

着地濃度低減に関する研究

—実用化の可能性について—

相 沢 武 夫*

Research for Reduction of Exhaust Gas Concentration at the Ground Level —Possibility of its Practical Use—

by Takeo AIZAWA

The concentration of elements of smoke and gas exhausted from stacks or exhaust stacks of factories is generally required to fall below the legally fixed standard at the ground level.

When it is windy, however, smoke is pulled down owing to the negative pressure associated with the vortex occurring leeward of the stack, and reaches the ground being hardly diffused.

The author, who invented an apparatus which leads air into the vortex to abate the negative pressure in the case of any wind direction, gives a qualitative demonstration of its effectiveness in this paper.

The merits of the apparatus are mentioned below.

- (1) Any kind of energy except wind is not needed.
- (2) It is effective for any wind direction.
- (3) It does not need troublesome maintenance.
- (4) It is relatively light.

1. 要 旨

一般に、大小の工場の煙突や排気筒（以下煙突と言う）から排出される煙やガス（以下煙と言う）は、空気中の稀釈、拡散によって着地の際その法定成分の濃度が基準値以下になっていることが要求されている。

しかし風があると煙は煙突の背面（下流）に生ずる渦によって発生する負圧に下向きに吸い込まれ、充分拡散されないうちに地表に達するおそれがある。

この研究は、風の方向に関係なく空気を背面の渦に送り込んで負圧を弱める装置を考案し、これが定性的に所期の働きをすることを確めた。

特長としては、次の通りである。

- (1) 風力を利用するので動力としてのエネルギー消費はない。
- (2) 実用上風の方向の影響を受けない。
- (3) 保守管理が容易である。
- (4) 比較的軽量である。

2. 研究の目的

風が吹くと煙突のような円柱体の背面にはカルマン渦の発生源となる負圧の渦が発生す

* 理工学部機械工学科教授 公害防止工学

ることは周知のことである。この影響は煙突排出口の外周の大半に負圧となってあらわれ、排出された煙を煙突の外面に沿って下向きに吸い込むいわゆるダウンウォッシュ (Down Wash) の現象を示したり、排煙中の煤塵を周辺に撒き散らすなどの公害問題を起している。

この対策として、煙突からの排煙速度を風速の2倍以上にするなどが考えられるが、これには大きな動力の損失が伴う。筆者は風の方向に関係なく煙突周辺の負圧に吸い込まれる排煙量が少なくなる方法について特許出願し、昭和51年特許第846011号「排煙の着地濃度低減法」で認可を受けたので、その実現性の緒をつかむためこの研究を進めた。

なお性能を左右する諸元との関係、ノウハウ的な問題に関しては次の段階の問題として、それ等がまとまった時点で報告するつもりである。

3. 流れの中の円柱周辺の圧力分布

実際の流れの中にある円柱の周囲には図1のような流れがあり、円柱の背面には負圧の渦が発生する。これが発達すればいわゆるカルマン渦となるのであるが、この渦が原因で円柱の周囲の圧力分布がどのようになるかを示したものが図2である。

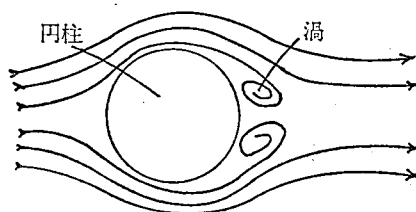


図1 円柱周囲の流れ

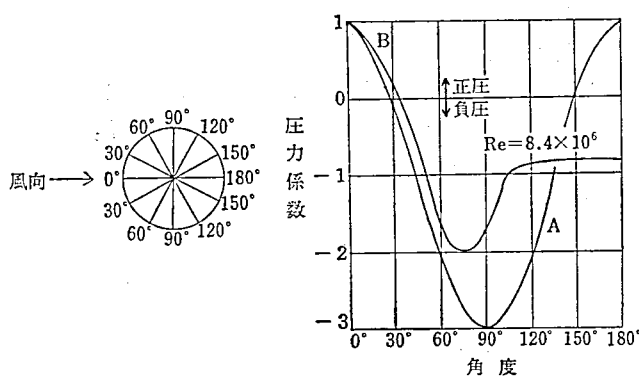


図2 円柱周囲の圧力分布

流れに面する円柱の正面を 0° とし、円柱の表面を流れに沿って左右に 30° ずつに分け背面を 180° とした。表の横軸には円周に沿って目盛った角度を、縦軸には圧力分布を示す圧力係数をとった。図中 A 曲線は粘性のない場合の分布を示し、B 曲線は実在の流体の

