U. D. C. 621.359.4

新しい電気空気清浄法と空気清浄効果の検定法に関する研究

Study on New Air Cleaning and its Test Method for Cleaning Air Effects

諫　早　典　夫*
Fumio Isahaya

内　容　梗　概

2段式電気集じん法による空気清浄について，新しい計測手法として鋼球落下法，放射性追跡子法，電子管式エアロゾル計数法，メンブランフィルタ栄養パッド法あるいは空気イオン測定器などを駆使して広範囲な基礎研究を行なった結果，(1) 電離部に関しては低コロナ損失で能率的な粒子帯電が行なえるコロナ電界広がり角度の圧縮法が開発され，(2) 集じん部に関しては集じん付着量分布を均等化して保じん容量を増加できる扇形多孔電極が開発され，(3) 気中バクテリヤに対して十分な滅菌効果の得られる条件が明らかにでき，(4) 空気清浄効果を半減時間で示すことにより，空気清浄能力の優劣を端的に比較でき，また，所要の空気清浄効果が得られる処理風量×集じん率との関係が明らかにされた。また (5) 空気イオンの計測法を検討し，コロナ放電による室内空気のイオン濃度の人工的調整法が確立できた。

1. 緒　　言

電気集じんの歴史は古く，その実績も高く評価されているが，最近の諸工業の急激な発展に伴って，大気汚染防止や生活環境の改善がますます強く要望されるようになり，その重要性が認識されると同時に，その性能の改善や原価低減の必要性も増している。

電気集じんには，煙突などから排出される高濃度煤じん (1～100 g/m³ of gas) の処理に適した1段式と，自動車の廃気ガスなどで汚染された大気の比較的，低濃度煤じん (0.1～10 mg/m³ of air) の処理に適した2段式とがあるが，本論文は後者に関する総合研究報告である。

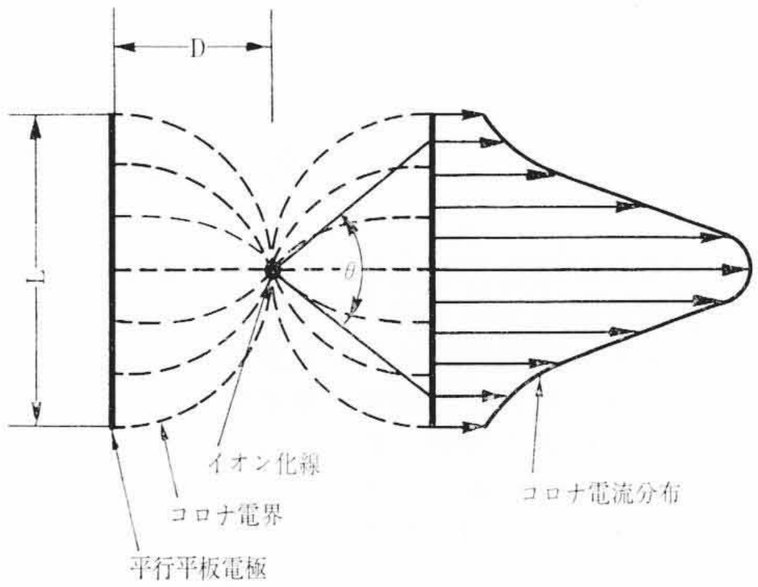
従来，これらの設計に当たっては，経験と実績とに偏重しがちであったが，今回，基礎研究に基づいた合理的な設計が行なえるように広範囲な研究が電離部および集じん部について行なわれた。従来，2段式電気空気清浄器の集じん性能は，もっぱら，ろ紙黒化法で調べられていたが，これは商用試験には適しているが，さらに深くつっ込んだ諸集じん特性や清浄効果の究明は，本法では不可能である。そこで，本研究では新しい計測手法として鋼球落下法，放射性追跡子法，電子管式エアロゾル計数法あるいはメンブランフィルタ栄養パッド法などを駆使した。また，このほかに室内空気のイオン濃度の人工的調整法についても二，三の研究を行なった。

2. 電離部の研究

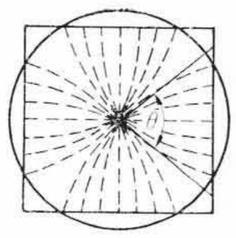
2段式電気集じんの電離部には，その操作性や構造的な面ですぐれている心線対平行平板形電極が使用される。この電離部に要求される最も重要な特性は，できるだけコロナ損失を低減して，しかも最も能率的な粒子帯電が行なえることである。本章では，このために，粒子帯電と電離部電極構造，寸法および静電界構成法との関係について理論解析を行ない，さらに鋼球落下法[(1)~(3)]および電子管式エアロゾル計数法[(4)]により，これの実験的検証を行なった結果，電離部の適正な設計諸元を決定する基礎資料が得られ，またイオン化線のコロナ電界の広がり角度を副静電界で縮小する新形式の電離部が開発できたことを述べる。

2.1 粒子帯電に関する理論解析

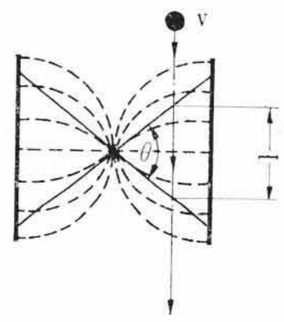
心線対平行平板形電極のコロナ電界分布は第1図のように示される。すなわち，コロナ電流はイオン化線の正面(中心)で最大となり，その中心から左右に離れるにしたがい急激に減少するベル・ジャー形分布である。いま，このコロナ電流が極端に小さく，粒子の帯電には，ほとんど関与しない接地極板の両端部付近を除き，コロナ電界の広がり角度 θ という帯電パラメータを導入する。また，第2図のように正方形電極のコロナ電界分布が，同図における同心円筒形電極のそれに相似するものと仮定すると，この正方形電極における平均コロナ電界強度 E は



第1図　心線対平行平板形電離部のコロナ電界と広がり角度 θ



第2図　方形電極のコロナ電界と広がり角度 θ



第3図　電離部における粒子通過距離 l とコロナ電界の広がり角度 θ との関係

$$E \simeq \sqrt{\frac{2i}{K}} \quad \cdots\cdots(1)$$

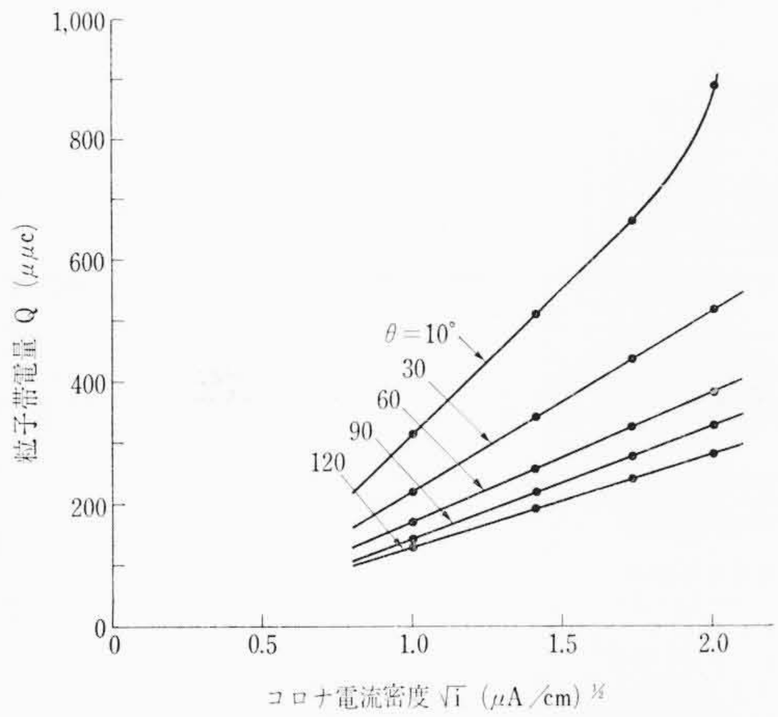
ここに，　i：イオン化線単位長当たりのコロナ電流

K：イオンモビリティ

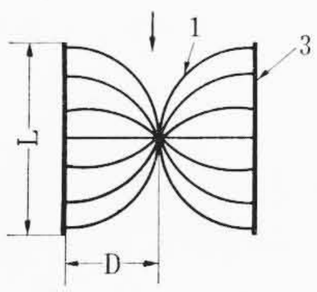
そこで，これから第2図のように角度 2θ に包含されるコロナ電界を切り取ったものが，第1図の心線対平行平板形電極のコロナ電界に等価するものと考えられるから，結局，このコロナ電界強度 E は

$$E \simeq \sqrt{\frac{i}{K} \cdot \frac{360}{\theta}} \quad \cdots\cdots(2)$$

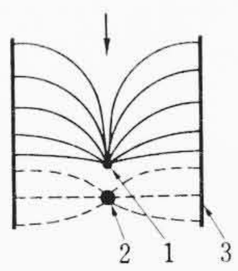
* 日立製作所日立研究所



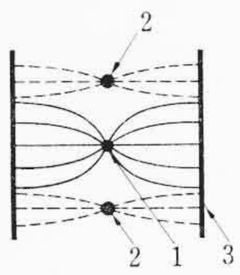
第4図　粒子帯電量 Q に及ぼす電離部コロナ電界広がり角度 θ およびコロナ電流 i の影響



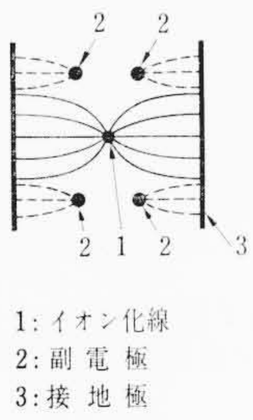
第5図　従来方式の電離部



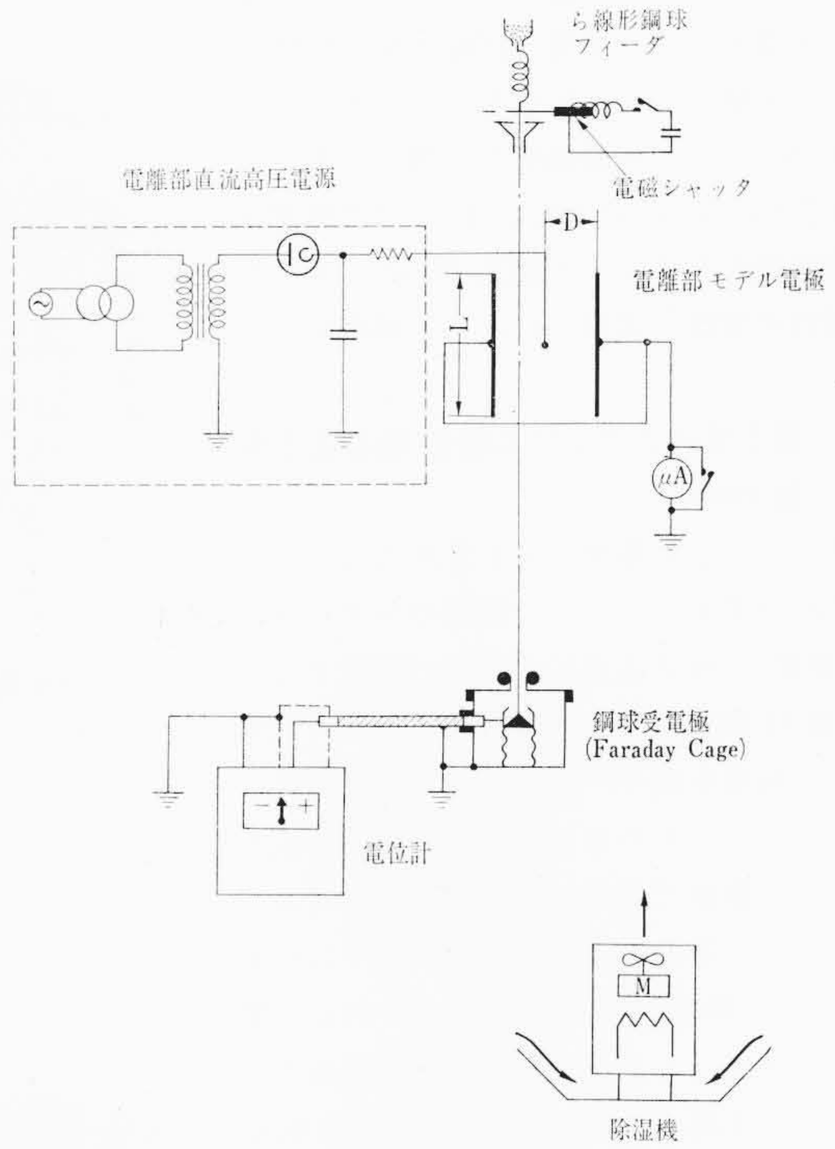
第6図　静電界によるコロナ電界の圧縮（その1）



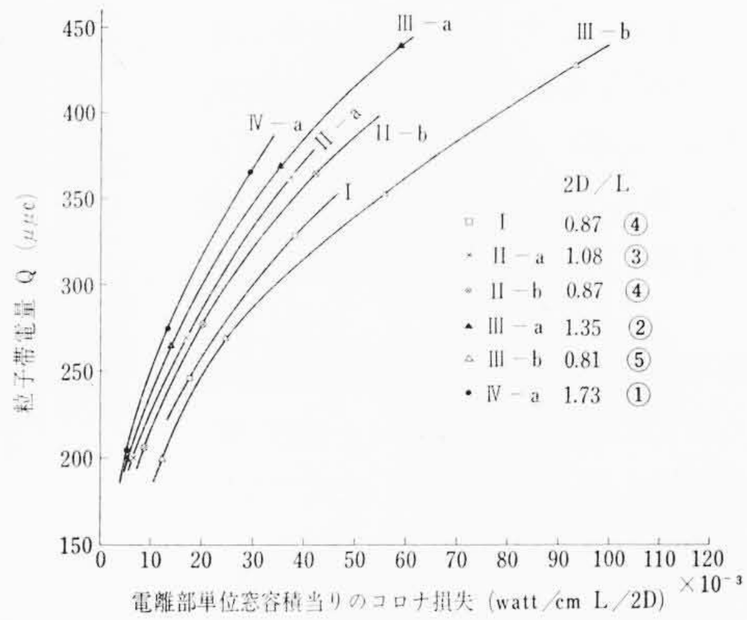
第7図　静電界によるコロナ電界の圧縮（その2）



第8図　静電界によるコロナ電源の圧縮（その3）



第9図　鋼球落下法による電離部の研究



第10図　粒子帯電量に及ぼす電離部のコロナ損失および電極寸法比の影響

で求めることができる。一方，導体粒子がコロナ電界 E を通過する際に得る帯電量 Q は，

$$Q=3a_0^2E\frac{1}{1+\dfrac{1}{\pi N_0e_0Kt}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに，　a_0:　導体粒子の半径
N_0:　イオン密度
e_0:　単位電荷量
t:　帯電時間

第3図に示されるように，導体粒子が v なる速度で広がり角度 θ なるコロナ電界 E を通過（距離 l）する際に得る帯電量 Q は

$$Q=3a_0^2E\frac{1}{1+\dfrac{2vE}{\pi i}}$$

$$=3a_0^2\sqrt{\frac{i}{K}\cdot\frac{360}{\theta}}\ \frac{1}{1+\dfrac{2v}{\pi}\sqrt{\dfrac{1}{iK}\cdot\dfrac{360}{\theta}}} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，　$v=l/t$
で求められる。

第4図は，(4)式から電離部における粒子帯電量に及ぼすイオン化線コロナ電界の広がり角度 θ の影響を求めたもので，これより θ を縮小することにより，コロナ電流 i を増加することなく，粒子帯電量を著しく増加できることが明らかにできた。このことはコロナ電界による粒子帯電は，そのイオン密度と密接な関係を有しているので，結局，コロナ電界の広がり角度を縮小することにより，コロナ電流を増加しなくても，イオン密度が高められ，帯電量が増加できるということを意味している。

