

# ガスタービンにおける燃焼に関する計測法

根 矢 清\*

## Measuring Methods Relating to Combustion Phenomena in Gas Turbine

By

Kiyoshi Neya

In this paper, the measuring methods of the characteristics of liquid fuel spray, gas flow in combustor and combustor performance are described.

Spray characteristics such as droplet size and weight flow distribution has a significant effect on combustor performance. Many interesting techniques have been developed for the measurement of droplet size, and they may be grouped into two methods. The first is the sampling method, in which the droplet size distribution is calculated from many spray samples by taking account of weight flow distribution, and for spray sampling, immersion, impression, direct catching and direct photographing methods are commonly used. The second is the one, in which the droplet size distribution is obtained directly either by counting and sizing a representative sample of the whole spray or by classifying the whole spray by size with the aid of sieves (applicable only for frozen droplets), cascade-impactor and so on.

Weight flow distribution can be measured with single collection probe for any configuration of spray, but for measuring diametral and circumferential distributions in conical-shaped sprays, it is convenient to use a collection rake and a sectorized patternator, respectively.

Simultaneous measurement of both droplet size and weight flow distributions is mostly desired, and the method developed by the author is such a technique. In this method, a set of samples are caught on a long belt simultaneously, the exposure time of all samples to spray being held constant, and therefore, the information on weight flow distribution can be obtained by calculating the volume of droplets appeared in unit area of each sample. Another feature of this method is its applicability under any condition of ambient gas.

In most continuous combustion systems of practical use, the aerodynamic factors are important in respect to flame stabilization, rapid mixture formation and so on. The study of gas flow under burning condition will provide the most useful information, but usually is very expensive of time, money and material, and furthermore, in such a test difficulties arise relating to the temperature measurement of hot gases when the velocity distribution is to be measured. These defects led to the development of isothermal modeling techniques, in which cold air or water is used as the fluid, and the gas flow is either visualized with the aid of streamers and tracers or measured by various instruments. Isothermal modeling, in spite of lacking in simulating the density change due to combustion, serves as a useful tool for satisfactory operation of combustor, and some examples are shown to illustrate the good qualitative correlation between flow patterns at isothermal conditions and those obtained under burning conditions.

There are many requirements to be satisfied by the combustor, and the main items in respect of measurements may be combustion efficiency, pressure loss, outlet gas temperature distribution and flame tube temperature. The measuring methods of these items are described together with several applica-

\* 機関開発第一部

tions of gas analysis to the combustor development. The examples of the latter are the measurement of combustion efficiency, the calculation of temperature of very hot gases whose temperatures are so high that the use of ordinary thermocouples is not adequate, and the prediction of outlet gas temperature distribution from isothermal test.

The main part of this paper was originally presented by the author at the 210th Lecture Meeting of J.S.M.E. (Measurement on Combustion) which was held on April 20 and 21, 1964.

## 目 次

まえがき

1. 噴霧特性の測定
  - 1.1 一部サンプリングによる粒度分布の測定
  - 1.2 噴霧全体から粒度分布を求める方法
  - 1.3 分散量の測定
  - 1.4 粒度分布と分散量分布の同時測定
2. ガス流れの観測
  - 2.1 燃焼状態での観測
  - 2.2 等温下での横型試験一般
  - 2.3 通気試験および燃焼状態との比較例
  - 2.4 通水試験および燃焼状態との比較例
3. 燃焼器特性の測定およびガス分析
  - 3.1 燃焼器特性の測定
  - 3.2 ガス分析の応用例

付 記

参考文献

## まえがき

ガスタービン用燃焼器は、その内部でおこる諸過程が複雑でかつ未だ明確にされていないことなどのため、これを理論的に設計しうる段階には至っておらず、その開発は実験的研究によらざるを得ない現状である。

他方、現用のガスタービンは液体燃料を用いるものが多く、これを噴霧状にして供給するものでは、噴霧の特性が燃焼効率その他の点で、また、燃焼器内のガス流れは火炎の安定化その他の点で、それぞれ燃焼器の特性に大きな影響を及ぼすが、これら両者も理論的予測が殆んど不可能である。

このような観点から、標記についての主な対象として、液体燃料噴霧の特性、燃焼器内のガス流れおよび燃焼器特性を選び、これらの計測法の概要をのべる。

### 1. 噴霧特性の測定

ガスタービンにおける連続燃焼に関連し、定常状態(但し、流量について)での、粒の大きさと噴霧流内

における燃料の流量分布(分散量分布)の測定法についてのべる。噴霧特性の測定法と表示については多くの優れた記述<sup>1)-5)</sup>があるので、これらも参照されたい。

#### 1.1 一部サンプリングによる粒度分布の測定

噴霧粒群の粒度分布を求める方法を、噴霧流内の多数の位置から粒試料をとり、これと分散量分布とから求めるもの(サンプリング法)と、噴霧粒全体から求めるものに分けてのべる。

前者では一般に、正しい試料をとり出すことが難しく、試料の採取および粒度分布の計算に多くの時間と労力を要し、粒度分布だけを知りたいときでも分散量分布の測定を要する、などの点が短所とされるが、他面、測定装置が概して簡単であり、粒径の場所的変化が明らかになる、などの長所がある。つぎに、この方法における粒試料の代表的採取法についてのべる。

##### 1.1.1 浸漬法

これは、適当な液体を用いて噴霧粒を受止め、粒を、液中に没入した状態で観測するもので、観測は通常、顕微鏡写真に撮影して行なう。この方法では、粒の大きさを直接正確に測ることができるが、燃料油粒の受止めに適する浸漬液が一部を除き見つからず、受止めに際しての粒の分裂や受止め時と液中での粒の合体がおこり易い。

つぎにこれらの問題点についてのべる。

**浸漬液:** 具備すべき性質は、液と粒は互に溶かさず吸収しない、表面張力が粒のそれよりも小さい、比重が粒のそれよりも小さくかつその差が過大でない、粘度が適当、蒸気圧が過大でない、淡色で、無毒なことなどである<sup>6)7)</sup>。

石油系液体燃料の表面張力は 25 dyne/cm 前後であり、これに適する浸漬液をうることは容易ではない。しかし、重油(A~C)に対してはシリコン油(20 dyne/cm, 約 1,000cst.)がよいようで、これによる受止め例を図1に示す。これより軽質の燃料では、粒の周りに乳白色の混濁物を生じ、測定が困難であつた<sup>8)</sup>。