場合を Anatol Roshko の文献から引用したものである。A 曲線は 0° を中心に左右位 30° は正圧であるが、 30° を超えるあたりから負圧、 90° で最低となり、ここから 180° にかけてそれ迄と逆の経過を経て元の値に回復する。B 曲線も $0^\circ \sim 80^\circ$ 位は A 曲線と似た経路を辿るが、最低値から回復しても 180° 付近でさえ負圧の範囲に止っている。

このような現象のあらわれる原因は円筒の背後に発生する渦によるものであるから、前面の正圧の空気を負圧の部分に送り込めばこの空気は最も低圧な渦の中心に向かって流れ込み負圧の谷を埋めるので、負圧の部分が弱まって煙突から渦に巻き込まれる煙の量が減ることが推測される。

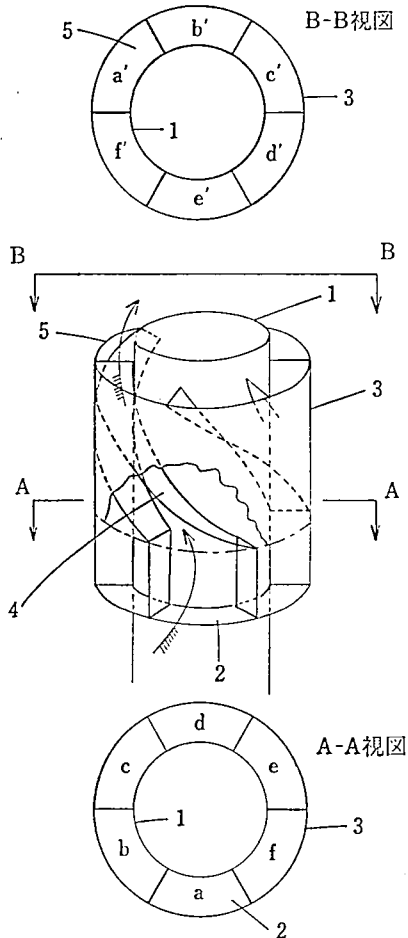


図 3 装置の構造

4. 装置の構造

この装置は煙突の頂部に取りつけるもので図 3 のように内筒①と外筒②、隔壁④および案内板③から成り立っており、内筒の径は煙突の内径と同じである。本例では図 3-(i) のように円周方向に 6 ケの空気取入口がありそれぞれは隔壁で仕切られている。隔壁には螺旋状の案内板が取り付けられ、これら案内板と内、外筒によって形成される螺旋状の通風路は図 3-(i) 空気取入口 a から入った空気を図 3-(ii) 吐出口 a' 迄運ぶようになっている。

5. 通風路の形状

この装置は中、大型の煙突(頂径 0.3 ~ 数 m) に取りつけることを対象に考えているので通風路の断面は矩形となるが、その通風路の形を決めるため 1 本の風路について図 4 のようにまず円形の断面を有する直線状の単純化したものについて理想的な形を求め、実際の通風路は極力この理想的な形を螺旋型の風路に取り入れるようにした。

図 4 における数字はそれぞれ次の位置を示している。

- 1: 空気取入口
- 2: $D^s \times L_D$ 部
- 3: 収縮部
- 4: $d^s \times L_d$ 部
- 5: 空気吐出口

空気取入口の後に広いスペースがあるが、これは中心に向かって流れている空気流がここで圧力を回復しさらに 90° 方向転換して通風路に入る際の摩擦損失を減少させるのに効果がある。