2.2　鋼球落下法による実験的検証

電離部イオン化線のコロナ電界の広がり角度 θ を縮小するには，**第5図**に示すように電極寸法比 L/D を小さくすればよいが，これを極端に小さくすることは接地極板端からの逆コロナや火花を誘発しやすくなるのでおのずから制約を受ける。そこで，**第6～8図**に示すように，イオン化線の近くにコロナ放電をまったく発生しないか，あるいは多少コロナが発生してもイオン化線のコロナ電流に比べ無視し得る程度であるような曲率の副電極を併設して，両者をほぼ等電位に保てば，この副電極の静電界によって，イオン化線のコロナ電界の広がり角度を，十分に効果的に圧縮することができる。

第9図はこのような各種の電離部電極にモデル粒子として鋼球を

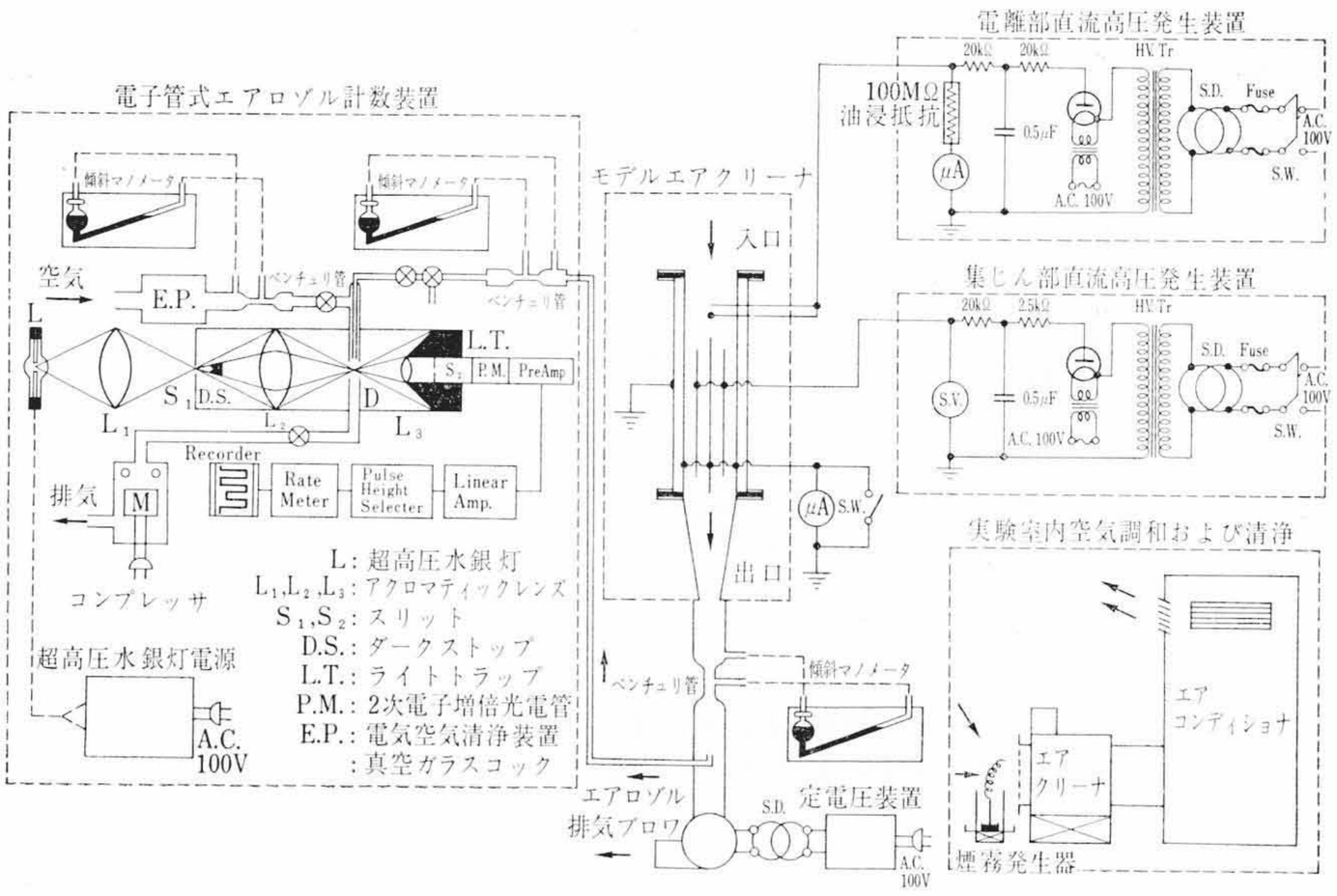
通過させて，その帯電量に及ぼすイオン化線のコロナ電界広がり角度の圧縮効果の影響を確認した実験方法を示したものである。

第10図はこの実験結果の一例であるが，電極寸法比 $2D/L$ の大なるほど，等電離部単位窓容積当たりのコロナ損失 W_i に対する粒子の相対帯電量が著増されることが明らかである。

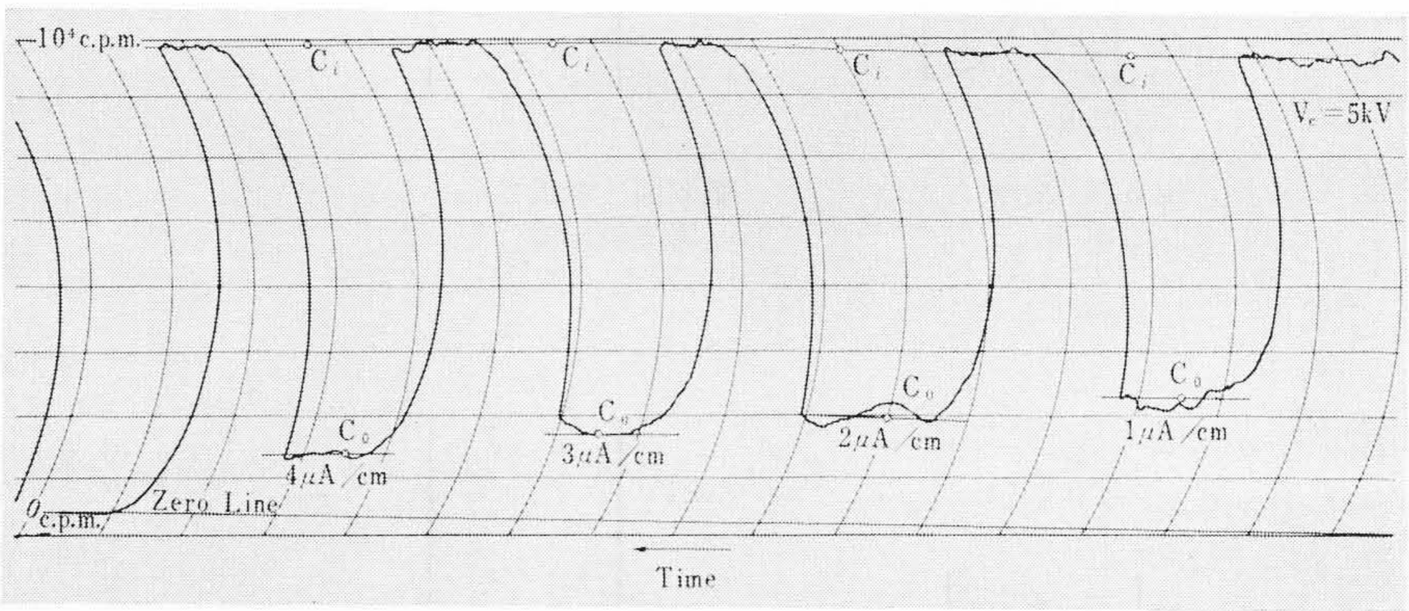
2.3 電子管式エアロゾル計数法による実験的検証

前述のような電離部コロナ電界の広がり角度の圧縮効果を，さらに，実際のエアロゾル(線香煙霧)に対する集じん効果で確認するために，**第11図**に示すように電離部コロナ電界の広がり角度を種々，変えたモデル電気集じん器について，その集じん特性を電子管式エアロゾル計数法で解析した。**第12図**は本法による集じん率の記録結果の一例を示したものである。**第13図**は実験結果の一例を，集じん率 η と集じんパラメータ Z との関係で示したものである。すなわち $\theta \simeq 74^\circ$ の Ⅶ 形に対して，より圧縮された $\theta \simeq 45^\circ$ の Ⅸ 形の集じん率は同一設計諸元に対して著しく向上していることがわかる。たとえば，$Z=19$ の場合，Ⅶ形の $\eta \simeq 83\%$ に対して，Ⅸ形の $\eta \simeq 90\%$ である。等集じん率においては，気流方向の電離部および集じん部の電極長を約20%短縮できることなどの改善効果が明らかにされた。

また従来不明確であった，2段式電気集じんにおける集じん率と電離部コロナ損失 W_c および他の集じん因子との関係が次式で与えられることが明らかになった。

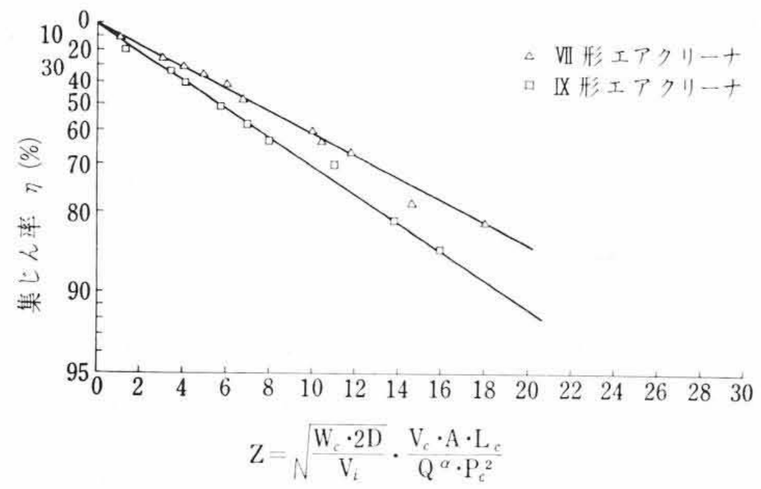


第11図　電子管式エアロゾル計数法による2段式電気集じん器の集じん特性の解析



(C_i：入口濃度，C_0：出口濃度)

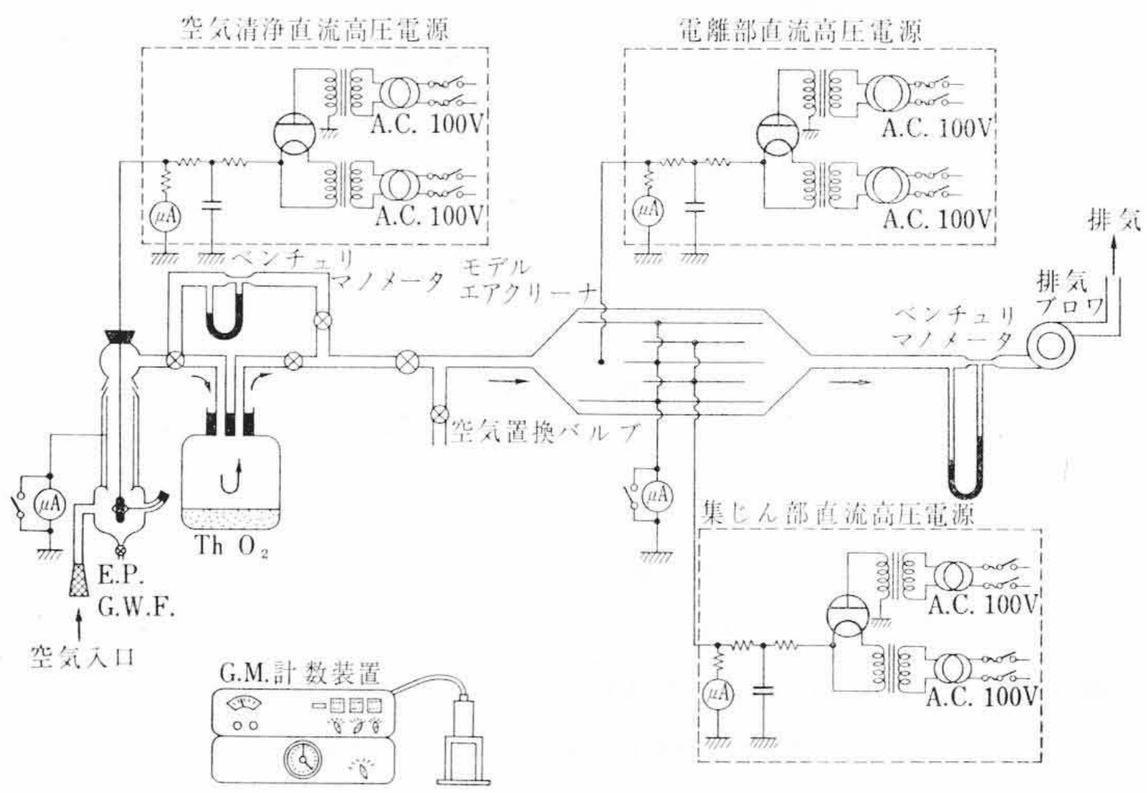
第12図　電子管式エアロゾル計数器による供試電気集じん器の集じん率記録例



第13図　集じん率に及ぼす電離部コロナ電界広がり角度および集じん諸因子の影響

$$\eta = 1 - \exp - \left[X \sqrt{\frac{W_c \cdot 2D}{V_i \cdot \theta}} \cdot \frac{A V_c L_c}{Q^\alpha P_c^2} \right] \cdots\cdots\cdots (5)$$

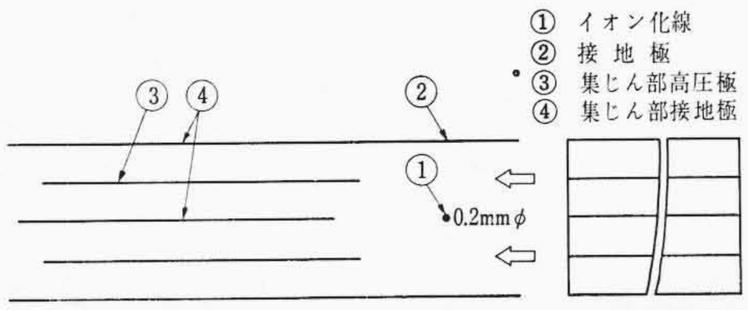
ここに，
V_i：電離部電圧
A：電離部窓面積
V_c：集じん部電圧
L_c：集じん部電極気流方向長
P_c：集じん部極間隔
Q：処理風量
α：実験定数
X：実験定数



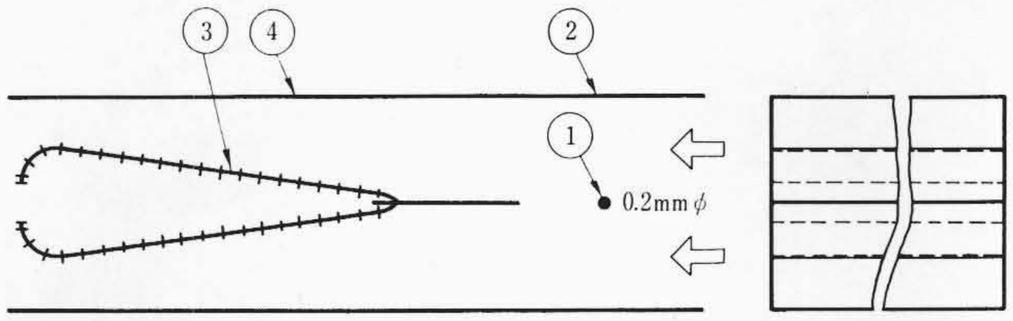
第14図　放射性追跡子(ThB粒子)法による集じん付着量分布の解析

3. 集じん部の研究

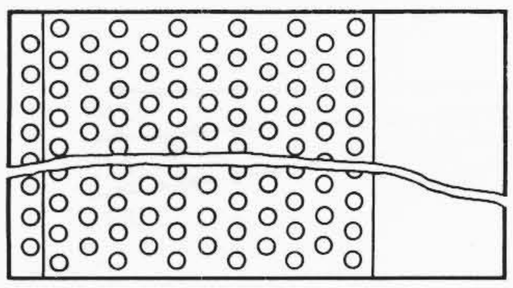
電離部で帯電された粒子が集じん部の静電界に侵入して，どのような動静をたどりながら集じん極に静電的に吸着されるのか，また集じん極板の入口から出口へかけて集じん粒子の付着量分布がどの



