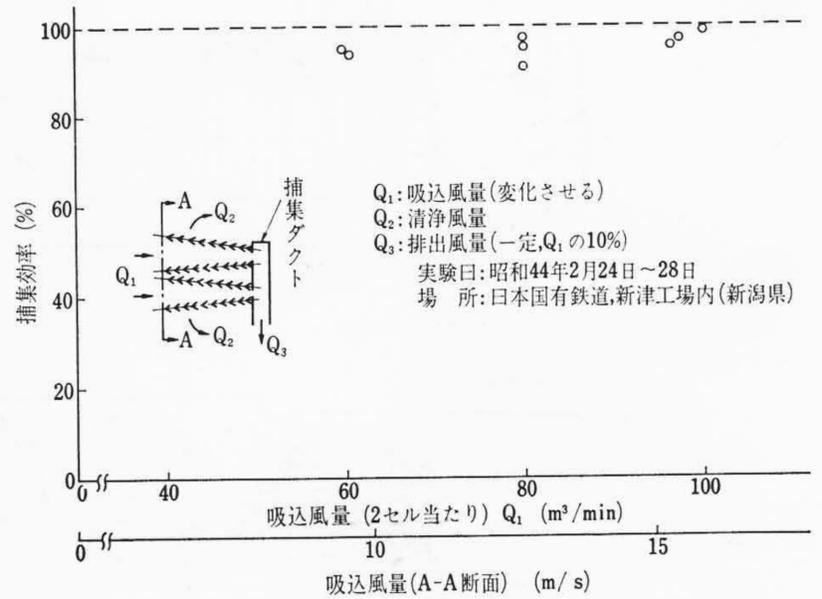
- $r = 10 \times 10^{-3}$ (m) (ルーバ羽根ピッチの半分)
- $v = 10.0$ (m/s) (フィルタ内の通過気流速度に等しい)
- $\mu = 1.844 \times 10^{-6}$ ($\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$) (20°Cの空気)

として慣性パラメータ P を算出した。表2はその結果をまとめて示したものである。雪と粉じんとを比較してみると比重については、雪は粉じんに比べて1/20と小さいが粒子径は逆に粉じん (50μ の場合



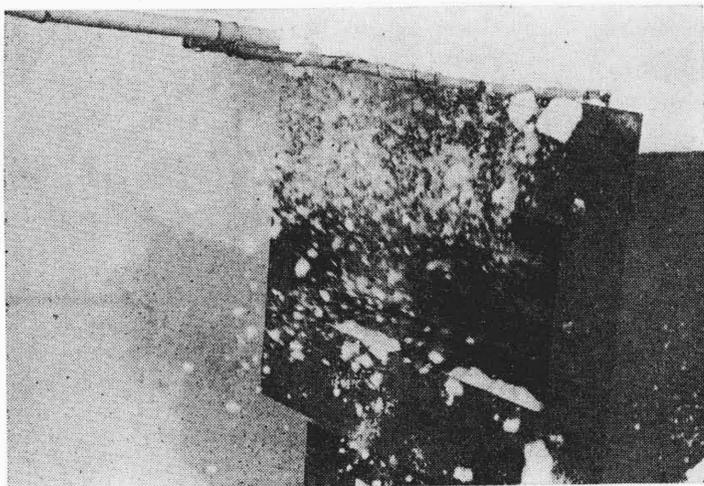
(ハイルーバフィルタ)