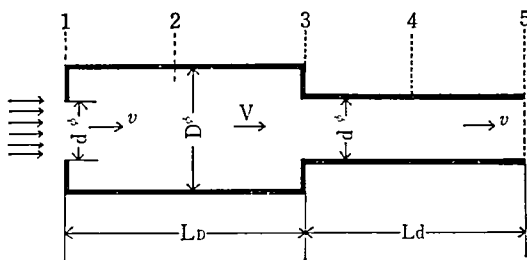


図 4 通風路

空気取入口の径 d は通風路 4 の径と同じにした。すると空気の流れについて次の式が成立する。

$$P_1 + \frac{\gamma v^2}{2g} = \zeta_i \frac{\gamma v^2}{2g} + \lambda \frac{L_D}{D} \frac{\gamma}{2g} V^2 + \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \frac{\gamma v^2}{2g} + \lambda \frac{L_d}{d} \frac{\gamma}{2g} v^2 + \zeta_0 \frac{\gamma}{2g} v^2 + P_5 + \frac{\gamma v^2}{2g}$$

ここで V, v : 空気速度

P : 圧力

γ : 空気の比重量

g : 重力の加速度

λ : 管摩擦係数

ζ : 損失係数 (i 空気入口, 0 空気出口)

C_c : 収縮係数 = $\frac{\text{流れの収縮面積}}{\pi/4d^2}$

通風路内の空気の体積の変化を無視すれば

$$D^2 V = d^2 v \quad \text{から} \quad V = \left(\frac{d}{D} \right)^2 v \quad \text{を上式に代入して整理すると}$$

$$(P_1 - P_5) \frac{2g}{\gamma v^2} = \zeta_i + \lambda \frac{L_D}{D} \left(\frac{d}{D} \right)^4 + \left(\frac{1}{C_c} + 1 \right)^2 + \lambda \frac{L_d}{d} + \zeta_0$$

$$= \zeta_i + \lambda \left\{ \frac{L_D}{D} \left(\frac{d}{D} \right)^4 + \frac{L_d}{d} \right\} + \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \zeta_0 \quad \text{となる。}$$

この式から圧力損失 ($P_1 - P_5$) を小にするためには右辺を小さくすればよい。すなわち

- (i) d/D を小さくするためには空気取入口後ろの室を大きくする。
- (ii) 収縮係数 C_c を大きくするよう収縮部の絞り方に注意すること。
- (iii) ζ_i, ζ_0 を小さくするために出入口に流線的に無理のない曲線を用いること。
- (iv) L_D, L_d はできるだけ短くするなどである。

この装置については実用上の問題を考えて次のような条件を設けた。

- (1) 煙突は前述のように中、大規模のものを対象とする。

(2) 外筒を大きくすれば吸込空気量も増えそれだけ効果はあると考えられるが、今回は煙突吐出口径の 90% 増に抑えた。これは現段階では特に根拠はないが後日外筒の大きさと性能の関係については調査する予定である。

(3) 材質は鋼板、溶接構造とするため通風路の断面積は矩形になる。

通風路の形状については前の計算を基礎としていくつか考えられるが、そのうち代表的なものを図 5 のように取りあげた。

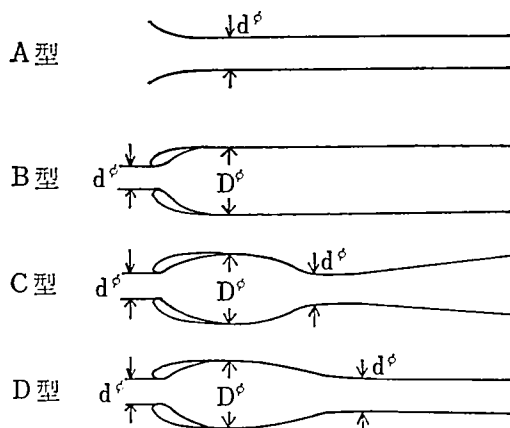


図 5 通風路の形状 (1)