Beningtonによれば<sup>9)</sup>、JP-4(ジェット燃料)には Dimethylamine borane が使用できるという。但しこ

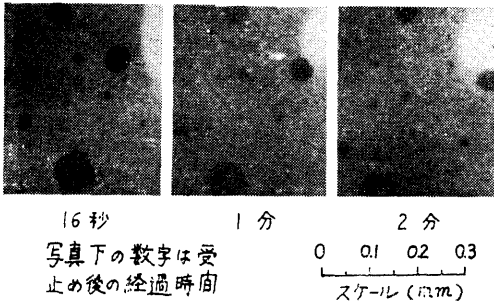


図1 シリコン油によるA重油粒の受止例(筆者)<sup>8)</sup>

のものは、有毒なことその他使用上の難点がある。

このように、液体燃料に適する浸漬液は数少ないので、燃料の代りに水またはグリセリン水溶液などを噴射し、その噴霧粒を測定することが行なわれている。水粒の受止めに適する浸漬液は比較的容易に得られ、使用例には Stoddard solvent や 白灯油 (Rupe, Tate)<sup>7)9)</sup>、バルボリン潤滑油の濃縮液 (棚沢)<sup>6)</sup>、SAE-20, 50 潤滑油 (倉林)<sup>10)</sup>、シリコン油 (一色)<sup>4)</sup>、真空ポンプ油およびその濃縮液 (筆者)<sup>11)</sup> などがあり、高速噴霧流の場合を除き、動粘性係数が約 500~2,000 cst. のものが多い。

**粒の分裂:** これに関与する因子は、粒の大きさと性状、受止め面に対する粒の相対速度、浸漬液の性質などである。ある一つの粒についてみると、相対速度がこれ以上では分裂するという限界(限界速度  $V_c$ )があり、 $V_c$  は粒が大きいかほど小さくなる。図2は水粒に対する  $V_c$  を示し、 $a$  は浸漬液が Liquid methyl

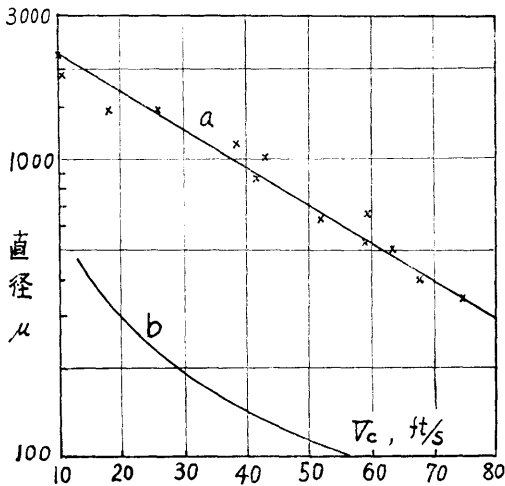


図2 水粒の分裂限界速度,  $V_c$ <sup>4)9)</sup>

silicone ( $\gamma=0.974$ ,  $25/25^\circ\text{C}$ ;  $\nu=12,500$  cst.,  $25^\circ\text{C}$ ) の場合 (Hanson)<sup>4)</sup>,  $b$  はケロシンの場合 (Rupe)<sup>9)</sup> である。

図3は、空气中に初速度  $v_0$  で放出された直径  $x$  なる粒の、距離  $S$  における速度  $v$  を求める線図で<sup>9)</sup>、これと図2から、水粒の分裂防止に必要な受止め距離が推定できる。

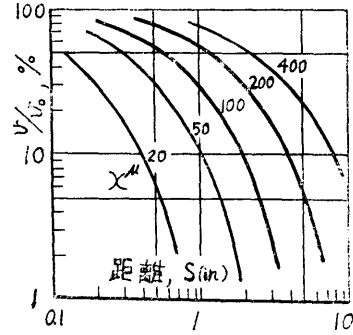
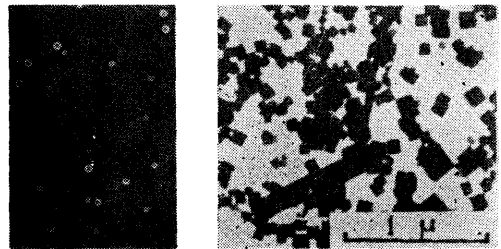


図3 粒の速度 (Darnell)<sup>9)</sup>

**粒の合体:** これには、受止めに際しての粒の重なり合いに起因するものと、浸漬液中での粒の遊動に起因するものがあるが、浸漬液の粘度が適当であれば後者によるものはほぼ避けられ、主として、受止めに除しての捕捉粒数の問題に帰着する。しかしこの問題は他の受止法にも関連するので、あとでのべることにする。

1.1.2 痕跡法

これは、粒を受止めたときにできる痕跡の大きさから、粒の大きさを求めるもので、痕跡をつくる方法にはいろいろあるが、近年多く用いられているものは、粒の直径と同等または以上の厚さの MgO の層に粒を受け、これに Snow hole に似た痕跡をつくるもので、受止例を図4 a に示す。この方法は油粒にも適用でき、試料の保存も可能であるが、痕跡と粒の直径比につい



a. 受止例<sup>5)</sup>      b. MgO の粒子 [1000°C]<sup>13)</sup>  
図4 MgO による痕跡法

て校正を要し、微細粒と粗大粒（約 200 $\mu$  以上）には使用上難点がある。

May<sup>14)</sup>は水、潤滑油など数種の液粒について直径比を求めた。それによると、粒径が約 20 $\mu$  以上では、粒の大きさ（最大約 200 $\mu$ ）と種類に関係なく直径比（痕跡径/粒径）は約 1.16 であるが、これ以下の粒ではそれが大きくなり、10 $\mu$  以下の粒では、更に直径比に及ばず MgO 粒子の大きさの影響が著しくなるという。May の用いたものは、約 0.5 $\mu$  であった。

なお、MgO 粒子は立方晶系の結晶で（図 4b）、その大きさは Mg の 燃焼温度によつて異り、これが高いほど大きくなるといわれる<sup>13)</sup>。

粗大な粒には、MgO の 厚い層を用いなければならないが、このような層は脆弱なため、噴霧流によつて破かいされ易い。

1.1.3 直接受止法

May<sup>12)</sup>は、潤滑油その他の粒を清浄なガラス面で、Bitron<sup>15)</sup>は、超音速気流で微粒化したDibutyl phthalate の粒をシリコン油を極めて薄く塗つたガラス面で、それぞれ受止めた。後者の場合には、レンズ状の液塊と粒との直径比は粒径（最大約 40 $\mu$ ）に関係なく約 2 であった。

〔捕捉粒数の制限〕

粒数密度： 上述の各種受止法では、粒数密度（受止面の単位面積当りの粒数）が大きすぎると、粒の重なり合いによる合体を生じ易く、また計数にも不便である。一方、これが小さすぎると所要の粒数をうるのに手数がかかる。

Delavan 社では、droplet area fraction（粒の投影面積/受止面の面積）を、浸漬法による場合は約0.05 にしている<sup>9)</sup>。また倉林は、回転噴孔からの噴霧粒を浸漬法で受止めるに際し、粒数密度を約 100~200個/cm<sup>2</sup>（但し、100 $\mu$  以上の粒数）におさえた<sup>10)</sup>。

シャッターおよび移動装置： 所要の粒数密度を得るには、一般にシャッターを用いる。その代表的構造例<sup>1)</sup>を図5に示す。これでは、例えば浸漬液を所望の