図16 供試慣性集じん器



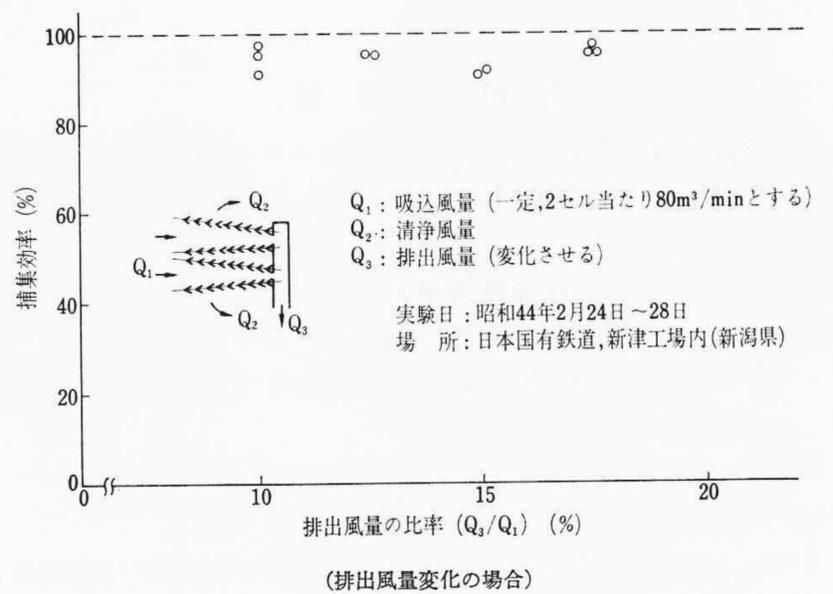
(吸込風量変化の場合)

図19 雪の捕集効率



(雪の吸込み)

図17 実験状況



(排出風量変化の場合)

図20 雪の捕集効率



(吹雪中の連続運転)

図18 実験状況

に対して)は約20倍と大きくなっているの、雪のほうが1粒子当たりの質量がはるかに大きくなる。雪の慣性パラメータ P はちょうど粉じん 200μ のものに相当する値であり、雪は粉じんと同程度以上に捕集効率の良好なことがわかる。本集じん器では 100μ 以上の粗粒粉じんの捕集効率はほぼ100%に近いことから雪の捕集効率は少なくとも90%以上の高い効率の得られることが推定できる。

4.2 耐雪性能の実験

(1) 供試集じん器と実験状況

供試集じん器(ハイルーバフィルタ)は2セル形のもので図16がその外観である。これは前述の粉じんによる系統的な実験結果で得られた最適ルーバ諸元を備えておりまたその形状については

特に耐雪性能に良好な対策として気流中に渦の生じない形状に改良⁽¹⁰⁾されている。耐雪に対する実験装置は粉じんの場合と同様であるが、雪の回収には特に注意を払った。すなわち、粉じんのようにブローダウン側の送風機を通過したあとのものを回収したのでは、雪は粉碎されやすくまた液化するおそれがあるのでこの送風機の手前で回収するように改造した。定量的な捕集効率の実験で、自然降雪状態では集じん器の吸込口に投入された雪の量が不明であるので図17に示すような用具あるいは篩(ふるい)を用い積雪した直後の雪を分散させながら、1回当たり約1kgの雪を投入し定量的な捕集効率の実験を行なった。また雪は粉じんと異なり非常に付着性が大であるので、図18に示すように自然降雪時に8~10時間の連続運転を行ない集じん器内への雪の堆積が生じないかなどの耐雪実験も試みた。

(2) 実験結果

実験は雪の多い新潟県で行なったもので実験結果の図19は排出風量 Q_3 を吸込風量 Q_1 の10%と一定とし、吸込風量を変化させた場合であり、図20は吸込風量を一定にし排出風量を10~18%まで変化させた場合である。図から明らかなように雪の捕集効率はいずれも平均95%と高い効率を得られており、前述の理論的検討の妥当性を示すものである。また自然降雪および吹雪の中で8時間以上連続運転を試みたが、積じん器内のルーバおよび捕集ダクト内にも全く雪の付着、堆積が認められなかった。