- A 型 この型は取入口から吐出口迄同径でベルマウスを有している。流路の面積が全長にわたって小さいこと、空気取入口からほぼ直角に曲って螺旋状の通風路に移る部分があり抵抗損失の大きい欠点がある。風の方向に大きなベルマウスをつけても通風路全域の総合抵抗に見合う風量しか流入しないので、余分な空気はベルマウスに沿って一旦は管路に侵入しようとしても方向転換して逃げてしまう。
- B 型 空気取入口から入った空気は壁に沿って徐々に膨張し風速は下り、圧力は回復する。全域にわたって流路が大きいので圧力損失は少ない。ただし装置の外径は大きくなる欠点がある。
- C 型 空気取入口付近は B 型の通りとし、図のスロートに相当する部分の径を d としてそこから空気出口にかけて空気流が剝離を起さぬ程度に徐々に拡げていく方法である。これを製作上の問題として考えれば、図 6-(i) のように外筒を上部にい

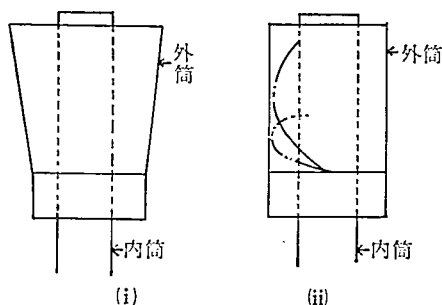


図 6 通風路の形状 (2)

くほど拡げるか図 6-(ii) のように案内板のピッチを空気出口に向けて徐々に大きく、すなわち通風路を段々に急にしていくことで断面積は大きくしていくことが

できる。工作の面で合わせ作業が多少複雑になる。

D 型 A, B, C 型を折衷したもので効率の点では C 型に多少譲っても工作しやすいように考えたものである。取入口の先端は B, C と共通であるが充分ふくらみを持たせ取入口 d から D への拡がり空気流の剝離の起らぬよう徐々に拡げ、また D から d への絞りにも収縮係数が小さくならぬように注意する必要がある。空気取入口から通風路に移る際 90° の方向変換は直後の径の大きい D の所で行われるので圧力損失を小さくできて好都合である。

6. 実 験

今回の研究の目的は前記のような構想で果して実用化の見込みがあるかどうかを見極めることであり、大気中で風が流体抵抗のある通風路を吹き抜けるかどうかであった。形が大きくなるのを厭わなければ外筒を大きくして通風路の抵抗を減らせば風が通りやすくなることは予期されたが、外筒の大きさが常識的範囲に収まるものかどうかは見当つかなかった。そこで図 7、表 1 のような模型を X, Y, Z の順で改良を加えながら作ってみた。左端は 65φ の内筒である。

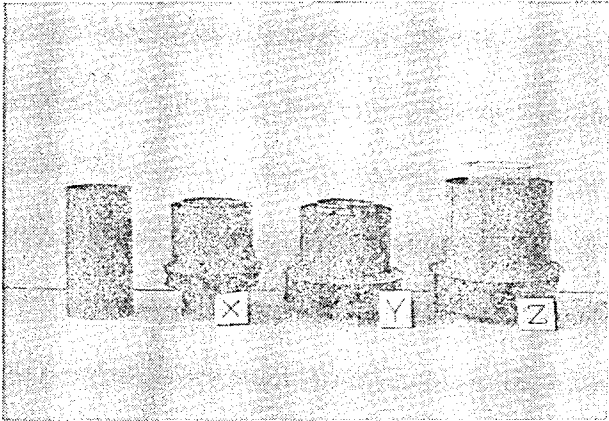


図 7 装置試作例

表 1 試験用試作模型の仕様

	X	Y	Z
内筒径 (di)	65	65	65
外筒径 (do)	85	100	120
通風路数	6	6	6
取入口から吐出口までの巻付角	180°	120°	100°
投影通風路面積 内筒面積	0.71	1.38	2.43

これらの模型の内筒径 (d_i) は一定であるが、その他の部分については実験の様子を見ながらその部分だけ少しずつ改良していったので相互間には完全な相関関係はない。案内板の傾斜角の大きい程、通風路の断面積は大きくなり、長さも短くなるので、X, Y, Z の順で通風路の抵抗は減っている。結果として X, Y については風が吹き抜ける効果は認められず、Z について初めて効果が認められた。