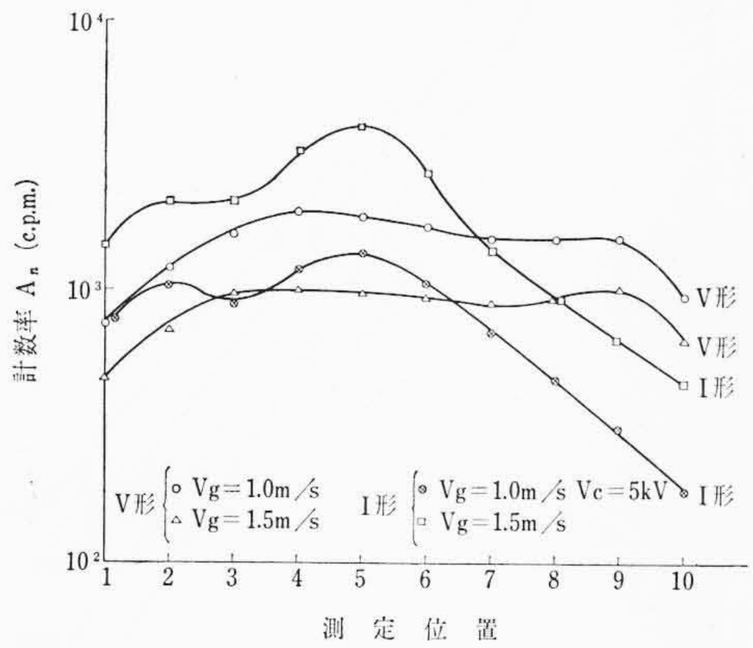
第15図　従来形のモデル2段式電気集じん器（I形）



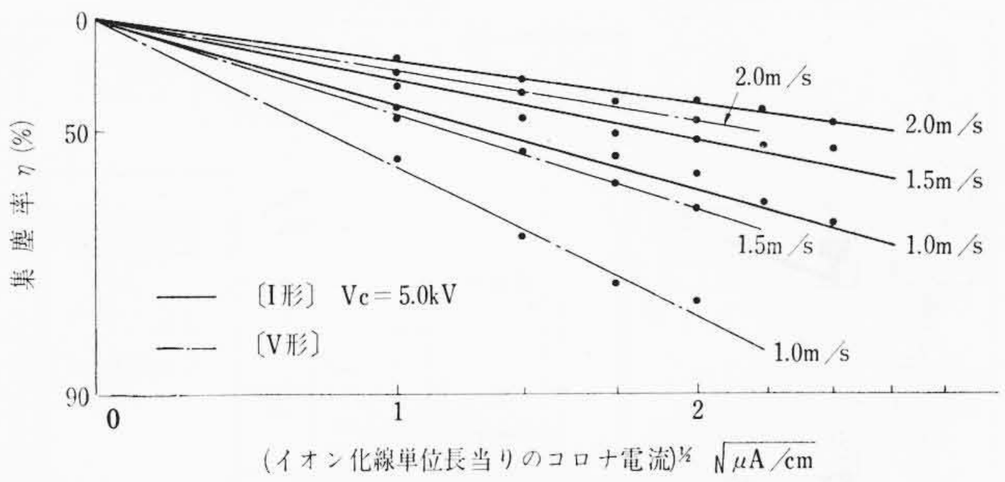
集じん部高圧極(多孔板)



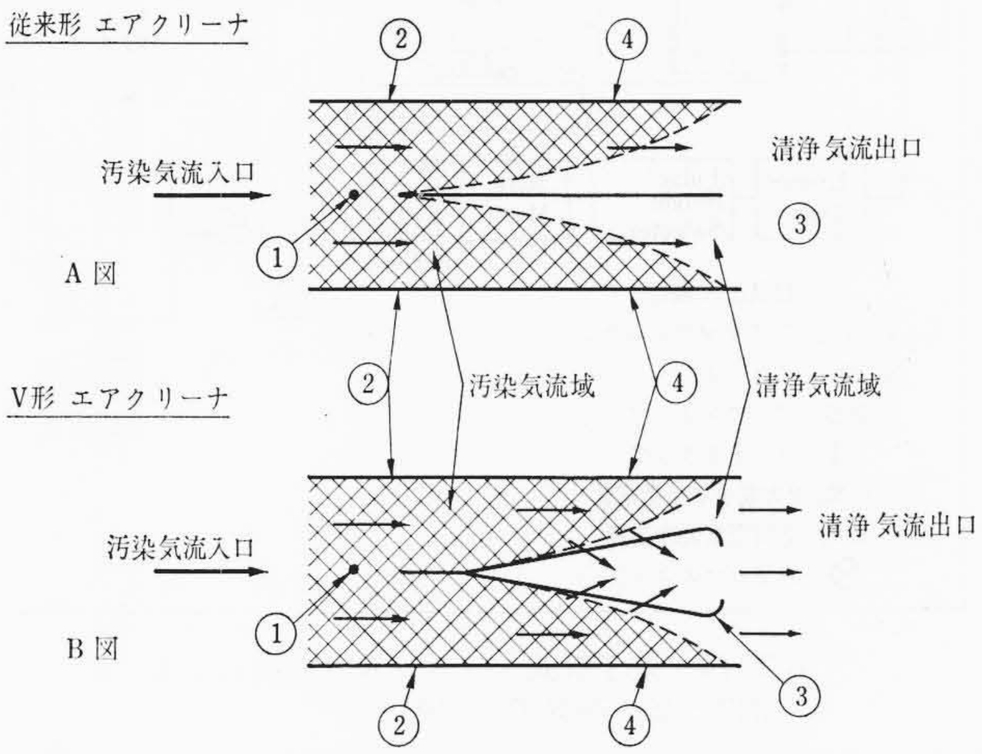
第16図　扇形多孔電極による
モデル2段式電気集じん器
（V形）



第17図　従来形（第15図）と新形（第16図）の
集じん付着量分布の比較



第18図　従来形（第15図）と新形（第16図）
の集じん特性の比較



①: イオン化線　③: 集じん部高圧極
②: 電離部接地極　④: 集じん部接地極

第19図　集じん電界 Grading 法の図解

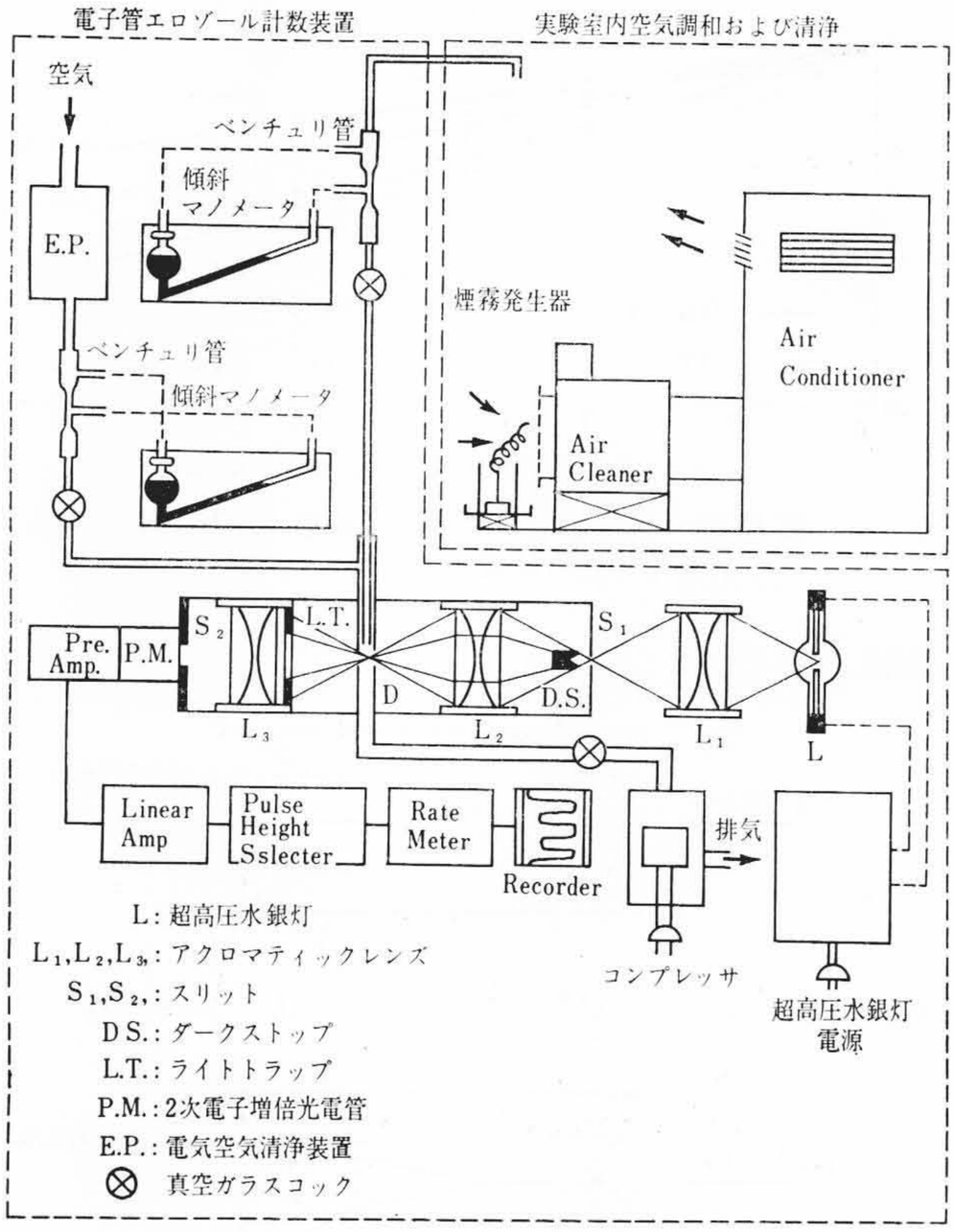
ようになっているかなどを解明することは，集じん部の性能改善に非常に役だつ。

このような解析は，従来の実験法のように，供試電気集じん器の出入口におけるエアロゾル濃度を比較測定することでは不可能である。

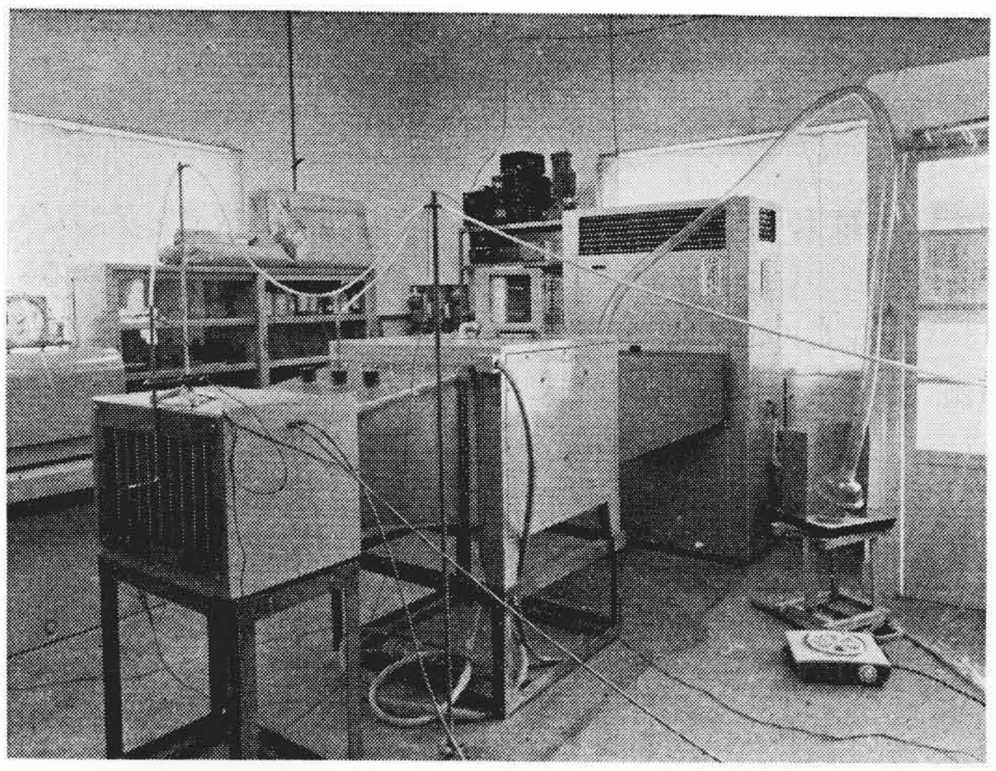
そこで，放射性微粒子（ThB）の追跡子実験による新しい手法[5]でこれを解析した。さらに，この実験結果に基づいて新形式の集じん部電極を開発した。

3.1　放射性微粒子 ThB の追跡子実験法による集じん付着量分布の解析と集じん部電極の改善

実験方法は**第14図**に示してあるように，空気の出入口を備えたガラス密閉容器の中に酸化トリウム粉末がはいっている。このトリウム・ビンに送入される供試空気は，まずグラス・ウール・フィルタで粗じんあいを除いて後，残りの微じんあいが電気集じん器で除じんされて，ほぼ完全に清浄化されるようになっている。トリウム・ビン中には，トリウムの放射壊変で生成される放射性微粒子 ThB, ThC などが気中拡散されて充満しているので，これが前述のようにして清浄化された空気とともに供試電気集じん器に流入する。このようにして供試電気集じん器の集じん極板に集じんされた ThB 粒子の放射能量を入口から出口まで所定の間隔ずつ走査して放射線計測する。**第15図**は従来形の供試電気集じん器の構造を示したもので，これについての実験結果の一例が**第17図**に示されている。すなわち，集じん部における粒子の付着量分布は著しく不均等で，入口側において大きく，出口側に進むにしたがって急減に減少し，その付着量分布はほぼ指数関数的であることが明らかである。このようなことから，集じん部の入口側は急速に汚染し，電極洗浄を要する状態に達するが，一方，出口側では，まだ集じんの余地を残しているというような著しい不均衡を呈しており，もし，これが均等分布に改善できるならば，集じん容量が著増され，同時に電極洗浄周期の大幅な延長とその手間も省けるなど，性能の改善が期待できる。そこで，**第16図**に示すような扇形多孔形電極による集じん電界の Grading 法というのを提案した。これは集じん付着量分布が不平衡になる主因が，煤じん粒子群における粒径，形状，凝集性，帯電量などの相異に基づいて，集じん部における帯電粒子群の静電的偏向速度に統計的な変動が生じていることにあると考えられるので，集じん電界を入口側においてやや弱め，出口側へ向って漸次，強めるようにすれば，従来の平行平板形電極の平等集じん電界において，静電偏向速度の比較的，速い帯電粒子はより出口側に送り込まれて集じんされ，また，比較的，遅い帯電粒子は逆により入口側に集じんされるようになるので，結局，集じん付着量分布の均等化が可能になる理である。なお，多孔電極としたのは，集じん部における気流速度を入口から出口まで，ほぼ一定に保つためである。また，本電極形式は集じん極板群を一括して引き出せるようにすれば，その集じん極板間隔を従来の約4倍に広くできるので，汚染電極の洗浄が非常に容易になる。**第17図**にこの新電極における集じん付着量分布の一例が示してあるが，所期通りの均等分布に改善されていることが明らかにされた。