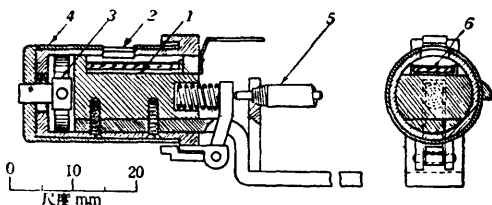


図 5 円筒形シャッター（棚沢）<sup>1)</sup>

厚さに塗つたガラス板 6 を支持具 1 にのせておき、リリース 5 を押してスリット 2 を備えた円筒 4 を回転させ、その際の回転速度によつて、受止め面の噴霧流への露出時間を調節する。

この種のシャッターを用いて採取した粒試料で、粒の合体が生じているかどうかを調べるには、露出時間を変えてみればよい。すなわち、粒数密度が露出時間に比例しかつ粒径が不変であれば、合体がないと考えられる。

また、シャッターの噴霧流内での移動には、微動装置や回転盤<sup>16)</sup>などが用いられる。

慣性衝突： 噴霧流内では通常、粒とともに気体も運動しており、この中へシャッターその他の物体を入れると、粒は慣性によつてこれに衝突しようとするが、これを避ける気流からの抵抗をうけ、粒の衝突が妨げられる。この現象は、集塵や航空機への着水その他に関連し重要で、これについては多くの研究がある。

それらにより、粒は大きさが一樣な球で、物体のかなり上流では粒と気体の速度は等しいとして、衝突効率は、慣性衝突パラメータ  $K$  とレイノルズ数に関するパラメータ  $\varphi$  の関数であることが、明らかにされている。

$$K = \rho v x^2 / (9 \mu_g D_t), \quad \varphi = Re^2 / K \quad \dots \dots (1)$$

$x(\rho)$ ：粒の直径（密度）， $\mu_g(\rho_g)$ ：気体の粘性係数（密度）， $D_t$ ：物体の代表長さ， $v$ ：物体に対する粒の相対速度， $Re$ ：レイノルズ数  $[= \rho_g v x / \mu_g]$

衝突効率は、気流に直角な断面への物体の投影面積内を通過する単位時間当りの粒数に対する、単位時間当り物体に衝突した粒数の比で定義され、 $K$ は、粒が Stokes の式の抵抗を受けるとしたとき、初速度  $v$  なる粒の静止気体内における停止距離  $[= \rho v x^2 / (18 \mu_g)]$  の、 $D_t/2$  に対する比、 $\varphi$  は、 $Re$  数が大きい場合抵抗が Stokes の式に従わない場合の補正パラメータである。図 6 は、軸が気流に直角な円柱の衝突効率  $E$  を

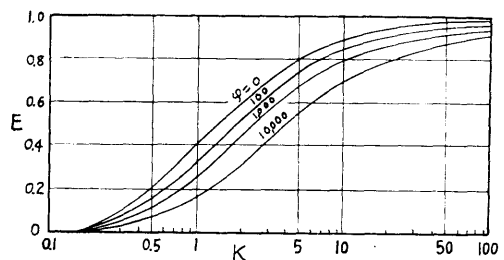


図 6 円柱の衝突効率（Golovin）<sup>17)</sup>

示し、横軸の  $K$  は、 $D_i$  に円柱の直径を用いた値である<sup>17)</sup>。

粒径範囲の広い粒群では、小粒の衝突効率は低いので、正しい粒試料を得ることが難しくなる。衝突効率を大きくするには、小型の受止め装置を用い、粒速度が大きい位置で受止めるのが望ましい。

#### 1.1.4 直接撮影法

噴霧流内では、粒は通常高速で運動しているが、電気火花や放電管を用いて短時間(約  $10^{-6}$ S 以下)照明すれば、これをほぼ静止の状態に撮影することができる。しかし、このような写真から直接求まる粒度分布は空間的なものであるから、時間的粒度分布を得るには、さらに個々の粒の速度を知ることが必要である。

空間的粒度分布は、写真に撮った粒のうち、有効焦点深度内に存在する粒の直径と数を算えて求める。有効焦点深度内にあるかどうかの判定は、粒映像のぼやけの度合<sup>18)</sup>や粒の周りにできるフレネル・リングの巾<sup>19)</sup>によつて、行うことができる。一方、粒の速度は、二重フラッシュ法<sup>18)20)</sup>により二重露出したときの、粒映像のずれと時間間隔から、あるいは回転鏡法(Ingeboら)により、求めることができる。

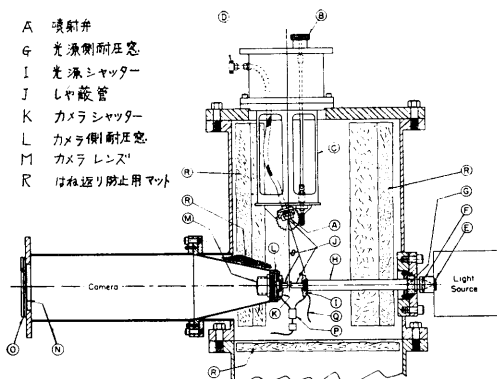


図7 粒径測定用直接撮影装置 (De Corso)<sup>19)</sup>

De Corso<sup>19)</sup>は、軽油噴霧の粒径に及ぼす周囲気体圧力と噴射圧力降下の影響を、直接撮影法で調べた。測定装置を図7に示す。但しこの場合には、粒の速度は測定せず、時間的局所粒度分布は空間的のそれに等しいとしている。

直接撮影法では、測定装置および試料採取過程が煩雑になるが、試料採取に当つて噴霧流に妨害を与えることが比較的少く、燃料油粒および燃焼中の噴霧粒<sup>20)</sup>にも適用できる点が、長所である。

#### 1.2 噴霧全体から粒度分布を求める方法

これには、噴霧粒の代表試料を採取しそのまま計数するものと、分級して求める各種の方法とがある。

##### 1.1.2 分級しないで求める方法

軸対称噴霧について、浸漬法により粒試料を採取する Delavan 社の要領<sup>9)</sup>を、図8に示す。受止めセルの巾は約 5 mm 以上とし、droplet area fraction の加減は、シャッターの移動速度(最大、約 65 cm/s)と窓の開き角  $\theta$  ( $30' \sim 1^{\circ}20'$ ) によつて行なう。

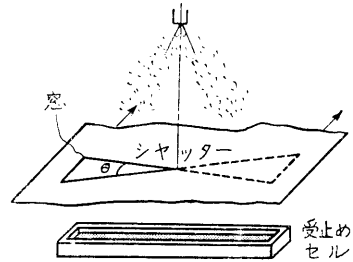


図8 粒試料の採取要領<sup>9)</sup>

(Delavan 社、但し想像図)

このような方法や前述の方法で採取した試料では、粒の計数に多くの時間と労力を要するが、これを軽減するため、種々の計数装置が考案されている。これには、Hanson や Rupe が用いたような半自動式のものと、Delavan 社や Mullard (研) のような完全自動式のものが、後者では、一般には粒の顕微鏡写真に光線走査を行い、それによつておこる光量の変化を