そこで Z について次の3つの状態について確認することにした。流体的には、

- (i) 内筒から発生する煙の流れの状態
- (ii) 空気取入口から吐出口迄の空気流の状態

および

- (iii) (i) (ii) の両者が最終的に混合した状態

であるがこれを項目別にみると

- (1) 内筒からの発生ガス

実際の煙突や排気筒からの煙やガスの排気速度は小さい程風の影響を受けやすいから今回のような定性的な実験には悪い条件の下で考えておけばよいので、煙発生源から自然の状態で発生する煙をそのまま利用し、とくに動力的に排出速度を与えることはしなかった。

- (2) 空気取入口から吐出口迄の空気流の状態

空気取入口から煙を吹き込むと排出口から煙が出てくるのは当然であるが、自然の風の中に置いて風が取入口から螺旋状の通路を通り抜けて出てくるかどうかはこの実験の核心である。

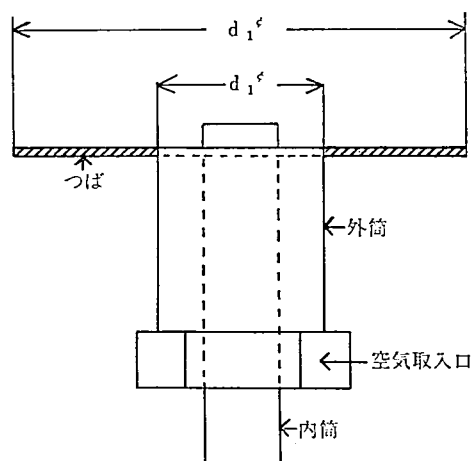


図 8 つば

実際の状態とは異なるが (i) (ii) の流れが混合せぬよう外筒の上端に図 8 のようなつばをつけ、つばから下の部分を自然の風 (1 m/s 位) にあてて通風路を通った空気が吐出口から出てくるのを、線香の煙や木綿針の先に絹糸をつけたプローブで確認できた。

またつばを外した状態で空気取入口付近を前記のプローブで探ってみると、ここから空気が通風路内に吸い込まれるのが観察され、また外筒 (堅紙製) の外側から数ヶ所通風路内にマチ針を通して先端に絹糸をつけ、針を前後させてそれぞれの

位置で空気が通路内を吹き抜けていく様子を確認した。

(3) 同時試験

この試験は従来の煙突を代表する内筒だけの場合と改良型の内、外筒をもったものとの排煙状態を比較観察するのであるが、両者を同時観察するため共通発煙源を用いたのではたとえ両者の中心距離を外筒の2倍程度離しても相互に干渉が起り煙の調子が絶えず変動するので各独立した同一条件の発煙源で同一風速のもとで比較することにした。

(a) 発煙剤

発煙材は実験の内容、規模、発煙量、発煙設備等によって選択の基準も異なってくるが今回の実験では次の理由で主としてドライアイスを用いた。

(i) 線香 煙のゆらぐ程度の時はよく見えるが風速が 1 m/s 以上になると稀薄になって見難くなる。

(ii) 煙草 線香と同じ(殆ど利用しなかった。)

(iii) バルサンロッド V (中外製薬製)

薄い褐色を帯びた白煙で発煙量も多く1分以内の観察には適当であるが、殺虫剤による毒性和特有の刺戟臭やヤニの付着する問題があり、戸外の補助的実験に使用した。

(付記(1) 参照)

(iv) ドライアイス (1 atm の昇華温度 -78°C)

ビーカーに常温の水を入れドライアイスの小片を入れると激しく沸騰して白煙を発生する。次第に水温が下るとこの現象は衰えていくが、この過程で沸騰の比較的静かな瞬間を選ぶと撮影に都合よい。この白煙はミストで無臭無害であるが水滴の付着には注意を要する。ドライアイスの保存はデュワ壺(魔法壺)に入れても2~3日で大半を消失することがある。

(b) 風力源

この実験には発煙剤としてバルサンロッドあるいはドライアイスを使用するので機械的振動に与える影響はよくないので、本学の原動機実験室の翼列風洞を使用することは止めて次の方法によった。