第20図　電子管式エアロゾル計数法による室内空気清浄効果の解析法

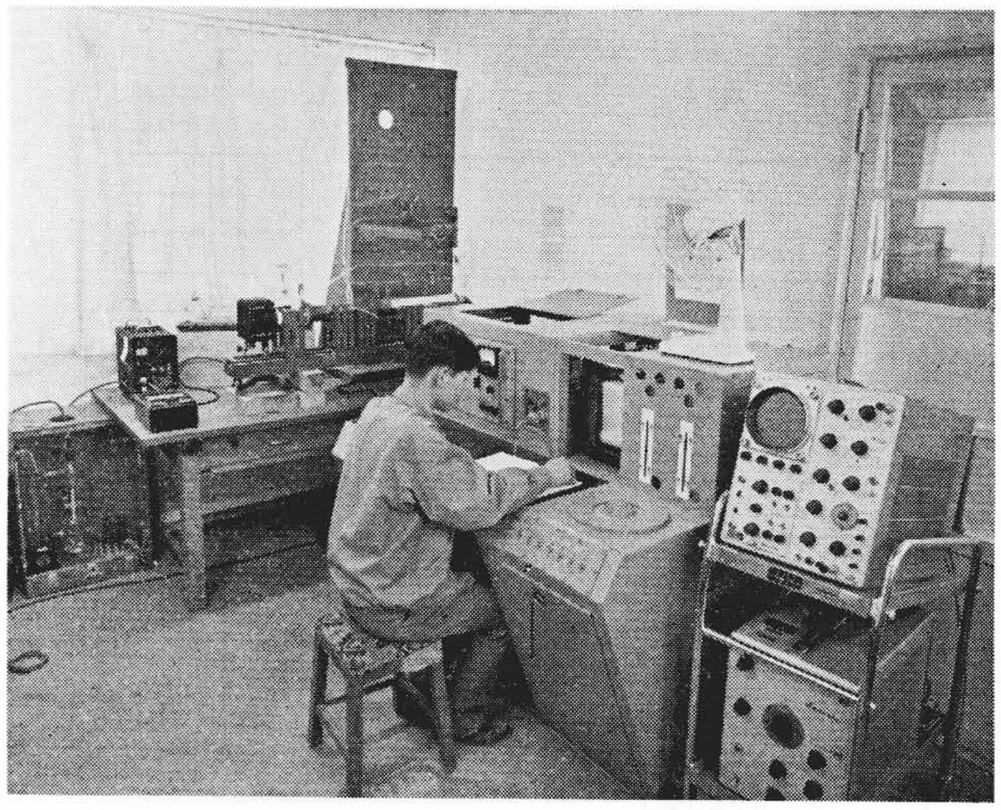


第21図　空気清浄実験室

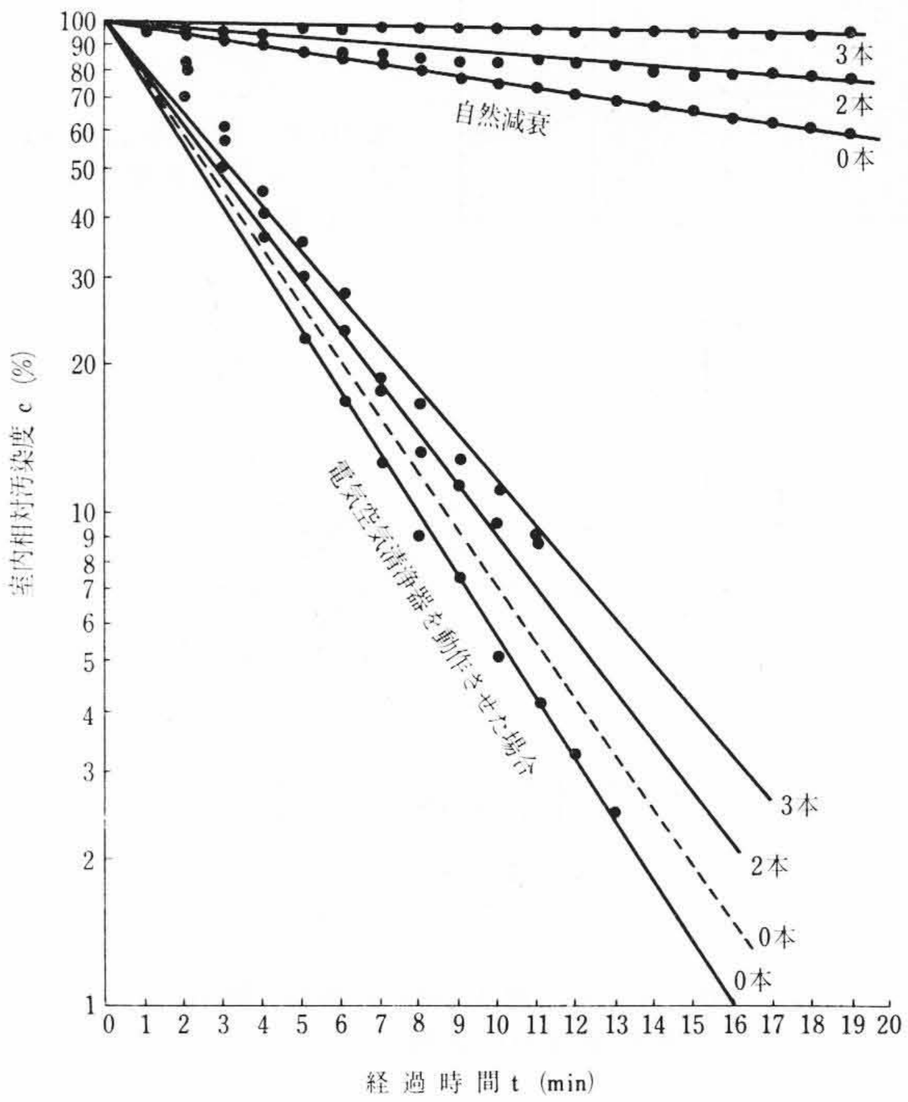
3.2　電子管式エアロゾル計数法による集じん特性の解析

次に，このような集じん電界の Grading 法により，実際に集じん特性がどの程度，改善されるかを電子管式エアロゾル計数法で解析してみた。**第18図**に実験結果が示されているが，本新形式電極（**第16図**）は従来形（**第15図**）に比べ，その集じん性能が著しく改善されており，特に低気流速度においてそれが顕著である。なお，**第18図**において，集じん率が全般に低いのは，実験の都合上，供試電気集じん器の気流方向長を実際のそれに比べ著しく短縮したためである。

次に，集じん電界の Grading 法の原理を**第19図**について概説する。同図（A）の従来形式では，電離部（①，②）のコロナ電界によって帯電された粒子は，集じん部（③，④）を進行するに従って，接地極（④）のほうへ静電的に偏向する。この偏向の程度は出口側へ進むほど大きくなる。したがって，高圧極（③）を中心として粒子をほとんど含まない清浄気流域がほぼ扇形（出口のほうへ末広がり）に展開



第22図　電子管式エアロゾル計数器



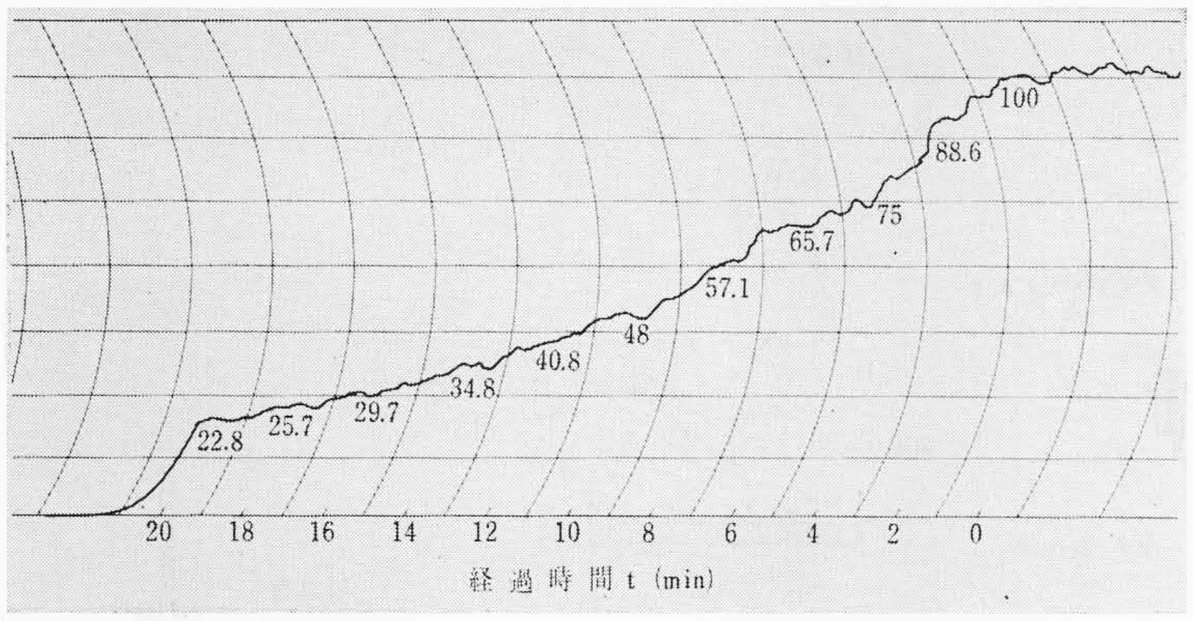
第23図　電気空気清浄器による室内空気清浄効果

される。

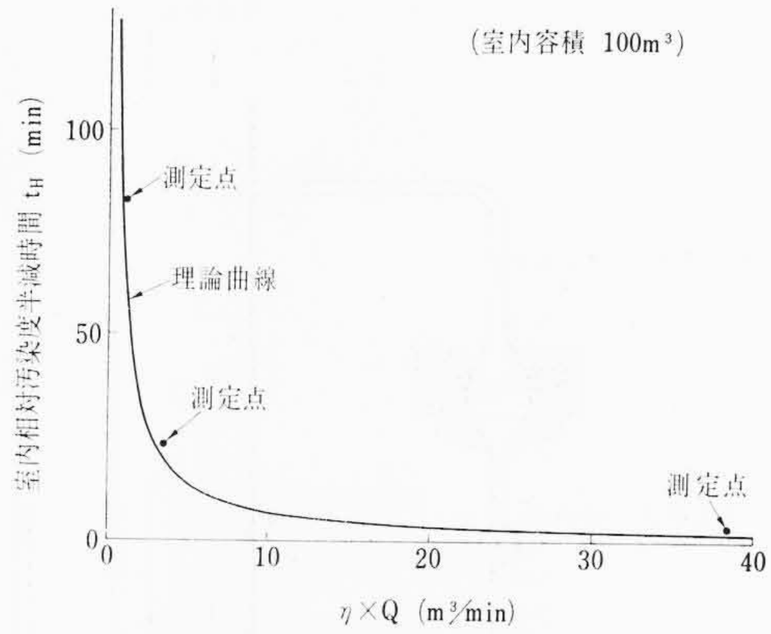
そこで，点線で示されているような汚染気流域と清浄気流域の境界にそって，同図（B）に示されているような気流流通孔を有する扇形高圧極③を配置すると，これからは清浄気流が逸出することになる。なお，同図（B）における清浄気流域は扇形電極の集じん電界 Grading により，（A）図におけるそれよりも，さらに拡大されるはずであるので，これを考慮に入れて扇形電極の配置を決める。

4.　微粒子に対する空気清浄効果の解析法

空気清浄器の性能を最も端的に表わすものは集じん率 η(%)（処理空気の出入口における煤じん濃度比率）と処理風量 Q (m^3/min) であり，清浄能力はこの両者の相乗積 $\eta \times Q$ に比例する。そこで，空気清浄器の定格表示は必ず，この両者をもってする。このほかに，このような定格の空気清浄器を実際に使用した場合に，その条件に応じて，どのような効果が得られるかということも，他の重要な一つの性能の目安となる。たとえば，ある発じん（煙）源を有する密閉室あるいは空気の汚染された密閉室において空気清浄器を動作させた場合に，室内空気の清浄化が時間経過とともにどのように進展し



第24図　電子管式エアロゾル計数器による室内相対汚染濃度の減衰状態の記録結果



第25図　半減時間と $\eta \times Q$ との関係

ていくか，あるいは運転前の空気汚染度がある一定濃度に低下するのにどれだけ時間を要するかによって，実用状態における空気清浄効果が表わせる。そこで，本章では電子管式エアロゾル計数法により，所定の試験室内において空気清浄器の処理風量，集じん率，発煙速度および室容積と空気汚染度の時間的変化との関係を線香煙霧(0.5～1.0 μ)について解析した。

4.1 実　験　方　法

第20～22図に示してあるように，実効容積約100 m³の密閉室に，供試電気集じん器，試験室内空気浄化用電気集じん器($Q=50$ m³/min, $\eta=90\%$)および空気調和機(環気風量50 m³/min)が設けられている。まず，室内空気浄化用電気集じん器を動作して，浮遊煤じんを完全に除去してから，所定の方法に従って棒状線香を燃焼して，線香煙霧により室内を人工的に汚染する。その濃度は線香の燃焼本数と燃焼器の調整により任意に設定でき，また，これは電子管式エアロゾル計数器により常時監視記録される。なお，本実験室の環気回数は約30回/hであるので，発生した線香煙霧は(空調機の空気吸入口へ吸入され，吐出レーバから室内に拡散される)実用上支障ない程度に，常時，均一に室内に拡散されているものと考えてよい。また室内空気は常時，気温21±1℃，湿度50±5%に調和されている。

線香を燃焼し，ある一定濃度 C_0 に達したら線香の燃焼を完全に停止してみると，その濃度 C は時間経過に伴って徐々に低下していく。これは空気清浄器を動作させなくても，粒子の相互凝集や壁などへの付着によって粒子数濃度が減少するためで，これを自然減衰と名付けた。実測結果は**第23図**に示してあるように半対数グラフにプロットしてあるが，相対汚染度 C と経過時間 t とは明らかに直線関係になることから，両者は次のような指数関数関係を有することが実験的に求められた。すなわち，

$$C=C_0 e^{-K_N t} \quad \cdots\cdots (6)$$

ここに，　$K_N=k_N \cdot D$

$$=k_N \cdot \frac{BT}{N} \cdot \frac{1}{3\pi\mu d}$$

D：粒子の拡散係数
B：ガス定数
N：アボガドロ数
T：絶対温度
μ：ガス粘度
d：粒子径
k_N：粒子の拡散運動による壁などへの付着定数

またこの(6)式から，

$$\frac{dc}{dt}=-K_N C \quad \cdots\cdots (7)$$

なる微分方程式が成立する。

次に濃度 C_0 に達してから線香の燃焼を停止することなく，所定本数を燃焼し続けると，室内濃度が時間経過でどのように変化するか検討してみたが，その実測結果が**第23図**に示されている。すなわち，この場合も明らかに相対汚染度 C は指数関数的に増減している。いま，線香煙霧の発生量を $K_c=P/V$ (P：粒子発生速度，V：室内実効容積)とし，これが一定に保たれ，また，室内濃度分布も均等に保たれると仮定すると，(7)式より，