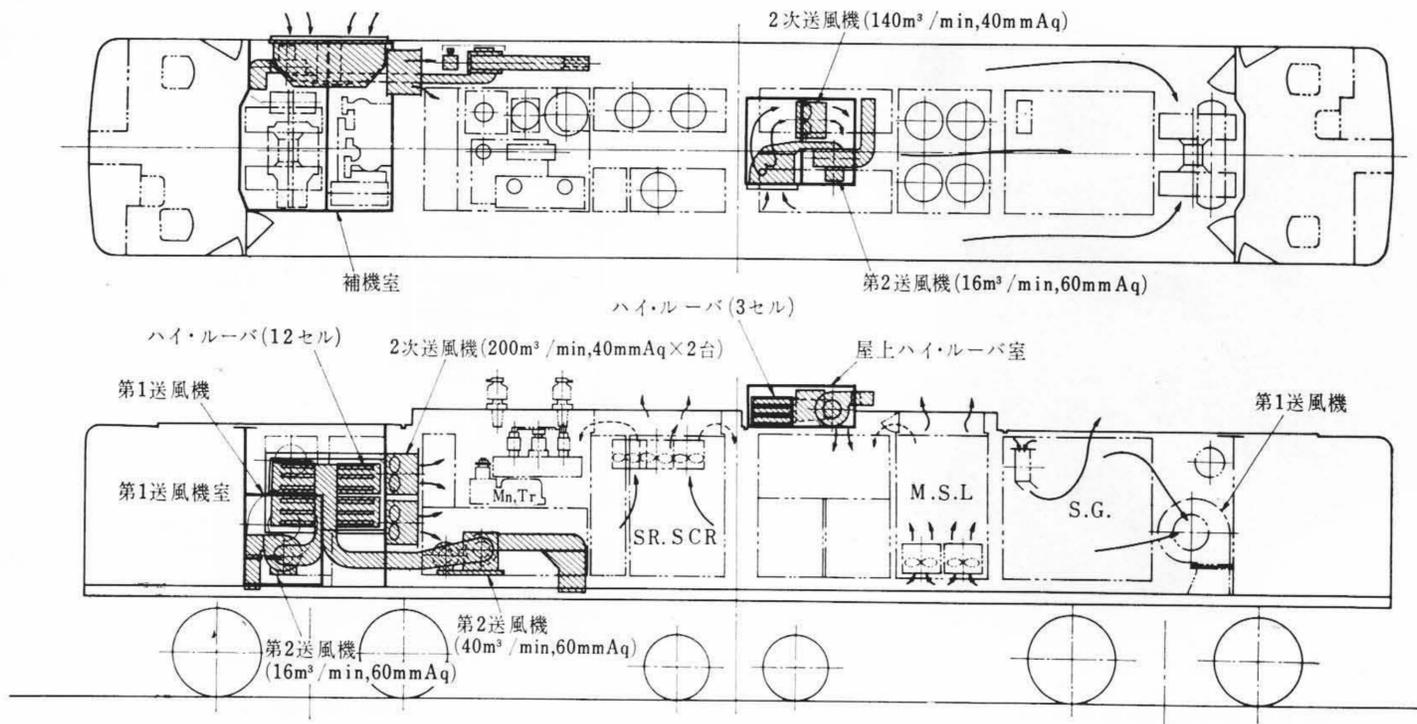


図21 現車試験取付図

5. 現車試験

前述のようにハイルーバフィルタの捕集効率は90%以上で、現用の粘着形フィルタと同等以上の結果が得られたので現車試験を行なった。

北海道地区では交流電気機関車 ED 75501 号機と ED 76505 号機で2回試験を行なった。前者では主電動機4台中2台にハイルーバフィルタを適用しほかの2台との比較試験を行ない、雪、雨および粉じんに対する性能を確認した。

後者では主電動機4台を含むすべての電気品の冷却風にハイルーバフィルタを適用し冬期の耐雪性能確認を行なった。

さらに上越地区ではラッセル車推進用に使用される EF 15 形直流機関車に適用し冬期試験を行なった。

これらの試験によりハイルーバフィルタをぎ装する場合の問題点を摘出することができた。耐雪性能を確保するため特にぎ装上注意すべき事項は次のとおりである。

- (1) フィルタと第2送風機を結ぶ排出ダクトの形状
- (2) フィルタから出てくる清浄空気流の整流
- (3) フィルタの取付位置
- (4) 風吸込口への雪塊や紙くずなどの侵入防止
- (5) 捕集された雪の排出をスムーズにするダクトの形状、排出口の位置、方向