(i) 風

バルサンロッドを使用する時は早朝環境が静かで $1\sim 2\text{ m/s}$ の風が静かに吹いている

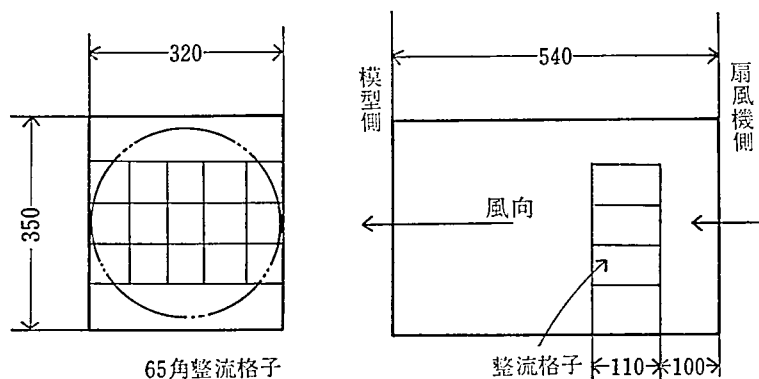


図 9 整流格子

時がよい。4 m/s 位になると一般に風向、風速が絶えず変化し息をついたりするので、このような時には煙と風との関連をつかみにくく判別不可能になる。

(ii) 扇風機

少し安定した風向と風速が必要な時には家庭用の扇風機を利用した。ただ羽根の軸を中心に「ねじ」状の気流になっているので図 9 のような整流格子を扇風機の前に置いて 2~2.5 m/s 程度の平行流に近づけて使用した。(付記(2)参照)

7. 実験まとめと結論

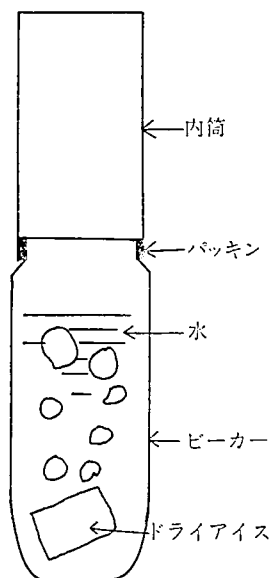


図 10 発煙装置

次に同じ風速の下で従来型の内筒だけの排煙の状態が改良装置をつけてどのように改善されるかを示す実験である。

図 10 のような内容 400 c.c. で内筒とほぼ同径のビーカーに 300 c.c. 位の常温 (20°C) の水を入れ、6 c.c. 位のドライアイスを入筒を通して水中に入れると激しく沸騰しミストの白煙を生じ次第に内筒内を上昇する。

もし無風の状態であれば図 11-(a) のように白煙は内筒の頂上から溢れ表面を覆うようにして下っていく。ここで約 2~2.5 m/s の横風を送ると、図 11-(b) のように白煙は内筒の背面に生ずる負圧の方に集まり内筒から出る白煙をこの中に巻き込んでいるのが見られる。

次に改良案の二重筒のものについて同じ操作をしたものが図 12-(a) (b) で、(a) は無風状態で白煙は内筒から通風路を逆に流れて空気取入口から外へ出ているが、ここで約 2~2.5 m/s 程度の横風を送ったものが図 12-(b) である。この場合、前者に比して煙突背面の流れや巻き込みはほとんど見られない。

この実験で風速をさらに上げると白煙が稀釈されて見難くなるだけでやはり同じ傾向を示す。写真の中に装置の前方に小さなスタンドと白い糸が見えるがこれは白い絹糸に 5φ位の厚紙を錘としてスタンドから振り子状に吊り下げたもので風の状態を示している。