$$\frac{dc}{dt}=K_c-K_N C \quad \cdots\cdots (8)$$

なる微分方程式が成立するはずである。この解は初期条件として，$t=0$ のとき $C=C_0$ とすれば

$$C=\frac{K_c}{K_N}(1-e^{-K_N t})+C_0 e^{-K_N t} \quad \cdots\cdots (9)$$

となる。また，この(9)式より相対濃度 C の変化速度 $d(\log C)/dt$ を求めてみると

$$\frac{d(\log C)}{dt}=\frac{K_c}{C_0}-K_N \quad \cdots\cdots (10)$$

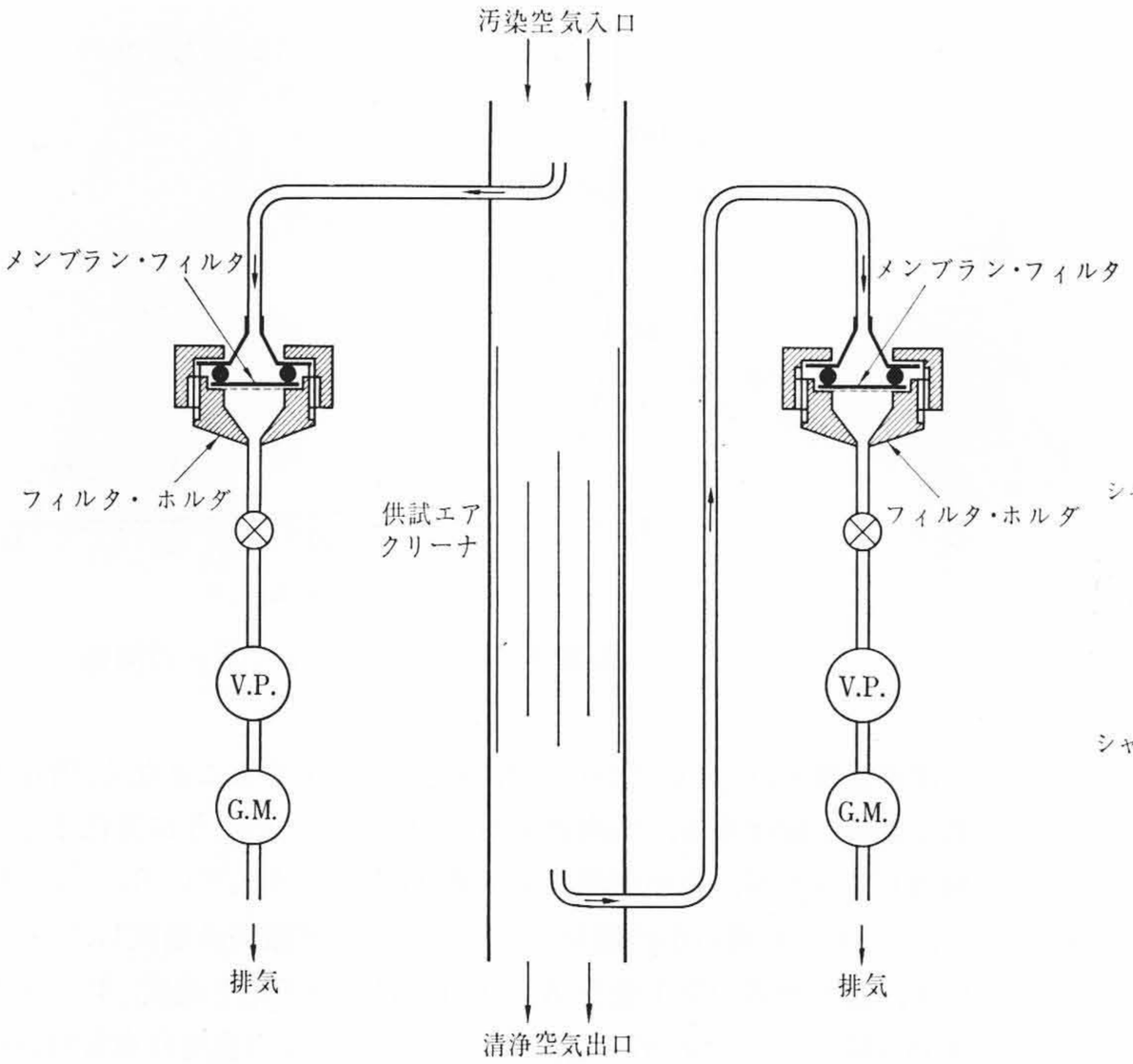
で与えられる。したがって，この(10)式と**第23図**の実測結果とから K_c および K_N が求められる。$K_c/C_0<K_N$ の場合には，C は時間経過とともに指数関数的に減衰することを意味し，本実験では線香の燃焼本数が0～2本の場合がこれに相当する。$K_c/C_0=K_N$ の場合には，C は常時 C_0 に保たれることを意味し，本実験では線香の燃焼本数が約3本の場合がこれに相当する。$K_c/C_0>K_N$ の場合には，C は時間経過とともに指数関数的に増加し，$C \simeq K_c/K_N$ で平衡状態に達することを意味し，本実験では線香の燃焼本数が3本以上の場合がこれに相当する。

以上の実験的解析により，密閉室に発煙源が存在する場合，その発煙量および自然減衰に応じて室内の空気汚染度が時間経過とともにどのように変化するかが明らかにされた。そこで，次にこのような状態で空気清浄器を動作させた場合にはどのようになるか検討してみた。**第23図**にその実測結果の一例が示してあるが，空気清浄器を動作させると室内汚染度 C は指数関数的に急激に減衰しながら短時間に清浄化が行なわれていることがわかる。**第24図**は他の実測例として，電子管式エアロゾル計数器によるその記録結果を示したものである。

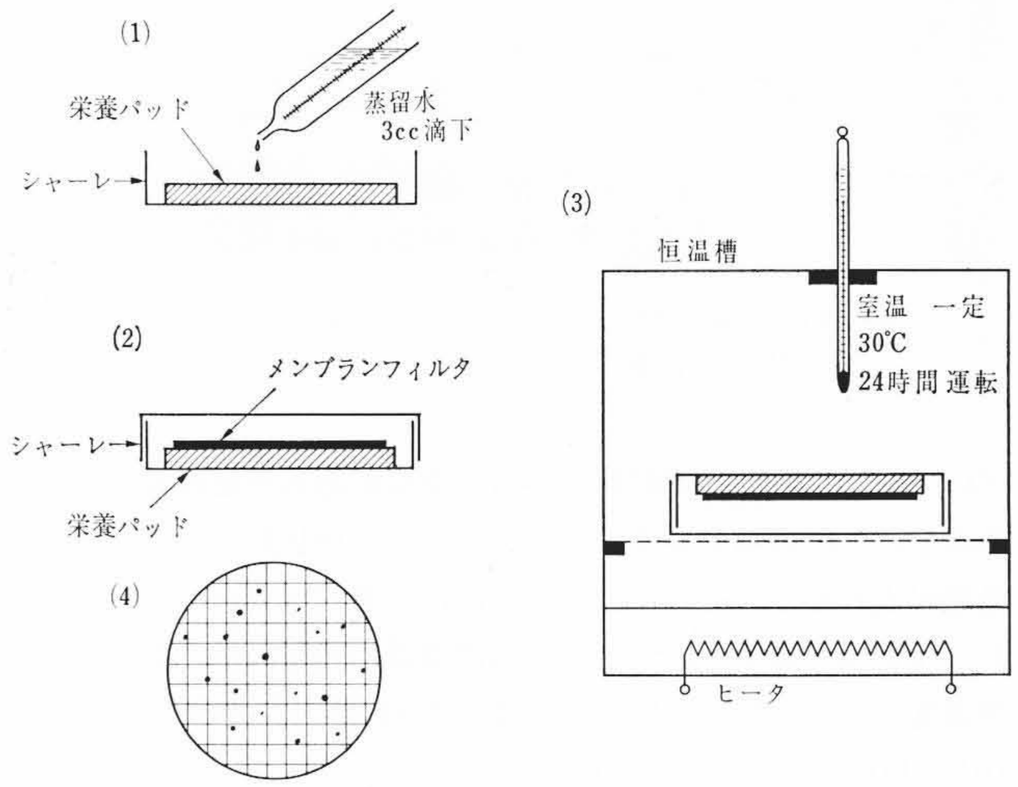
以上の実験結果から，電気空気清浄器の動作状態における室内空気汚染度 C の時間的変化を与える一般式は

$$C=\frac{K_c}{K_N+K_E}\{1-e^{-(K_N+K_E)t}\}+C_0 e^{-(K_N+K_E)t} \quad \cdots\cdots (11)$$

となる。この(11)式より空気清浄器の空気清浄効果を端的に表わすのに，空気清浄器の動作前における初期汚染度 C_0 が動作後，半減す



第26図　気中バクテリヤのメンブラン・フィルタへの採取法



第27図　メンブラン・フィルタに採取されたバクテリヤの培養手順

るに要する時間，つまり半減時間 t_H でもってすることを提案した。この t_H の理論値は，$K_N=0$, $K_c=0$, $C=C_0/2$ として

$$t_H=\frac{0.693}{K_E}$$

$$=0.693\frac{V}{\eta\times Q} \quad \cdots\cdots(12)$$

で与えられる。一方，実測値の t_H は，**第24図**のようにして自然減衰も含めた半減時間 t'_H が求められるから，これより

$$K_E=\frac{0.693}{t'_H}-K_N$$

$$\therefore \quad t_H=\frac{0.693}{\dfrac{0.693}{t'_H}-K_N} \quad \cdots\cdots(13)$$

で求められる。**第25図**はこのようにして，種々の $\eta\times Q$ の電気空気清浄器について t_H を実測し，その理論値(実線)と比較してみたものである。すなわち，両者は非常によく一致しているが，理論値に比べ実測値のほうが1.2倍程度大きくなる。これは，理論では発煙源からの煙じんおよび空気清浄器からの清浄空気は瞬時に室内に一様に拡散されて，室内空気の汚染濃度分布は常時均等に保たれるという仮定を設けているためである。実際には，もちろんこのようにはならず，煙じんや清浄空気の拡散速度に応じて，ある時間遅れが生ずるためである。

以上の研究により，空気清浄器の空気清浄能力の優劣を比較するには，半減時間 t_H の大小で最も端的に行なえることが明らかにできた。

5. 電気集じん法による気中バクテリヤの滅菌とその検定法に関する研究[6][7]

空気清浄器が単なる浮遊煤じんの除じんのみでなく，バクテリヤやビールスなどの微生物の滅菌にも役だつものであれば，その用途は広められ，有用度も高められる。一口に，バクテリヤといってもそれは多種多様であり，必ずしも有害なものばかりではないが，その多寡は空気清浄度の一つの目安となりうる。その大きさは約1～10 μ であるので電気集じんによる滅菌は非常に容易であると思われる。

従来のバクテリヤの採取・培養法は，シャーレに培養地を入れておき，これを一定時間空気中に暴露させて，それに落下あるいは拡散運動でバクテリヤを付着させた後，培養・検出しているので，採取時のシャーレ付近の空気の流れや偶然性に測定結果が左右されやすく，気中バクテリヤによる汚染度が必ずしも定量的に検出されているとは言えない。そこで，本実験では0.1 μ 程度の微粒子まで捕集できるメンブランフィルタに所要量の被検空気をろ過してバクテリヤ粒子を採取して後，これを栄養パッド法で培養する新しい方法によった。

5.1 気中バクテリヤの検定法

メンブランフィルタはセルローズエステル系の合成繊維で，厚さ約150 μ，径約47 mmに作られている。これには検出バクテリヤ・コロニ数の計数が容易なように緑色の格子が印刷されて，無菌状態で密封されている（独 Membran Filter 社製）。これを**第26図**に示してあるように，供試電気集じん器の出入口に設けられた殺菌処理されたフィルタ・ホルダに装着し，被検空気を出入口，同時に等速抽気する。このようにして気中バクテリヤを採取した後の培養法は次のとおりである(**第27図**)。

（1）殺菌ずみのシャーレに栄養パッドを入れ，この上に蒸留水を約3 ml滴下する。

（2）その上に，メンブランフィルタをのせ，パッドとの間に気泡が生じないように波動させながら密着させ，シャーレにふたをする。

（3）約30℃一定に保たれた恒温槽にこれを上下，逆にして入れ，約1昼夜，24時間培養する。

このようにして培養，検出された空気中バクテリヤの一例を**第28図**に示す。

なお，栄養パッドはバクテリヤの種類(イースト菌，カビ，大腸菌など)に応じて，その培養に適した脱水状培養基が含浸させてあるが，本実験ではStandard I 形を使用した。これはレドックス指示薬が含浸させてあり，好気性植物相微生物の広い範囲に対して成長

第1表　電気集じん式空気清浄器(EP-100形)の気中バクテリヤに対する滅菌効果

バクテリヤ，コロニ数		滅菌率 η(%)	天　候	気温(℃)	湿度(%)
入　口	出　口				
23	0	100	晴	24	55
11	0	100	晴	24	52
10	0	100	晴	26	60
13	0	100	晴	20	42
23	0	100	晴	28	65
24	0	100	晴	25	53

第2表　2段式モデル電気集じん器における気中バクテリヤの滅菌効果

電離部コロナ電流 i (μA/cm)	気流速度 v_g (m/s)	バクテリヤ・コロニ数		滅菌率 η (%)
		入　口	出　口	
3	4	46	9	80.5
3	4	23	10	56.5
2	4	44	15	65.8
2	4	41	21	48.8
3	3	66	33	50.0
3	3	33	13	60.6
2	3	72	48	33.4
2	3	52	38	27.0
3	2	50	8	84.0
3	2	76	16	79.0
2	2	37	9	75.6
2	2	69	20	71.1

が促進されるようになっており，染色により発育したコロニーは白味がかった黄色から濃い赤色にわたって種々の色相で検出される。これは本来，飲料水の管理，食品分析，生産管理に利用される。たとえば肉，チーズ，ミルク，調味料などの検査，殺菌剤や予防剤の効能を検定するのに利用されているといわれ，本研究では，これを気中バクテリヤの検定に利用してみたものである。

5.2　電気集じん器の滅菌効果

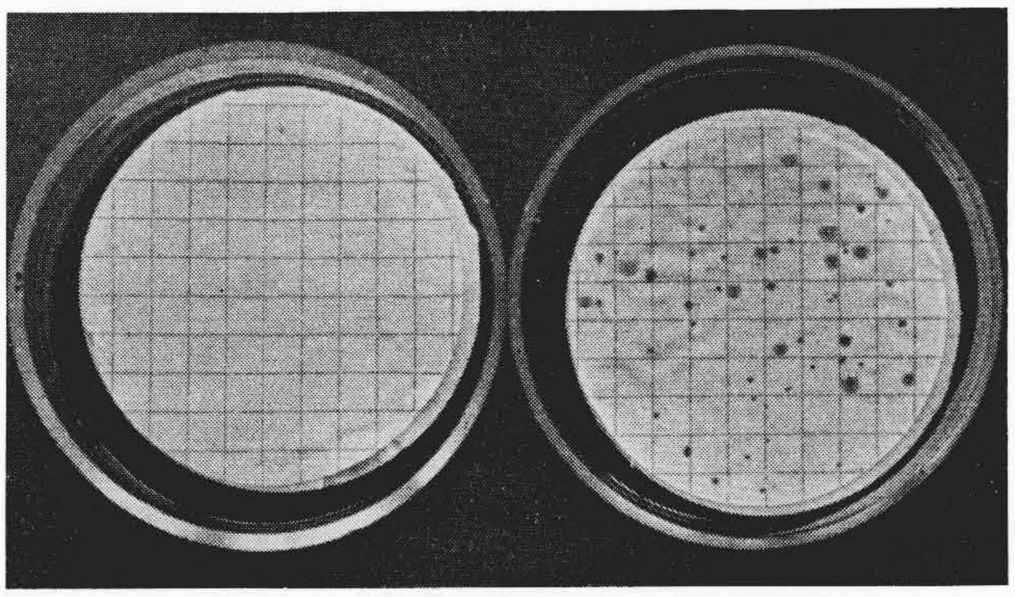
前述のような方法により，家庭用小形電気空気清浄器(EP-100形)について，気中バクテリヤに対する滅菌効果を検定してみた結果が**第1表**に示されている。これから滅菌が完全に行なわれていることがわかる。さらに，これでは電気集じんの電離部コロナ電流や気流速度の滅菌効果に及ぼす影響が明らかでないので，実際のものに比べ，集じん部の気流方向長を短縮して集じん率を低下させたモデル電気集じん器について実験した結果が**第2表**に示されている。当然の結果であるが，コロナ電流の増加および気流速度の低下に伴って滅菌率は向上している。このことから，電気集じんにおける滅菌作用は，一般の煤じんの場合と同じ集じん機構に基づくものであることが推察される。そして，その粒度は1～10 μ (Carrier のじんあいも含めて) 程度と推察された。

6.　清浄空気のイオン濃度調整とその計測法

最近，大気中のイオン，いわゆる空気イオンと大気汚染との関係や人体，植物に及ぼす影響がしばしば問題にされている。そこで，ここでは電気集じんにより高度に清浄化された空気にイオンを人工的に添加する方法，その計測法および二三の実測例についての研究結果を紹介する。