図21はED76505号の現車試験取付図を示したものである。これは在来の粘着形フィルタの付いている機関車にハイルーバフィルタを取り付け試験したもので、シリコン整流装置、平滑リアクトル装置などが送風機を内蔵しているため、ハイルーバフィルタの圧力損失を補うため2次送風機を追設してある。

図22は機関車へ取り付ける場合の例を示したものである⁽¹¹⁾。

6. 結 言

本文に述べたように、保守合理化のためのメンテナンスフリーの要求および電化区間の豪雪地帯への拡大に対処するための耐雪性能の要求を満足する車両用エアフィルタ（ハイルーバフィルタ）を開発した。

“ハイルーバ”を最も効果的に車両に搭載(とうさい)する方法については車両全体の通風方式とも関係が出てくるのでさらに検討を

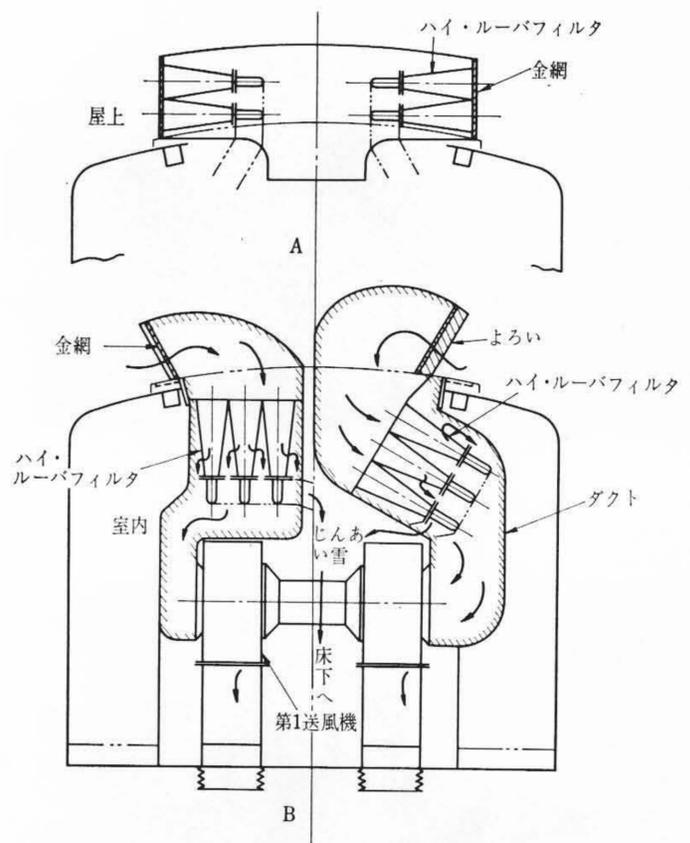


図22 現車への適用例

を進めるとともに、一般空調設備への応用についても検討を進めて行く考えである。

ハイルーバの開発にあたり終始ご指導ならびにご協力をいただいた日本国有鉄道車両設計事務所、苗穂工場、大宮工場および新津工場の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) J. L. Smith, JR., & M. J. Goglia: Trans. of ASME, 78-2, 389 (Feb. 1956)
- (2) 井伊谷, 木村, 中村: 粉体工学研究資料 18, 1 (昭34-5)
- (3) 井伊谷, 木村: 粉体工学研究資料 27, 1 (昭35-6)
- (4) 新津, 吉川: 空気調和・衛生工学 37-3, 159 (昭38-3)
- (5) 新津: 空気調和・衛生工学 42-10, 1089 (昭43-10)
- (6) 特許出願中
- (7) 牟田, 渡辺: 粉体工学研究会誌 6-1, 9 (昭44)
- (8) 牟田: 粉体工学 5-5, 49 (昭43-5)
- (9) 井伊谷: 集塵装置, 211 (昭41, 日刊工業新聞社)
- (10) 関連特許3件出願中
- (11) 特許出願中