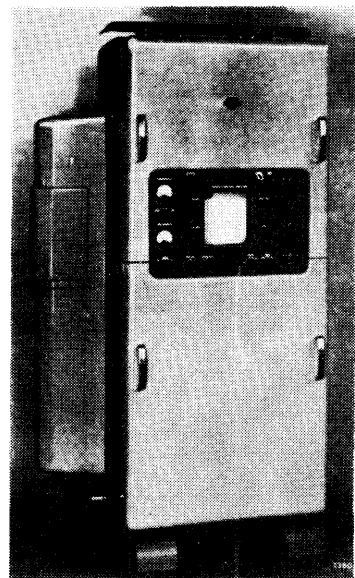


図9 自動計数装置 (Mullard 研)<sup>21)</sup>

二次電子増倍光電管などを用いて電気パルスに変え、これを増巾器その他を経て計数管により計数している。一例として Mullard (研) のそれ (L188型, 等身大)<sup>21)</sup> を図9に示す。

走査方式には、画面を機械的に移動するものとテレビジョン方式とがあり、画面には、噴射液体の着色(水には nigrosine 約3% 添加)と撮影時のフィルタの選定によつて得られる、コントラストの強いネガを用い、また粒の撮影は、通常、浸漬受止め試料について行なうが、直接撮影することもある。

1・2・2 固化粒の篩による分級

固化した粒群について、主として篩による分級と重量測定により粒度分布を求めるもので、これには、常温以下で固化粒をうる凍結法と、加熱して液状となつた「ろう」その他の物質を噴射し常温で固化粒をうる方法とがある。前者には、液体窒素で冷却した噴射室内でケロシン噴霧を固化した例<sup>22)</sup>があるが、この場合には、霜の混入や早期液化などのため実用に至らなかつた。

後者では一般に、とけた「ろう」が用いられ(molten wax 法)、使用例には、パラフィンろう、白ろう、鯨ろうなどがある<sup>23)-25)</sup>。一般的に、用いる「ろう」は、①液状での物理的性質が燃料のそれに等しく、②常温で完全に固化し、③固体状での比重が液状でのそれに等しい、などの条件を満たすことが望ましく、このうち①の条件を満たすには、加熱温度の調節のほか、性質の異なる「ろう」を混ぜて使うのがよいといわれる<sup>23)</sup>。

とけた「ろう」の噴射装置は恒温装置内に納めることが必要で、測定装置の代表的構造例<sup>23)</sup>を 図10 に示す。これでは、粒は空气中を落下する間に放冷して固化するが、噴射室の周りから求心的に撒水して固化させるものもある<sup>23)-24)</sup>。

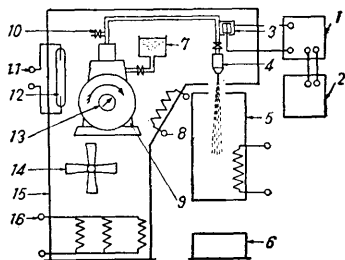


図10 とけた「ろう」による測定装置 (棚沢)<sup>23)</sup>

なお、篩による分級が困難な約 100μ 以下の粒群は、気流篩その他による分級または顕微鏡法により粒度を

分析する。

1・2・3 流体内での沈降時間の差による分級

静止流体内における直径  $x$ 、密度  $\rho$  なる球の終末速度  $v_t$  は、(2)式で与えられる。

$$v_t = \{4gx(\rho - \rho') / (3\rho' C)\}^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

$\rho'$ : 流体の密度,  $g$ : 重力の加速度,  $C$ : 球の抵抗係数。

$C$  は、レイノルズ数  $Re [= \rho' v_t x / \mu', \mu'$ : 流体の粘性係数] の関数であるから、 $Re$  がきまれば  $C \cdot Re^2$  の値もきまり、かつその関係は一義的である。したがつて、 $Re$  と(2)式を用いて  $C \cdot Re^2$  の値 ( $v_t$  を含まない) を計算すれば、これに対応する  $Re$  の値から  $v_t$  が求まる。とくに  $Re < 0.5$  では、抵抗は Stokes の式に従い  $C = 24/Re$  となるので、 $v_t$  は(3)式から直ちに求まる。

$$v_t = g(\rho - \rho') x^2 / (18\mu') \dots\dots\dots (3)$$

以上のことからわかるように、球が小さいほど、ある高さを落下するのに時間がかかる。したがつて、この原理を利用して噴霧粒群を分級することができる。

広安らは、流体を気体(主に空気を使用)とした図11の粒度分析器を試作した<sup>26)</sup>。沈降塔 5 (770mmφ×6m) 内に短時間噴出された噴霧粒群は、同塔内を落下する間に分級されて粒径に応じ逐次たびんの受皿6にたまり、噴出時からの経過時間と粒の重量が積分重量記録器9に自記される。この装置での落下時間と粒径との関係は、molten wax 法により求めてあるので、それを用いて粒径—積分重量曲線が得られる。

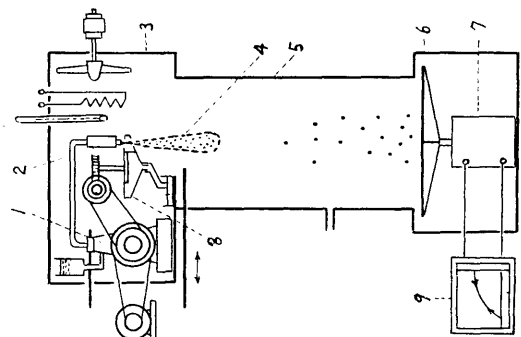
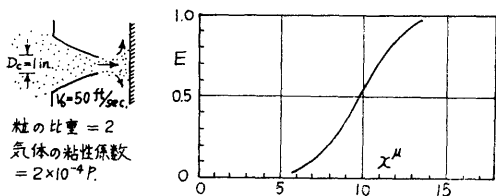


図11 沈降塔粒度分析器 (広安ら)<sup>26)</sup>

一方 Taylor らは、水の噴霧を低温の Hexane (約  $-20^{\circ}\text{C}$ ) で凍結し、かつこれを沈降時の流体として、粒度分析を行った<sup>27)</sup>。受皿の重量はばね秤で測り、落下時間と粒径の関係は、 $Re$  数が 0.5 以上に亘るので (3) 式を補正して求めた。近年、重質燃料の噴霧をエチルアルコールと cardice を用いて凍結し、粒度を分析することが行なわれているといわれるが<sup>28)</sup>、分析のしかたは、おそらく篩または本法によるのであろう。

#### 1.2.4 慣性衝突による分級

図12 a のように粒を含んだ噴流を衝突板にあてたときの、粒径による衝突効率  $E$  の変化は、気流中に物体をおいた前述の場合とは異り、同図 b のように鋭くなる<sup>29)</sup>。噴流の場合のこの性質を利用して、粒群を分級することができる。



a. 噴出要領

b. 衝突効率

図 12 噴流の場合の衝突効率 (Ranz)<sup>29)</sup>

May<sup>30)</sup>は、大ききの異なる4個の噴出口を直列に接続した Cascade impactor (多段衝突粒度分析器<sup>29)</sup>) をつくつた。その後 Casella 社の4段式、Michell らの6段式など各種のものが発表されており、また分級の鋭さや通路への集滴などの問題<sup>30)</sup>も研究されているが、それらや粒の分裂など、改善すべき点があるようである。