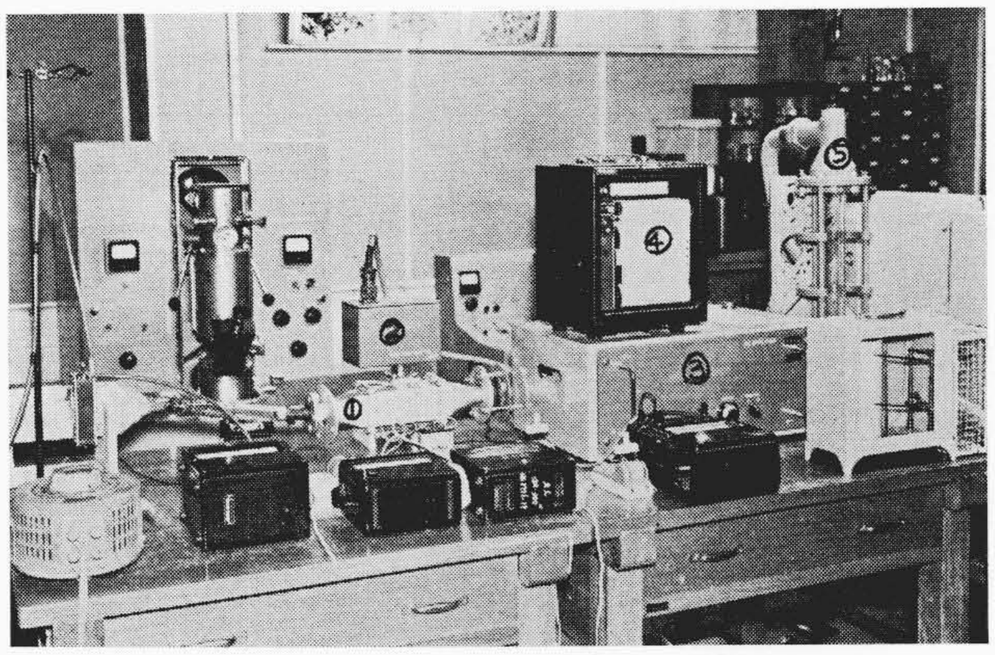
6.1　空気イオンの計測法

空気イオンは自然状態では，その発生(地殻に含有されている Ra, Th および大気中に放出される Radon, Thoron などの放射線，宇宙線，雷などの気中放電，砂あらし，吹雪などによる摩擦帯電，降雨などの際の水滴分裂，紫外線，X線，燃焼などの各種の電離作用による)と消失(再結合，凝結核などへの成長)とによって，100～500個/cm^3 of air 程度の濃度で平衡しているから[(8)(9)]，この程度までの計測感度が必要とされる。被検空気は，普通，同軸円筒形か平行平板形の検出電極に通され，イオンはこの静電界により電極にトラップされ，これが電位か電流の状態で増幅される。この場合，計測応答速度や感度の点から検出電極の静電容量は約20 pF 以下であること，また，被検空気量は実験室内やイオン発生源周辺の空気流をじょう乱しないように，実験室の容積やイオン発生器の吐出風量に比べ，十分に小さくする必要がある。増幅器としては，(1) 振動容量形直流増幅器，(2) 制御格子電流の小さい三極管か空間電荷格子形4～5極管を使用した真空管電位計がある。



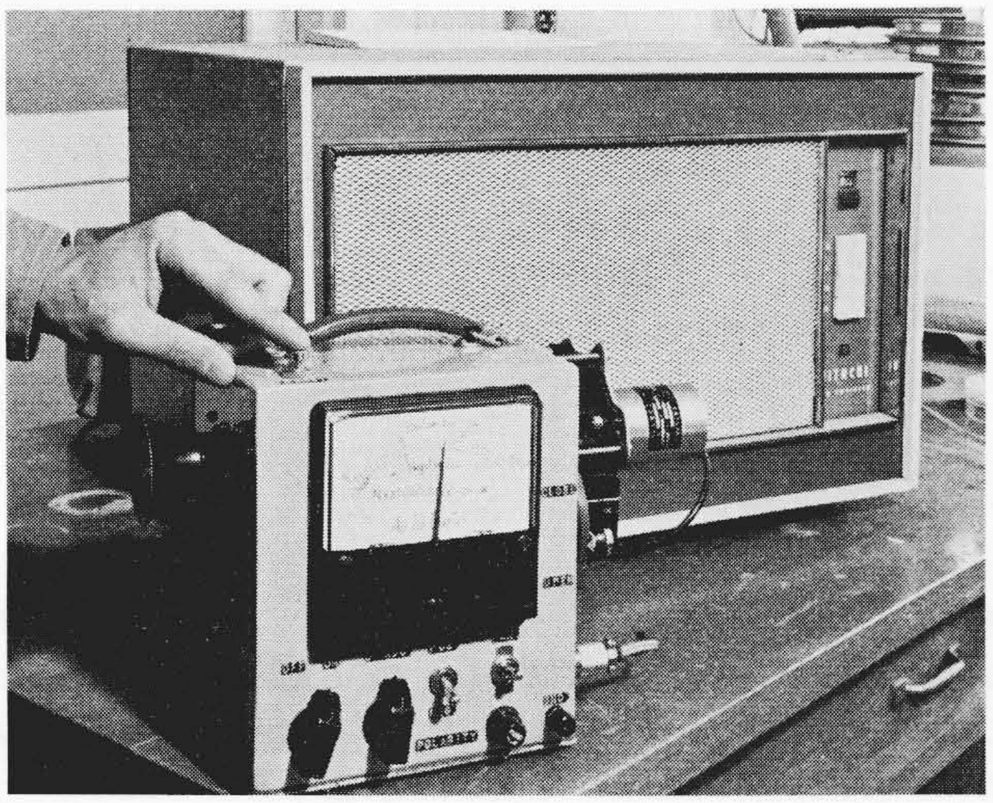
出口空気　　入口空気

第28図　メンブラン・フィルタに培養された気中バクテリヤ・コロニ



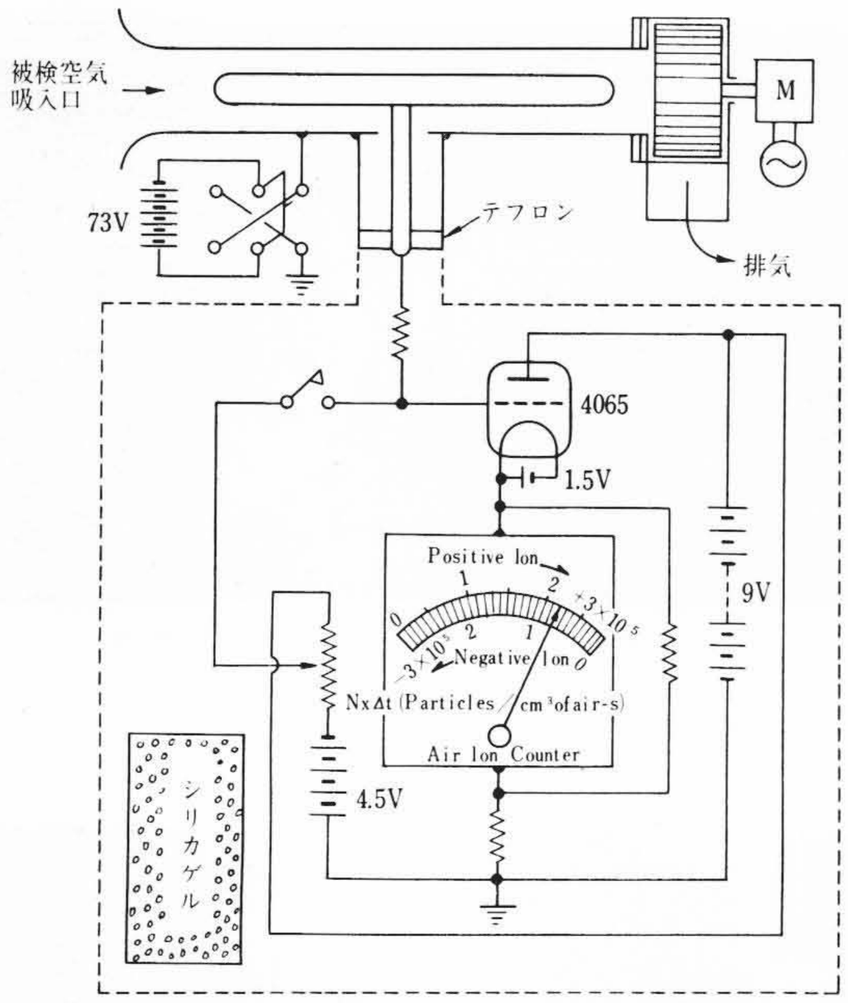
① イオン検知電極　② 前置増幅器　③ 主増幅器　④ 記録計

第29図　振動容量形直流増幅器による空気イオンの計測

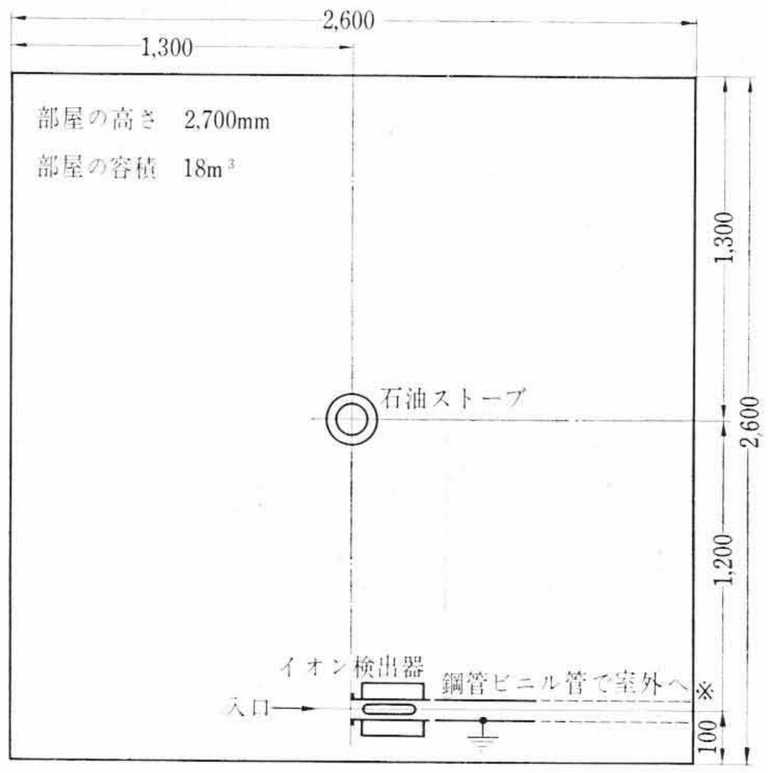


第30図　試作小形空気イオン測定器

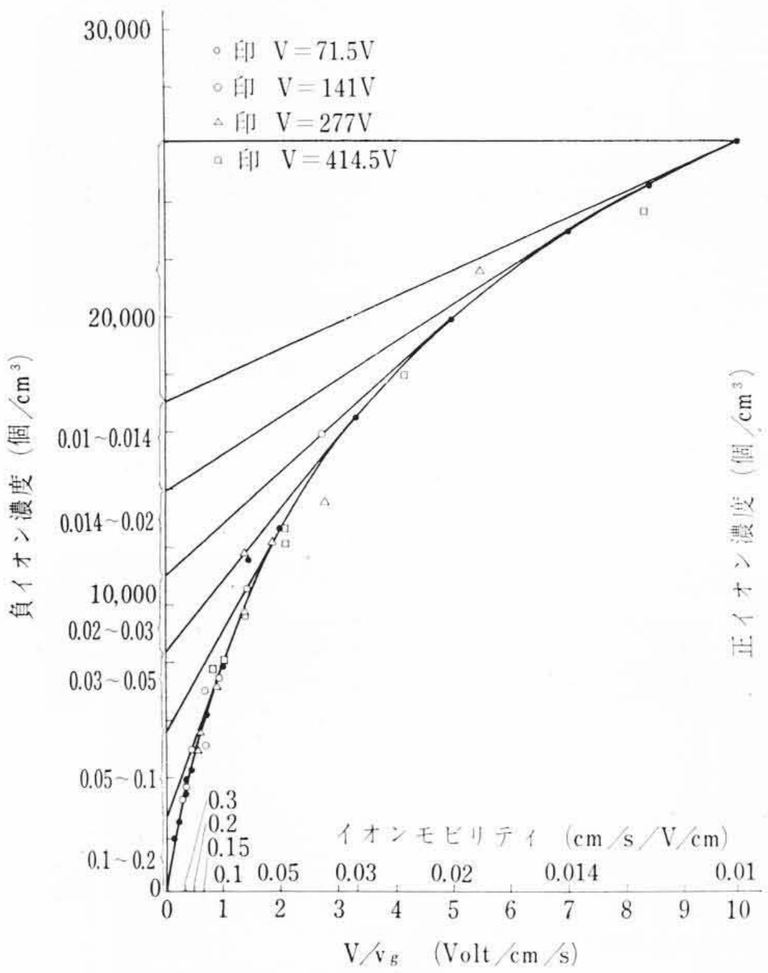
第29図は振動容量形直流増幅器(日立AU-12S形，感度約10^{-14}A,



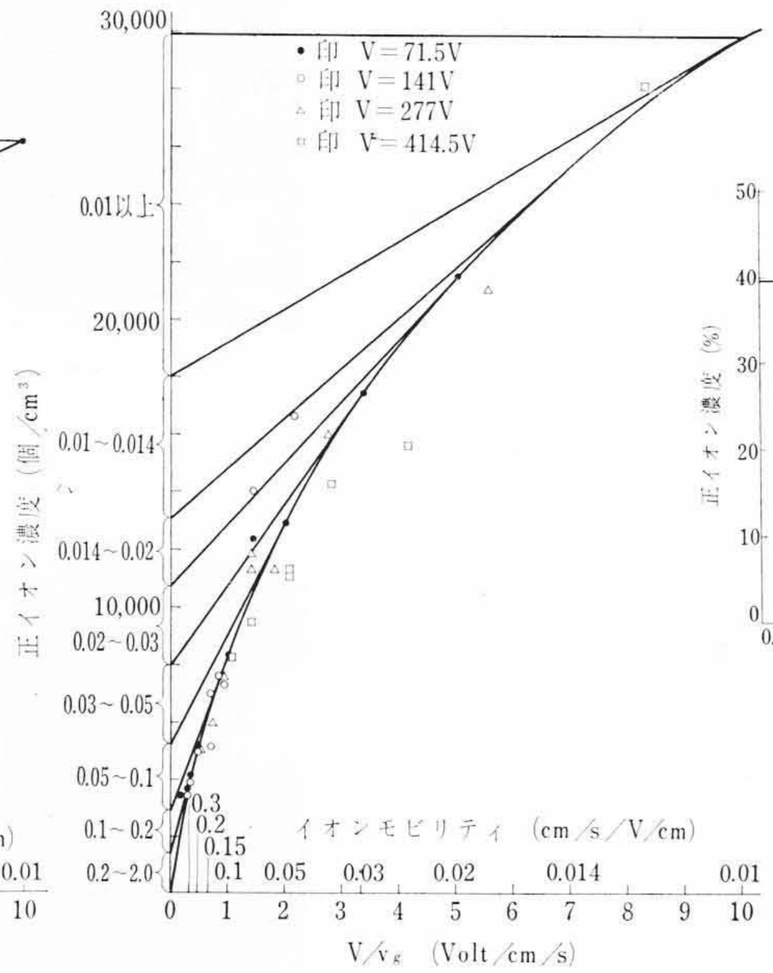
第31図　小形空気イオン測定器の回路構成



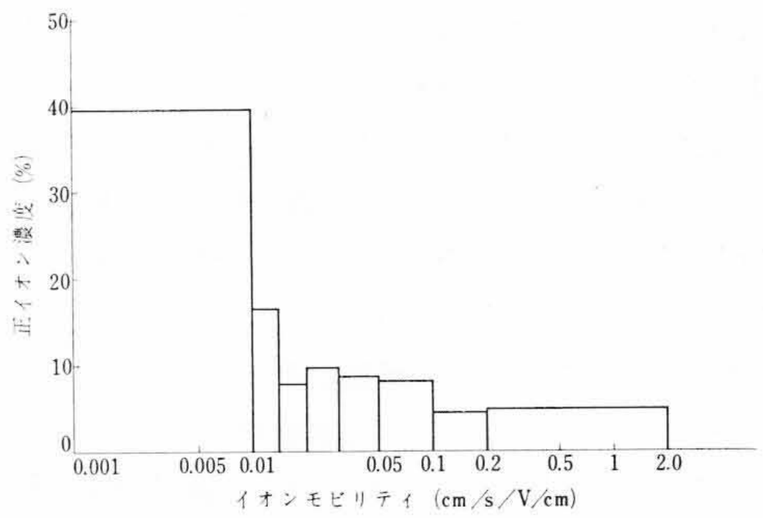
第32図　石油ストーブからの発生イオンの計測



第33図　V/v_g に対する計測イオン濃度の累積曲線（正イオン）



第34図　V/v_g に対する計測イオン濃度の累積曲線（負イオン）



第35図　石油ストーブから発生する正イオンのモビリティ分布

雑音レベル 10^{-15} A，98% レスポンス2秒，入力抵抗 $10^{12}\,\Omega$)，検知電極などで構成されている空気イオン測定装置を示したものである。本装置は固定位置での連続記録やイオン発生器の基本特性を計測するのには便利であるが，室内のイオン濃度分布を測定する場合には，固定位置の検知電極に相当長い抽気管を接続して行なわねばならないので，これによるイオン消失が大きく不都合である。そこで**第30図**および**第31図**に示すような電位計式の小形空気イオン測定器を試作した。電位計回路は J. F. Keithley[10]のそれを参考にした。Keithleyでは，電位計用三極管として5803 (Victoreen) を使用しているが，すでに廃止されているので，これとほぼ同定格の4065 (Philips) を使用した。格子電流 I_g は極力，小さくする必要があるので，電位計回路を完全に密閉し，かつシリカゲルを封入してある。格子電圧 $V_g=-1.5$V の場合，ドリフトは約0.1 V/180s.，また，検知電極と4065格子回路との静電容量は10 pF であるので，I_g は