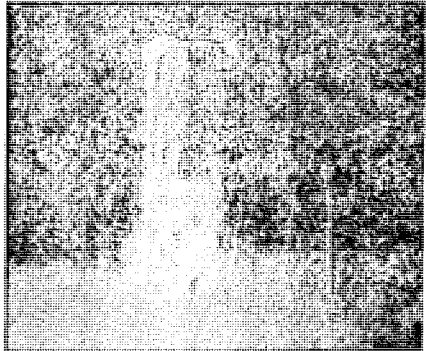

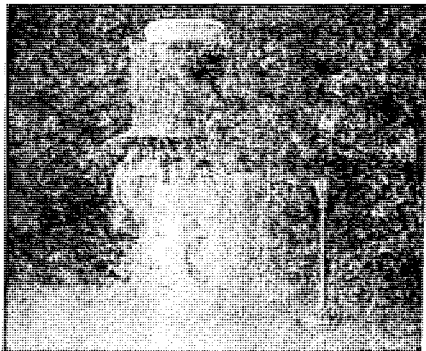
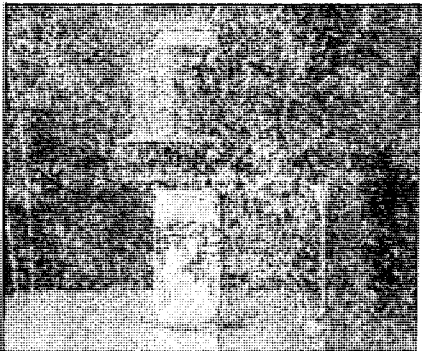
この実験は条件を揃えれば再現性があるのでこれらの事から着地濃度の低減を目的とした今回の試みは定性的には実現化の可能性があると判断した。

なお風速計は日本科学工業製アネモスタ Model 24-3111 を使用した。

8. 考 察

研究をもっと組織的に行なうことも考えていたがそれ以前の問題として此の改良案が果して実用化できるのか否かについての不安を始終もっていた。その一つは不確定の要素が多く、例えば通風路の大きさの選び方によって、あるいは流れを変える「ヒレ」の取り付け方によって成否が分れてしまうような予測できない摸索的要素が多分にあったからである。

見通しがつく迄のつもりで模型作りや実験などを一人で繰返していたため結局長時間を要した。今後はこれを手がかりに組織的な実験を行なうことが可能と思う。

	$v=0$	$v=2.5 \text{ m/s}$
従来型 (内筒のみ)		
	図 11 (a)	図 11 (b)
改良型 (二重筒)		
	図 12 (a)	図 12 (b)
	実験 $v=0$ $Re=0$ ドライアイス使用 撮影 F 40 mm F 2.8 ASA 100 自動露出 直射日光	実験 $v=2.5 \text{ m/s}$ ドライアイス使用 Re (内筒) $=1.2 \times 10^4$ Re (外筒) $=2.2 \times 10^4$ 撮影 左に同じ

(1) 排煙の状態を見て可否を判定するためには実用化を目標とする以上、見た瞬間にその効果が判別できることが望ましい。

今度写真撮影が安定してできたのはこの実験に限って言えば

(i) ドライアイスを用いたことおよびその使用量に対して充分な量 (約 5~6 kg) が入手できたことによる。

(ii) 扇風機から比較的安定した風を得られたこと。

(2) 性能上の問題は第二として「実用化の可能性」を急いで確めるため文献の内容を便宜的に流用解釈したものがある。例えば「煙突排出口周辺の圧力分布」に「無限円柱周囲の圧力分布」を流用したのがそれであるが次の段階では両者の関係を明らかにしておきたい。

(3) また複雑な通風路の形を決める際、直線、円形断面で理想的な形を決め、それに極力真似て螺旋状の通風路を作るように、問題を簡略化して扱ったが、この方法の是非は将来の問題として残した。

(4) 今後の研究の方向は性能を左右する要素として考えられる下記の条件について説明していく予定である。すなわち

- (i) 通風路の数の決め方
- (ii) 通風路の大きさ決定基準
- (iii) 〃 出入口の形状
- (iv) 〃 巻付角の決定基準
- (v) 風 速が性能に及ぼす影響
- (vi) 排煙速度 〃
- (vii) 排煙温度 〃

等であるがこのうち(4)(i)通風路の数は風に対する指向性を少なくする為には多い程良いが反面摩擦抵抗がふえて流入空気量が抑制される。

一方空気取入口は常に複数個働いているのでこれらを総合して効率の良いものを求めたいという意味である。

9. 結 言

煙突と風の問題の一つとしてここでは煙突排出口近傍の研究を進めてきたが、このほか煙突の全長にわたって背面にできる左右の渦が交互にしかも周期的に煙突から分離していくことによって振動を起すことがある。