#### 1.2.5 飛散距離による分級

大きさが一様でない噴霧粒群を水平方向に噴射する

と、大粒ほど遠方に達するので、これによつて分級することができる<sup>31)</sup>。Binark らはこれとは異り、中空円錐状噴霧について、簡単な器具を用いて粒度を分析した<sup>31)</sup>。

それにはまず、図13 a に示すように噴霧流の下方に内径  $2R$  の異なる容器 ( $2R=1.3\sim 12''$ , 6種) をおき、それぞれの場合について容器への噴霧量を測定し、同図 b を得る。

中空円錐状噴霧では、周囲気体が図 a の実線のように誘引されるため、粒は、気流からの抵抗をうけ点線のような径路を辿る。ここで、粒は噴霧外観に沿つての長さ  $S'$  を飛しようして停止しその後は噴霧軸に平行に運動する、と考える。図 b には、この場合の、 $R$  に対応する噴霧外観に沿つての長さ  $B$  も示してあり、これから、例えば  $B$  が  $10''$  未満の粒の容積 (mist flow の量) は約 77% であることがわかる。

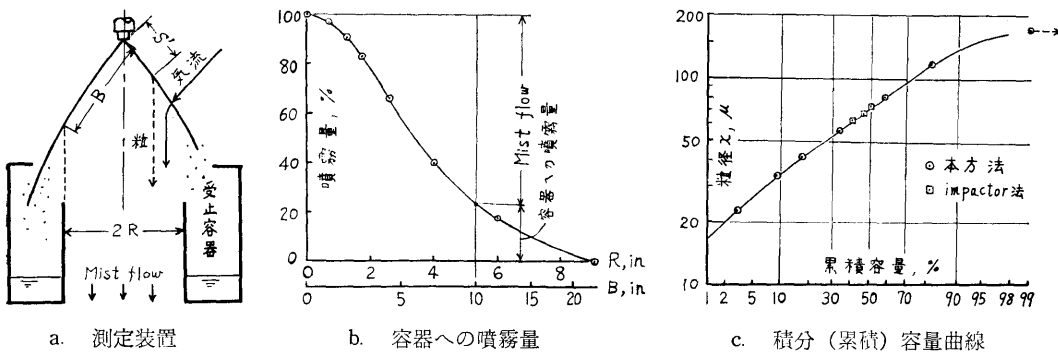
初速度  $v_0$  で静止空気中に放出された、直径  $x$  なる単一粒の停止距離  $S$  は計算で求まるので、噴孔近くで噴霧流の初速度  $v_0$  を測定し、単一粒の  $x-S$  の関係が噴霧粒群の場合にも適用できると仮定すれば、図 b の  $B$  に対応する  $x$  がきまり、これから直ちに図 c が得られる。図には impactor 法 (受止法と思われる) による結果も示してあるが、両者はよく一致している。

#### 1.3 分散量の測定

噴霧流内の流量分布を知ることは、燃焼器の形状および寸法の決定やサンプリング法による粒度分布の測定その他に関連し、必要である。ここでは、噴霧流をよぎる一つの面上の微小面積  $AF$  を通過する噴霧流量を  $4Q$  としたとき、 $4Q/AF$  を分散量とよぶことにする。

##### 1.3.1 捕集管

分散量の測定には、先端が双形の捕集管が用いられ、測定精度の点からは等速通気式が望ましいが、厳密を

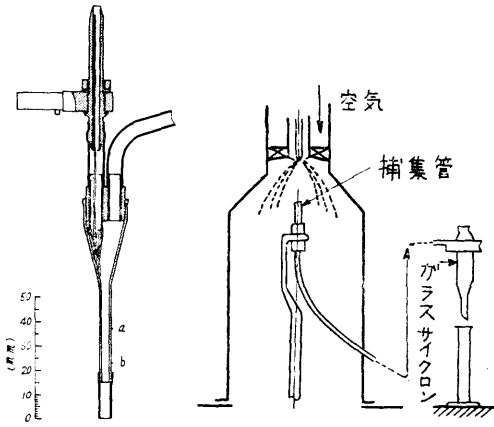


a. 測定装置

b. 容器への噴霧量

c. 積分 (累積) 容量曲線

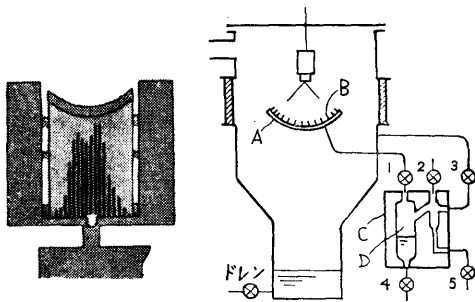
図 13 中空円錐状噴霧についての粒度分析法 (Binark)<sup>31)</sup>



a. 構造例(筆者) b. 測定例(Poulston)<sup>32)</sup>  
 図 14 自然通気式捕集管

要しないときは、構造および使用が簡便な図 14 のような自然通気式が用いられる。a は回転盤にとりつけて<sup>16)</sup>、b は測定位置に応じ先端の角度の異なるものを用いて<sup>32)</sup>、いずれも、管先端を噴孔に正対させながら測定する。

**1.3.2 円錐状噴霧の半径方向における分布の測定**  
 捕集管のほか、多数の異径円筒を同心円状にとりつけた受皿や図 15 に示す捕集器その他が用いられる。図 a は、下端は閉じ上端は噴孔に正対するよう角度の異つた管を一系列に並べたもので、この捕集器は、これと同じ構造のもの(但し、中央部は欠)と十字形に組み合わせられて用いられる<sup>7)</sup>。



a. 捕集器(Rupe)<sup>7)</sup> b. 円弧状 Rake (De Corso)<sup>33)</sup>  
 図 15 半径方向の分布の測定装置

図 b は、De Corso ら<sup>33)</sup>が変圧下での測定に用いたもので、Rake A と受器 C にはそれぞれ 28 個の捕集管 B と受液室 D が設けてあり、捕集中はパルス 1 と 3 を開けておき、自然通気式として用いる。

図でもわかるように、円錐状噴霧では通常、半径方向の分散量分布は噴孔を中心とする球面上で測定され、渦巻噴射弁の噴霧のそれは図 16 のようになる。なお、中空円錐状噴霧では、このような分布曲線の代りに、これから求まる噴霧角 (Spray angle)<sup>7)33)</sup> や、ごく大まかには噴出円錐角 (Spray cone angle) を用いて、半径方向における噴霧の分散状況を表わすことが多い<sup>34)</sup>。