$$I_g=0.1\,\mathrm{V}\times10^{-11}\,\mathrm{Farad}/180\,\mathrm{s}$$
$$\simeq0.55\times10^{-14}\,\mathrm{A}$$

程度に低減できた。

いま，空気イオン濃度100個/cm³ of air の被検空気を約500cm³/s で吸引し，これが全部電極にトラップされたとすれば，30秒間における，その蓄積電荷量 Q は

$$Q=\frac{30\times500\times100\times4.8\times10^{-10}}{3\times10^{9}}$$
$$=2.4\times10^{-13}\ \text{(Coulombs)}$$

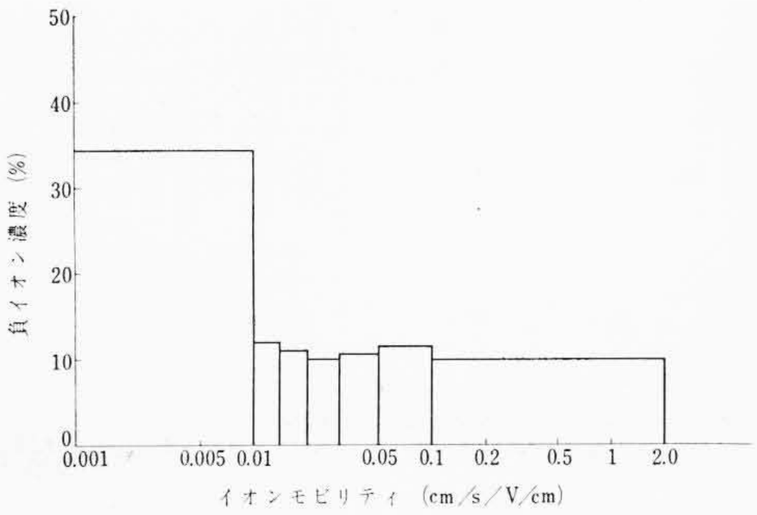
となり，これによる4065格子電圧 V_g の上昇は

$$V_g=Q/C_g$$
$$=2.4\times10^{-13}/10^{-11}$$
$$\simeq2.4\times10^{-2}\ \text{(V)}$$

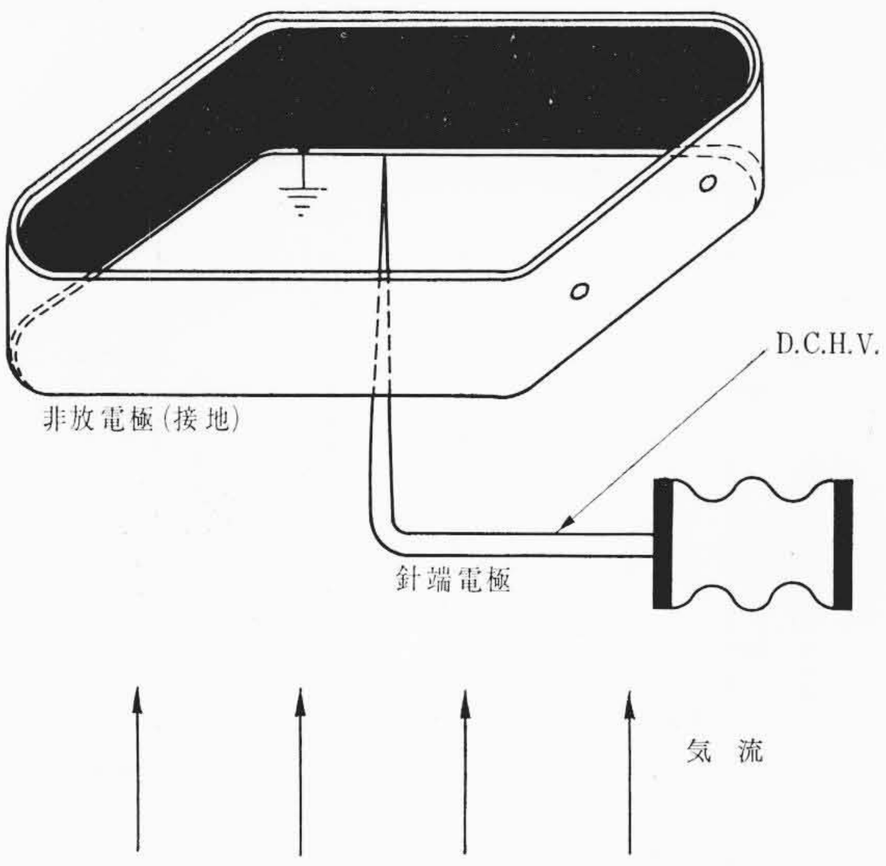
である。4065の相互コンダクタンスは80 μ℧ であるから，この場合の陽極電流の増加速度は

$$80\,\mu℧\times2.4\times10^{-2}\,\mathrm{V}/30\,\mathrm{s}$$
$$\simeq1\,\mu\mathrm{A}/30/\mathrm{s}$$

となり，自然状態の空気イオンの濃度レベルまで計測が可能となる。



第36図　石油ストーブから発生する負イオンのモビリティ分布



第37図　コロナ放電による空気イオン発生電極

本測定器の空気イオン濃度は次式で与えられる。

$$N=\frac{C\Delta V}{e_0\,q\,\Delta t}\times 3\times 10^{-3} \quad \cdots\cdots(14)$$

ここに，　C：　検出電極回路の静電容量　(pF)

q：　被検空気吸入量　(cm^3/s)

e_0：　4.8×10^{-10} e. s. u.

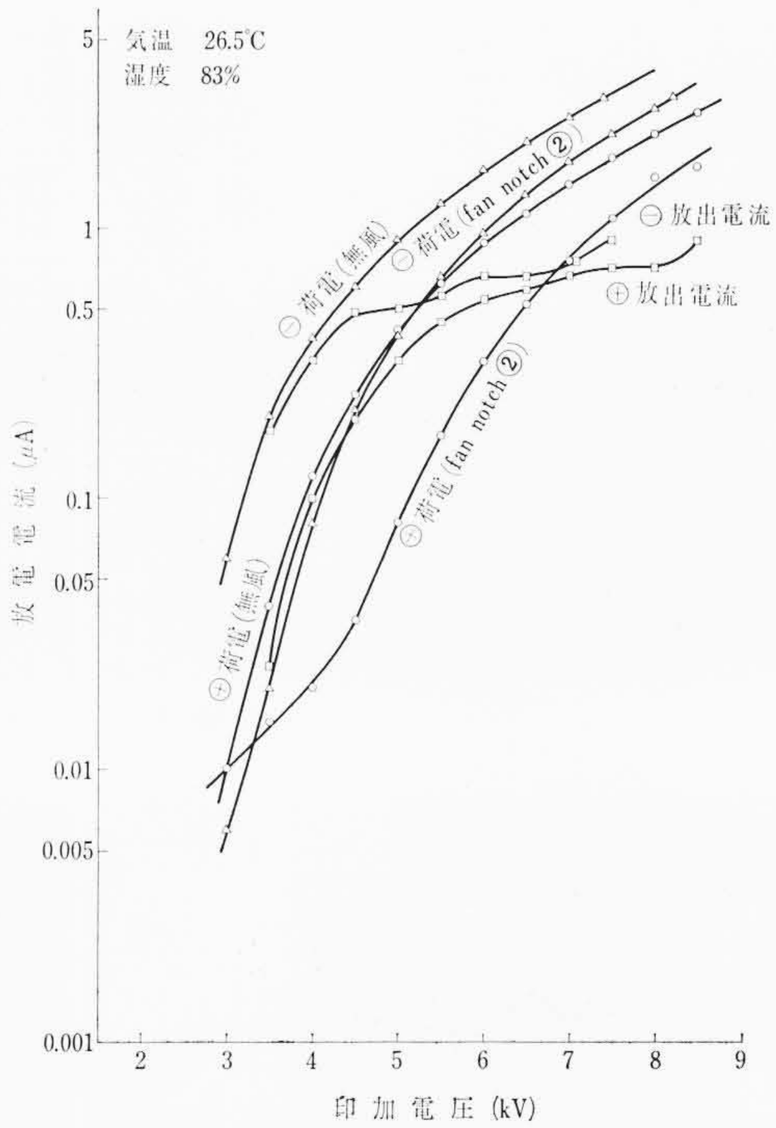
ΔV：　測　定　電　圧　(V)

Δt：　ΔV 変化するのに要した時間　(s)

そこで，本器では指示目盛は $N\times\Delta t$ で表わされ，任意の $N\times\Delta t$ における所要時間 Δt を計測することにより，1レンジで広範囲のイオン濃度 ($N\simeq 10^2\sim 10^5$) が計測できるように工夫されている。

第32図は，密閉室内に標準イオン発生源として石油ストーブを設置して，空気イオンのモビリティ分布の計測法の検討を行なった場合の実験方法を示したものである。測定は検知電極電圧Vおよび被検空気吸入速度 v_g を変化させた（層流領域で）場合の検出イオン濃度を求めたが，その結果が**第33図**および**第34図**に示されている。

V/v_g の増加にともなってモビリティのより低いイオンの検出が可能になるために，イオン検出量は増大している。もちろん，この V/v_g がある程度以上，大きい領域ではこれはある飽和値に達する性質のものである。これからイオンモビリティ分布を求めるには，V/v_g に対応するモビリティで垂線を立て，これが測定曲線と交わる点を求め，この交点における測定曲線の切線を引き，これの縦軸との交点がそのイオンモビリティの真のイオン濃度を与える。このような図式解析により求められたイオンモビリティ分布が**第35図**および**第36図**に示してある。すなわち，この石油ストーブから発生した正，負イオンには大きな差異は認められず，モビリティ $K\geqq 0.1$ を小イオンとすれば，小イオンは全体の10%程度に過ぎないことが



第38図　空気イオン発生器のコロナ放電特性

わかる。

6.2　空気イオンの発生

イオンの発生には（1）コロナ放電，（2）放射線（X線），（3）紫外線，（4）熱電離などの電離作用をそれぞれ利用できる。しかし，（2）は医療用以外には放射線障害の点で一般に利用困難である。（3）は紫外線を直接利用するのでは発生量が僅少であり，またオゾン生成を伴うので実用性が低い。また，活性化エネルギの低い物質に紫外線を照射してその光電効果を利用する方法は有望であるが，安定性や経済性の点で検討の余地を残している。（4）は発熱体の酸化劣化，発熱量の大きいことで実用性は低い。結局，（1）によるのが最も実用的であり，特に電気集じんと組み合わせる場合にはその高圧電源を共用できるので好都合である。そこで，次にコロナ放電によるイオン発生について二，三の検討結果を述べる。

電極形式は，普通，心線や針端電極が利用できるが，機械的，構造的には後者のほうがすぐれている。**第37図**にこの電極構造の一例が示されている。**第38図**はそのコロナ放電特性を示したものである。すなわち，等電圧における無風時のコロナ電流 i_0 と通風時のそれ i との差が通風により電極外へ放出される空気イオン量にほぼ相当する。これより放出イオン濃度 N は次式により概算される。

$$N\simeq\frac{Y}{2\sqrt{2}\,\pi r\sqrt{Ke_0}}(\sqrt{i_0}-\sqrt{i})\ \text{(個/cm}^3\text{ of air)} \quad \cdots\cdots(15)$$

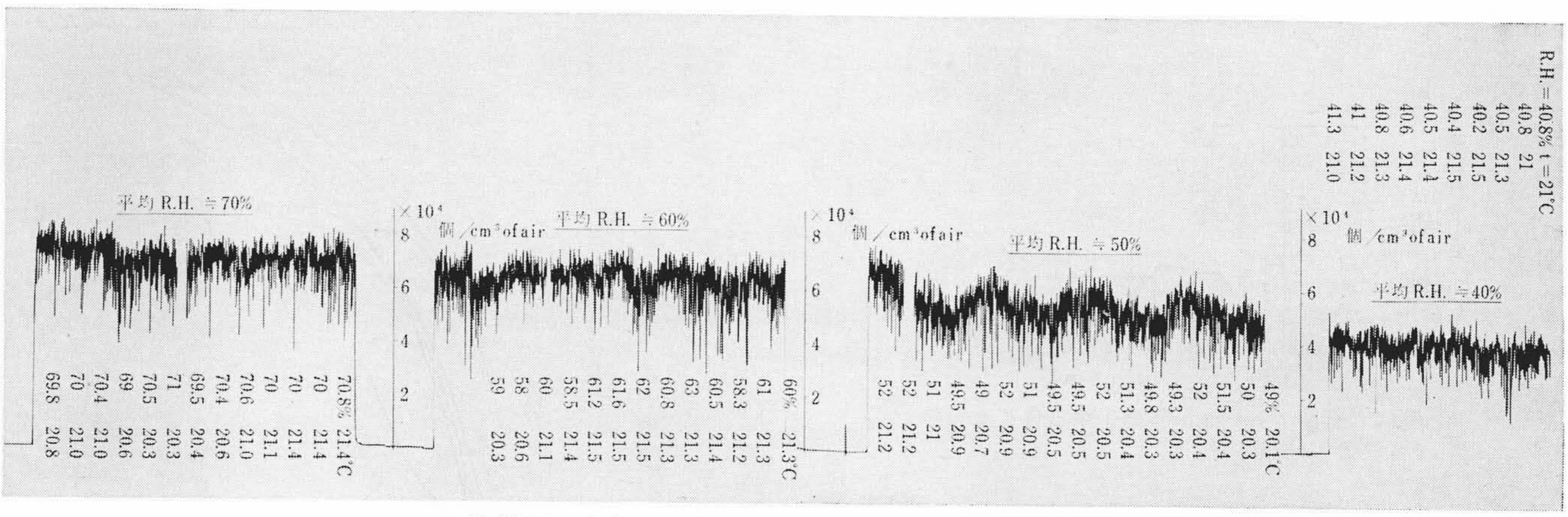
ここに，　Y：　イオン発生効率

r：　非放電極等価外半径

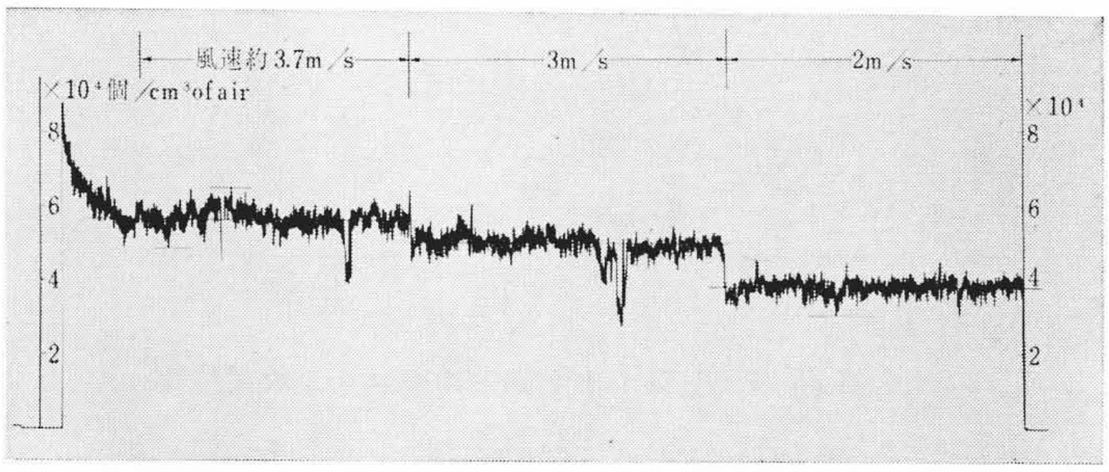
また，放出イオンのモビリティ K は概略

$$K<\frac{v_g^2}{2i}\quad (\text{cm}^2/\text{stat volt}\cdot\text{s}) \quad \cdots\cdots(16)$$