この両者は別問題のように見えるが根本的には共通の面があり対策も煙突背面の渦を消滅させるか、影響を絶つということでは一致している。従って一方の解決案が他方にとっても解決案となることもあり得る。しかし何れの場合も風に対して煙突の無指向性が条件として要求されると対策は複雑になる。

この研究には多くの方々から御協力をいただいた。構想の段階で日立製作所 掘機械研究所長から御自身の論文をいただき、また関連の文献蒐集に協力していただいた。本学の花田教授からは装置の通風路に関し航空機のカウリングに関する文献をいただき、御経験や御注意を伺った。梶島教授には流体および実験に関する相談にのっていただき、御意見を参考にさせていただいた。緒方助手には「流れの可視化」について長期間にわたって情報の交換や実験器具の選択、準備に協力していただいた。併せて謝意を表する次第である。

10. 付 記

(1) バルサンロッドによる発煙

これは外径 17φ×内径 60φ×長さ 80 (1本 15 g) の素焼陶器状のものに殺虫剤 (DDVP) が滲透させてあり点火容易で最初のうちは制御できぬ位発煙が盛で、あとに黒い燃え殻が残る。付図 1 参照。

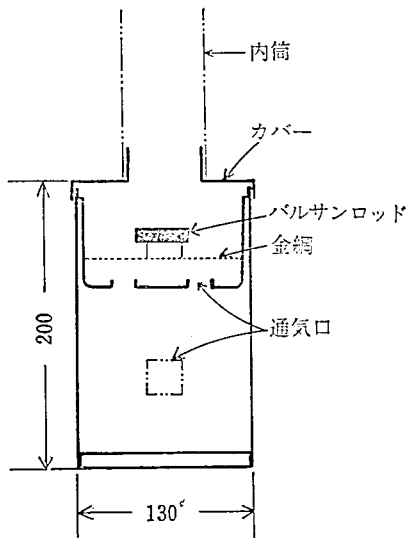
今回の実験では発煙量のもっと少ないものが望ましかったのでバルサン香 V (1本 3 g) の入手に努めたが発売中止しているせいか入手できなかった。

したがってロッドの外側の向い合っている位置にたて方向に鋭い刃物で切れ目を静かに入れて上手に割ると唐竹割状のものができるのでこれを使用した。

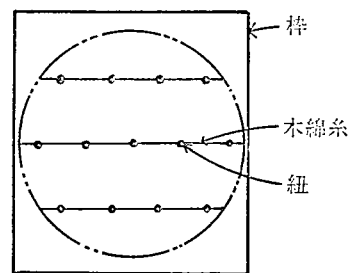
(2) 整流格子の効果について

出口側からみて付図 2 のように木綿糸を 3 本枠に張り上段から 4, 5, 4ヶ所に厚さ 0.18mm

×巾 1.5 mm×長さ 140 mm の合繊系の紐をとりつけて試験のため 2~2.5 m/s 位の風を送りこれらの紐が殆ど水平に棚引き各紐にも特に異状な動きが起っていないことを確認した。



付図 1 発煙装置



付図 2 整流格子(前方)

参考文献

- 設楽正雄 大気概論 オーム社
 堀 栄一 平行円柱に加わる空気力 No. 23 第 37 期機械学会講演会
 伊藤亘自 大気汚染における高煙突からの拡散問題 ケミカルエンジニアリング 1971 年 9 月号
 北川徹三 大気汚染防止の問題点 日本機械学会誌 Vol. 74. No. 626
 笠口展宏 工場排ガスの拡散について 〃 〃
 浅沼強綱 流れの可視化ハンドブック 朝倉書店
 A. Roshko. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number
 J. Fluid mechanics. Vol. 10 (1961) No. 3.
 A. H. R. Freedom. Possible Future Development of Air-cooled Aero Engines.
 Bruno Eck. Technische Strömungslehre. Springer Verlag.
 W. Merzkirch. Flow Visualization. Academic Press.

(53 年 9 月 8 日受理)