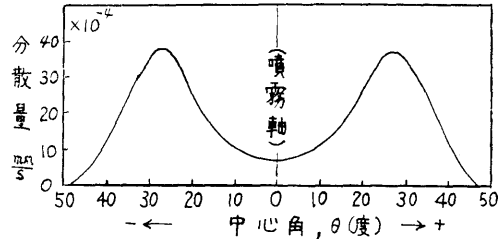
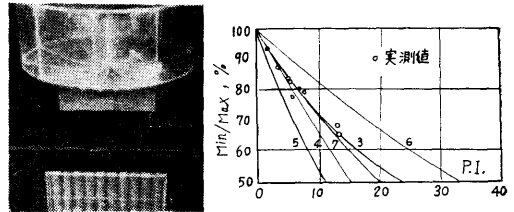


図 16 分散量分布曲線 (渦巻噴射弁)

**1.3.3 円錐状噴霧の円周方向における分布 (Patternation) の測定**

これを測定するには、図 17 a のような Sectored patternator (別名, Patternator vessel, Spray basin) を用いるのが便利である。セクタ数  $n$  は通常 6~12 (図 a では 10) で、各セクタの受止量についての Min./Max. 比の許容限度は、数  $n$ 、噴射圧力などによつても異なるが、おおむね 0.8 とされている<sup>35)</sup>。



a. パタネータ b. Min./Max. 比と P.I. との関係 ( $n=6$ )

図 17 円錐状噴霧のパタネーションの測定<sup>35)</sup>

Min./Max. 比が等しくても、他のセクタの受止量によつて噴霧全体についての均一度が変わる。この点は、Patternation Index (P.I., (4)式) で表わすことができる<sup>35)</sup>。

$$P.I. = \sum |v_m - v_i| \dots \dots \dots (4)$$

$v_m = 1/n(\%)$ ,  $v_i = V_i/V(\%)$ ,  $V$ : 総噴霧量,  $V_i$ : 各セクタの受止量 ( $i=1 \sim n$ )。

図 b は  $n=6$  の場合の一例で、図中の曲線はそれぞれ、各セクタの受止量がある法則に従つて変化すると



した計算値で、Min./Max. 比が著しく小さい不均一な噴霧の P.I. 値は、実測値が示すように曲線 3 に近い。この曲線は、一つのセクタに最大量、他は一様とした場合で、このような噴霧は、噴射弁の工作不良により噴霧に粗大な粒のすじを伴う場合に生じ易い。

1.4 粒度分布と分散量分布の同時測定

粒度および分散量分布の同時測定は、測定の迅速化その他の点から望ましい。前述の Binark らの方法は、このような測定法の一つと見られるが、得られる流量分布は mist flow についてであり、かつこれが適用できるのは中空円錐状噴霧の場合に限られる。

筆者は、これら両分布を求めるのに必要な粒試料が、一回の操作でかつ変圧環境下でも採取できる測定装置を試作した<sup>11)</sup>。

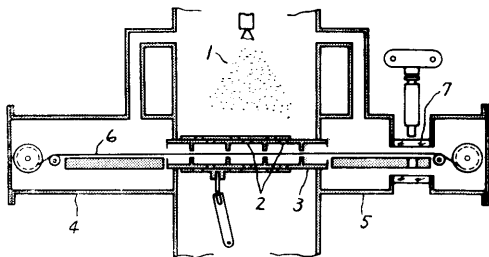


図 18 粒試料の採取と観測要領 (筆者)<sup>11)</sup>

粒試料の採取と観測要領：これを図18に示す。噴霧流1の下流には、多数の窓2を備えた試料採取器3をとりつけ、一方、準備室4と観測室5の間にはかなり長いベルト6を通じておき、窓の開閉とベルトの長手方向移動は、大気中から行うようにする。窓を短時間開放してベルト表面に受止めた粒試料は、ベルトとともに観測室に移し、窓7を透して大気中から順次撮影する。

分散量分布の求めかた：ある一つの粒試料において、試料面積  $f$  内に直径  $x_i$  なる粒が  $n_i$  個あるとし、試料採取時の窓の開放時間を  $t$  とすれば、その試料を採取した場所における分散量  $y$  は(5)式で与えられる。

$$y = (\pi/6) \Sigma (n_i x_i^3) / (f \cdot t) \dots\dots\dots (5)$$

したがって、種々の場所で採取した多数の粒試料について  $f$  と  $t$  をそれぞれ一定にすれば、 $\Sigma (n_i x_i^3)$  は  $y$  に比例するから、分散量分布の状況は  $\Sigma (n_i x_i^3)$  の分布で表わすことができる。

多数の粒試料について、時間  $t$  を一定にしかつ試料の同時採取を行うには、採取器に所要数の窓を備え、これらの窓を、巾が一定で窓と同数のスリットを有するシャッターを用いて、同時に開閉した。

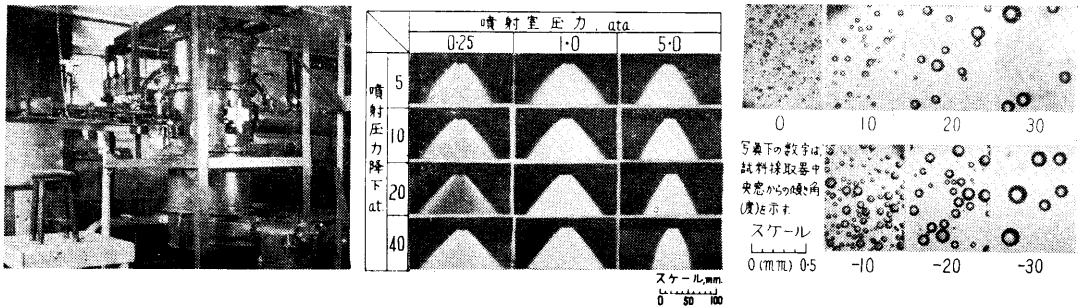
測定装置：主要部と観測例を 図19 に示す。噴射室の直径は 700 mm、内部気体 (主に空気を使用) の常用圧力は 0.25~6 ata. で、測定中は噴霧の吹き上げを防ぐため低速で通気する。

図 b は、内圧と噴射圧力降下を変えたときの噴霧外観写真 (通気速度は約 0.3 m/s) を示し、c は粒写真例である<sup>36)</sup>。粒試料は浸漬法により採取し、ベルトには写真用フィルムを加工したのを用い、試料採取器とシャッターは円弧状にした。図 c は、窓数が 31 個 (窓間隔は中心角で 5°)、円弧半径が 200 mm のそれを用いた場合である。

2. ガス流れの観測

燃焼器内のガス流れは、燃焼状態および冷間での観測が行なわれている。

一般に、流体の運動を可視化すれば、流れの迅速かつ全般的な観測ができるがおおむね定性的な結果しか得られず、一方計器測定によれば、利害はこれと相反し、また流れにかく乱を与え、燃焼状態ではさらにガ



a. 観測装置の主要部 [0.7mφ, 0.25~6 ata.]      b. 渦巻噴射弁の噴霧 [90°, 水]      c. 同左の粒写真例 [2.5 ata×20 at, 水]