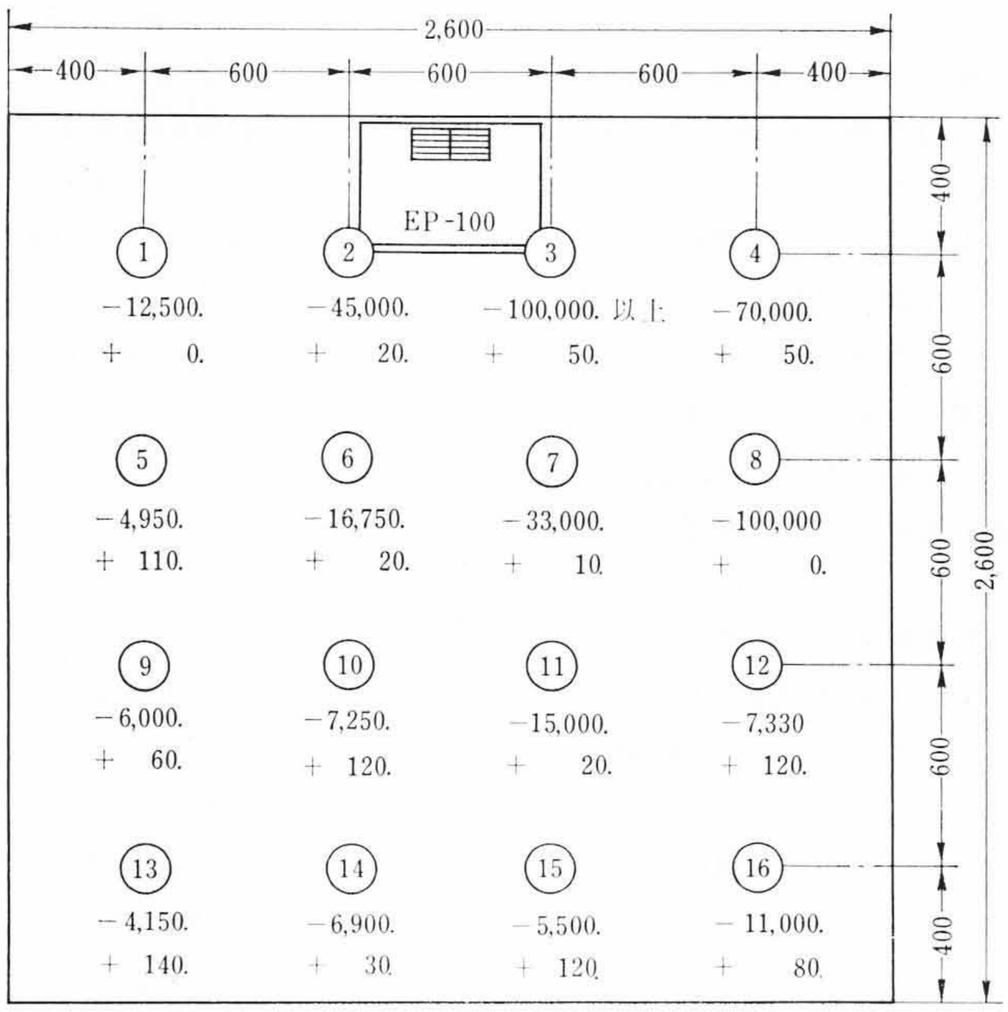
で与えられる。**第38図**から明らかなように (i_0-i) はある印加電圧で頭打ちになる（本電極の場合，負コロナでは約4.5 kV，正コロナでは約6 kV）。したがって，これ以上の電圧領域ではコロナ電流が増加する割合にはイオン濃度は増加し得ないので，この屈曲点付近の電圧で運転すれば，オゾン (O_3) や酸化窒素 (NO) の発生量を著しく抑制することができる。たとえば，容積18 m^3 の密閉室内で約1時間連続運転した後，O_3, NO を定量したところ，いずれもTraceで



第39図　空気イオン発生量に及ぼす湿度の影響

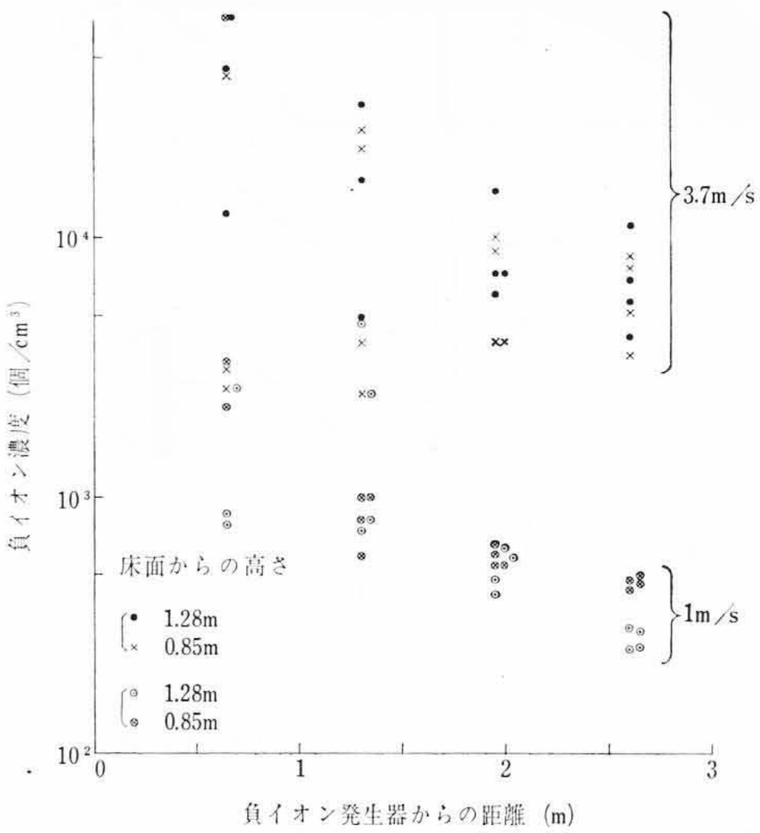


第40図　空気イオン発生量に及ぼす風速の影響

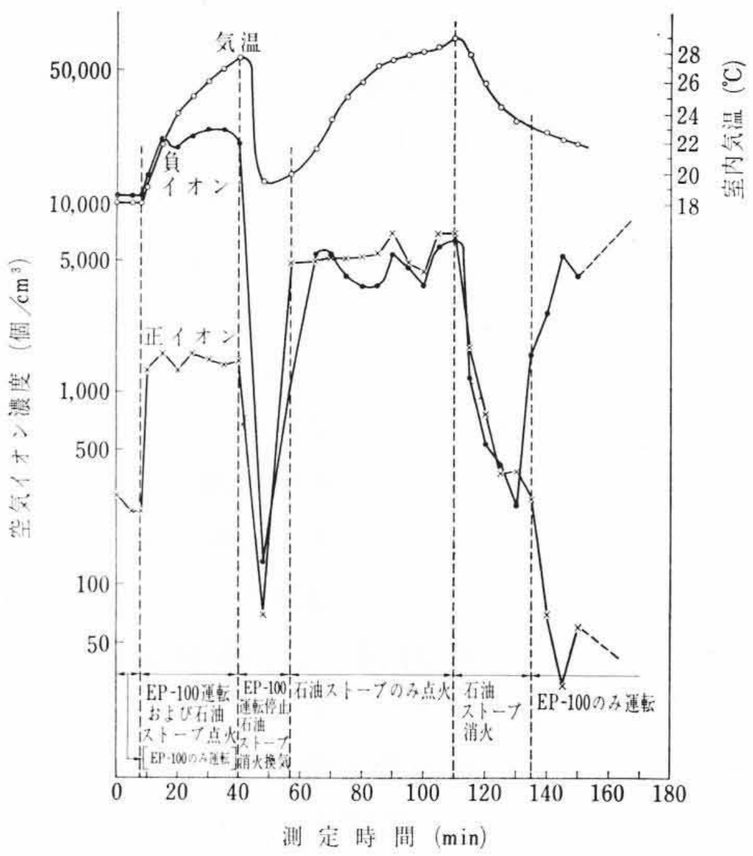


ルーバ角度：32度
EP-100 ファンノッチ：3
室の高さ：2.7 m
室容積：18 m³
温度：15.8～16.2℃
湿度：64.5～66%
自然イオン濃度：+144 個/cc
−91 個/cc
測定位置：床面から高さ 1.28 m

第41図　負イオン発生器を動作させた場合の密閉室内におけるイオン濃度分布の一例



第42図　イオン発生器からの距離による空気イオン濃度の減衰と風速の影響



第43図　石油ストーブと負イオン発生器の併用による室内イオン濃度の変化

0.01 p.p.m. 以下と推定され（怒限度 O_3 0.1 p.p.m., NO_2 5 p.p.m., 臭覚濃度 O_3 0.05 p.p.m., NO_2 5 p.p.m.），まったく問題ないことが確認された。なお，(15) 式におけるイオン発生効率 Y は，発生電極の空気吐出側における接地物，たとえばダクト，清浄空気吐出ルーバなどとの間に形成される漂遊静電界と電気速度 v_g とにより大きく影響され，特に漂遊静電界の低減によって発生効率は著しく向上される。

第39図は空気イオン発生濃度に及ぼす湿度の影響を示したもので，相対湿度が約60% 以上であればイオン濃度の変化は実用上問題になるほど大きくない。しかし，相対湿度が約50% 以下になるとイオン濃度の減少が認められ，特に40% 以下では70% 以上の場合

に比べ約半減している。これは空気負イオンの形成には水蒸気分子の存在が無視できないことを意味している。

第40図は気流速度の影響を示したもので，流速とともに増加する傾向にある。

第41図はイオン発生器を密閉室内で動作させ，平衡状態に達した後のイオン濃度分布の一例を示したものである。また**第42図**はイオン発生源から離れるに従って，平衡状態のイオン濃度がどのように減少してゆくかを示したもので，吐出気流速度が速いと比較的遠くまで高濃度を維持できるが，一方，吐出気流速度が遅いと，高濃度領域は発生源を中心として数10 cm以内の狭い範囲に限定され，数m離れた点では自然濃度レベルにまで低下してしまう。

以上の研究結果から，室内の空気イオン濃度分布は発生器や空気清浄器により誘起される空気の流動状態や渦拡散運動によって決まり，イオン自身の拡散運動はこれにほとんど関与しないことがわかる。

第43図は石油ストーブと負イオン発生器（EP-100形空気清浄器に併設した）を併用した場合の室内空気イオン濃度の時間的変化を示したものである。石油ストーブの点火により，正，負ほぼ等量のイオンが相当多量に発生するが，さらに負イオン発生器を動作させると負イオンは約4倍に増加し，逆に，正イオンは約1/4に低下している。なお，ガスストーブの場合にも，ほぼ同様な結果が得られている。また，本イオン発生器の発生負イオンの寿命は**第43図**から，発生を停止してから，濃度が約$1/e$に低下するまでの時間を求めてみると180～300秒程度である。

7. 結　　言

以上の研究結果を要約するとつぎのとおりである。

（1） 電離部イオン化線のコロナ電界の広がり角度θを縮小すればコロナ損失を増加することなしに，粒子帯電量の増加できることを明らかにし，その具体的方法として静電界によるコロナ電界の圧縮法を考え，これによる新方式の電離部を開発した。

（2） 集じん部における集じん付着量分布を放射性追跡子法で解析した結果，これが指数関数形分布となっていることを確かめ，さらに集じん電界Grading法により平等分布に改善すればその保じん容量が大幅に増加できることを明らかにし，その具体的方法として新方式の扇形多孔形電極を開発した。

（3） 空気清浄器を密閉室内で動作させると，室内空気汚染濃度は時間経過にともなって，指数関数的に変化することが電子管式エアロゾル計数法で確かめられた。このことより空気清浄器の清浄能力の優劣の比較は，初期汚染濃度に対する半減時間t_Hの大小で最も端的に表わせること，および，このt_Hは他の条件が一定ならば，室容積/処理風量×集じん率に比例することを明らかにした。

（4） 従来，不明確であった2段式電気集じんの集じん率と集じん諸因子との関係が本文（5）式のように与えられ，合理的な設計ができるようになった。

（5） 気中バクテリヤの新しい検定法としてメンブラン・フィルタ栄養パッド法を利用し，十分な滅菌効果の得られる2段式電気集じんの設計諸元を明らかにした。

（6） 小形空気イオン測定器を試作し，これによる測定結果からイオンモビリティ分布が図式解法で求められることを明らかにした。また，コロナ放電による空気イオンの発生法を明らかにし，これによる室内空気の人工的イオン濃度調整結果の二，三を紹介した。

以上，電気集じん法による高度な空気清浄に関する基礎研究結果について概説したが，今後は汚染された大気を清浄化するだけでなく，さらに進んで，良質な空気を人工的に造るための研究を進めたいと考える。

終わりに，本研究を遂行するに当たり，終始ご激励をいただいた，日立製作所多賀工場，亀戸工場および日立研究所の幹部関係者各位に厚くお礼申しあげる。また，本実験を熱心に担当された当研究室の各位に深謝する。

参　考　文　献

（1） 諫早： 電気学会誌，**82**, 881 (Feb. 1962), p. 219～228
（2） 諫早： 昭和37年電気四学会連合大会論文集，787
（3） 諫早： 昭和39年電気四学会連合大会論文集，997
（4） 諫早： 昭和37年電気学会東京支部大会論文集，333
（5） 諫早： 昭和36年電気学会東京支部大会論文集，321
（6） 諫早： 第5回大気汚染研究全国協議会抄録集 (1964), 204
（7） Ross E. Mckinney: Microbiology for Sanitary Engs., 1962, McGraw-Hill
（8） O. H. Gish: Universal Aspects of Atmospheric Electricity, in "Compendium of Meteorology" p. 101～109, Amer. Meteorological Society, Boston Mass., (1951)
（9） L. R. Koller: J. Franklin Inst., 214 (1932) p. 564～568
（10） J. F. Keithley: Instruments, **25**, 4 (1952) p. 458, 506, 508, 509