図 19 粒度分布と分散量分布の同時測定装置および観測例 (筆者)<sup>11)36)</sup>

ス温の測定を要し、高温領域におけるそれには困難を伴う<sup>38)</sup>。

ガス流れの模型試験法については浜部の記述<sup>37)</sup>があるので、ここでは、主としてその後の研究を中心とし、燃焼状態および冷間試験における観測方法と両者の関連性などについて述べる。

## 2.1 燃焼状態での観測

### 2.1.1 可視化観測

図20は、Wayら<sup>39)</sup>が炭酸ナトリウムをつけた針金を用いて調べた流れ模様で、流れの向きは、それが発する羽毛状の黄色光でわかるが、燃料にエチルアルコールを用いるとこれが一層明瞭になるといふ。

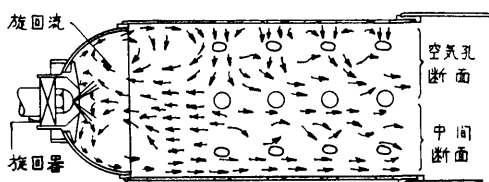


図20 燃焼時の流れ模様 (Way)<sup>39)</sup>

このほか、炭酸ナトリウムその他の粉末を混合気にも、また食塩を燃料に混ぜ、トレーサとして用いた例もある<sup>38)40)</sup>。

### 2.1.2 計器による測定

Poulstonら<sup>32)</sup>は、図21aに示すプローベ (耐熱、約1200°C) を用いて、ガス油燃焼時の燃焼領域における速度分布を測定し、同図bの結果を得た。

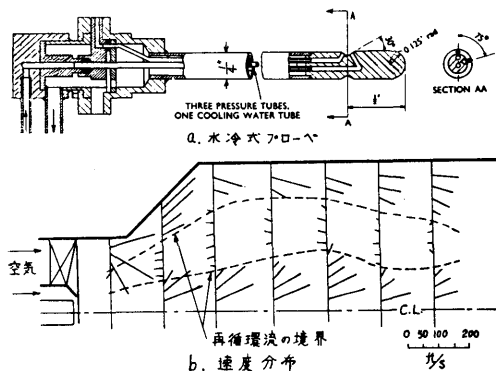


図21 燃焼時の速度分布 (Poulston)<sup>32)</sup>

Clarkeら<sup>41)</sup>も、プロパンガスおよびケロシンを燃焼し、円柱型風向風速計を用いて一次燃焼領域内の速度分布を測定した (図25参照)。この際のガス温は、ガス分析により求めた局所空燃比と局所燃焼効率から算定したが、この方法によつた主なる理由は、局所ガス

温の最高値が1925°Kに達している (プロパン燃焼時の算定値)、局所ガス温の測定に簡便な熱電対などの使用が困難であつたためと思われる。

燃焼状態での観測には、多くの経費や労力などのほか技術的困難も伴うので、等温下での試験 (冷間) からこれが推定できることが望ましい。

## 2.2 等温下での模型試験一般

燃焼器内では燃焼による大きな密度変化があり、等温下での模型試験ではこれを再現することができず、この点が最大の難点とされている。

この点をカバーする方法として、あと述べるように幾何学的に相似でない、いわゆる *distorted model*<sup>43)</sup> を用いることも一部提案されているが、現状は、密度変化が比較的小さな主要領域についての相似準拠を合わせて等温下で調べた場合、それが大きい領域においても、燃焼時と著しい相違が見られない、という実験結果にもとづいて、等温下の模型試験 (冷間) が広く行なわれているようである。

### 2.2.1 等温流れについての相似準拠

相似準拠は、形状の幾何学的相似のほか  $F_r$  数、 $We$  数、 $M$  数および  $Re$  数であるが、燃焼器では  $F_r$  数と  $We$  数が省略でき、また  $M$  数も、燃焼領域で 0.17、入口および出口でも 0.30 程度であるので<sup>42)</sup>、省略してよい。したがつて、幾何学的相似系内の流れについての主な相似準拠は  $Re$  数だけになる。

高温の燃焼ガスの動粘性係数は極めて大きく、常温の空気の約 12 倍、水の 130 倍にも達するので<sup>43)</sup>、実物大模型による常温での試験では、同一  $Re$  数とするための流速はかなり低くてよく、観測に好都合である。更に模型試験で都合のよいことは、原型での  $Re$  数がつきにのべる値より大きい場合には、それ以下とならない範囲で、模型での  $Re$  数を任意に選んでよいこと、このような限界値は一般には  $10^4$ <sup>38)43)</sup>、調べようとする領域内の最大速度と長さについてのそれは  $10^5$ <sup>44)</sup>とされている。

### 2.2.2 試験装置

**作動流体:** 空気と水が広く用いられ、両者の長短はおおむねつぎの通りである。圧縮性は考慮しなくてよいが、流れを可視化する場合、水は、これと等しい密度のトレーサの選定が容易、動粘性係数が小さいので低速でよい、模型のよれが少なくかつ鮮明に見える、簡便な二次元開水路も使用できる、などの点で優つているが、定量的測定には空気がよいようである<sup>38)46)</sup>。

**トレーサ:** 具備すべき条件は、凝集せず、流体と

密度が等しく、適当な大きさの球状で、光をよく反射する、などである<sup>45)</sup>。

密度についての条件は、燃焼器内の流れのように大きな加速度がある場合には重要で、これについてはNGTEでの研究があり、通気時に水粒や固体粒を、また通水時に気泡や固体粒を用いた場合、渦流内でおこる粒の半径方向のずれと粒径との関係を求めている。例えば、通水時に直径 0.1mm の気泡を用いると、渦の強さ（但し、切線速度×半径）が 20 ft<sup>2</sup>/S の場合、20° 回転する間に約 15% の半径方向のずれを生ずるといふ<sup>38)</sup>。

**模型：** 燃焼器模型は一般に、大きさは実物大、各部寸法は実物と幾何学的に全く相似とし、可視化観測用（透視の場合）は Perspex（アクリル樹脂）の板でつくるか鋳込み製とする。このような透明模型の一例（但し、内筒のみ）<sup>41)</sup>を 図22 に示す。

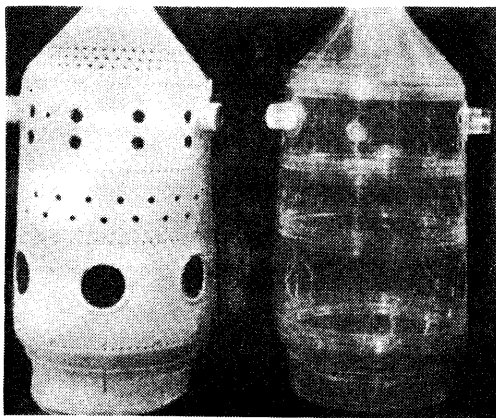


図 22 実物(左)および透明模型内筒(Clarke)<sup>41)</sup>

しかし、幾何学的相似の点は、実物内の流れを等温下での試験に再現させる上に重要であり、Thringはこの点について、幾何学的に相似な模型では内筒の側壁空気孔からの噴流の貫通力が大きすぎるので、噴流の密度が燃焼ガスのそれに等しいとした場合に、噴流のモーメントと流量（質量）が correct になるようにこれをあげるべきである、とのべている<sup>47)</sup>。

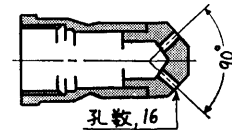
ここで correct とは、模型での噴流と主流とのモーメントの比が、実物でのそれに等しいことを指すと解され（流量についても同じ）、模型の空気孔寸法は(6)式のようになる。

$$\text{修正空気孔面積} = \text{相似模型の面積} \times (\rho_a / \rho_b) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\rho$ ：密度〔添字  $a, b$  はそれぞれ空気、燃焼ガス〕

Clarke 氏<sup>41)</sup>は等温下での模型試験に際し、実物における渦巻噴射弁からのケロシン噴霧流（噴出円錐角 = 90°）を、図 23 に示す噴射弁からの水（通水時）またはプロパンガス（通気時）の噴流でおきかえ、後述の要領で噴射した。

図 23 模型用噴射弁<sup>41)</sup>



燃料噴射弁や空気旋回器などもその構造、寸法および作動条件について、側壁空気孔の場合と同様、上述の観点から検討を要すると思われるが、この点は、炉やボイラの場合にはある程度明らかにされているけれども<sup>43)47)</sup>、下流の位置からも空気を導入し空気供給の過程がより複雑であるガスタービン用燃焼器の場合には、よくわかっていないようである。

**照明装置その他：** 流れ模様の可視化観測にはタングステンランプのスリット状光束が、またトレーサによる局所流速の測定や燃焼器内での滞留時間の測定には、それぞれ特殊な照明および撮影法が用いられるが、これらについては、浜部の記述その他<sup>37)38)45)</sup>を参照されたい。

等温下での試験（冷間）における、上述各項目についてのおおよその選定基準<sup>38)</sup>を、表 1 に示す。

## 2・3 通気試験および燃焼状態との比較例

### 2・3・1 可視化観測

系に固定した木綿糸や毛糸のストリーマー (Streamer)<sup>37)48)54)</sup>により、流れの向きとその定常性を観測することができる。ストリーマーは、低速の領域においても正しく風向を指示し、かつ小型であることが望ましい。図24は、筆者らがエルボ型燃焼器の実物大透明模型について、この種のストリーマー（同図 a 参照）を用いて調べた流れ模様の観測例<sup>49)</sup>である。

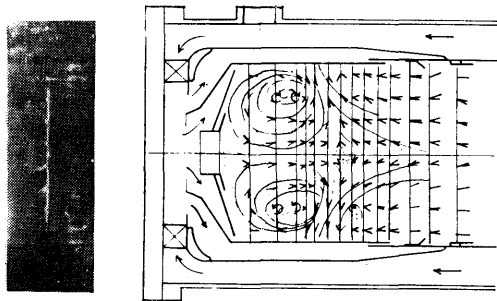
以上はストリーマーの一般的使用法であるが、速乾性ラッカーを塗布したストリーマーを系内に挿入して固化し、三次元的流れ模様を調べた例もある。

一方、トレーサの使用例には、アルミ粉末、バルサ粉末などがあり、Olson 氏<sup>50)</sup>はバルサ粉末を用いて流れ模様を調べた。通気時に密度の大きなこの種のトレーサを用いる際は、粒の大きさの選定や結果の評価に注意を要する。

### 2・3・2 計器による測定

表 1 等温下の試験についての概略基準 (Winter)<sup>38)</sup>

System to be studied	Purpose	Types of model which can be used	Tracing technique, etc., recommended
Gas turbine and similar combustion systems-complete	Preliminary study	2-d water model	Surface tracers or polystyrene
		3-d water model, if flow is rotational	Polystyrene, dispersed; flat-beam lighting
	Advanced study	3-d water model	Polystyrene, dispersed; flat-beam lighting
		3-d air model	Balsa, dispersed; flat-beam lighting
Ditto-local details	Advanced study	3-d water model	Local tracers, polystyrene or air (as appropriate); time-based lighting
		3-d air model	Boundary flow techniques; local balsa tracers and general illumination



a. 写真                      b. 流れ模様  
 図 24 燃焼領域内の流れ模様  
 [通気, ストリーマー]<sup>49)</sup>

計器は、流れを乱さないよう、なるべく小型なことが望ましく、小型風向風速計には外径 2mm の球面 5 孔式その他がある<sup>51)52)</sup>。

Poulston らは、前掲図 21 b の燃焼器について通気時の速度分布も調べたが、燃焼時との相違は主として速度の大きさだけに止まり、再循環領域の範囲は殆んど変らなかつた<sup>32)</sup>。

Clarke らは、航空用の燃焼器 (内筒は図 22 の実物) について、通気時と燃焼時の速度分布の比較を行った<sup>41)</sup>。この燃焼器については、一次燃焼領域に形成される環状渦中心の軸方向位置が、透明模型による後述の通水試験で調べてあるので (図 27 参照)、速度分布は、この渦の中心を通る直径上で水冷式円柱型風向風速計を用いて測定した。また燃焼時と通気時に用いた燃料噴射弁は前述の通りで (図 23 参照)、空気流量、

燃料流量、燃料と入口空気のモーメントの比を、それぞれ一定にした。

図 25 は結果の一例で、全体的には両者はよく合っているが、燃焼時には、軸上と壁近くでの速度が増大し、再循環領域の直径が小さくなっている。

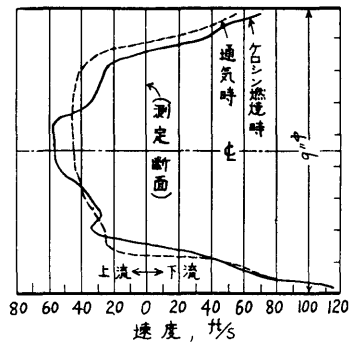


図 25 環状渦中心線上の軸方向速度分布の比較<sup>41)</sup>

再循環領域の長さは、渦巻噴射弁を用いる小型燃焼器についての Toone らの研究<sup>53)</sup>によると、燃焼時に短くなるといわれる。図 26 は、この点を示す稀釈領域前における速度分布の比較例である。

なお、上述の比較例における通気時の速度の大きさは、いずれも、通気試験による測定値に温度スケールングを行った値である。

2.4 通水試験および燃焼状態との比較例

2.4.1 可視化観測

液粒も使用できるが、トレーサーには通常、気泡

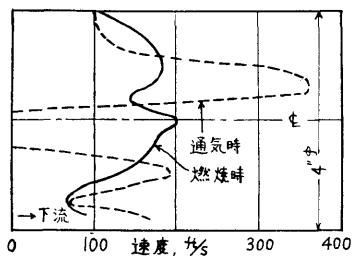


図 26 稀釈領域前の軸方向速度分布の比較<sup>53)</sup>

(密閉式の場合のみ)と固体粒が用いられる。

気泡は、密度の点で旋回流に適さず、低速の領域や渦の中心などに集積し、かつ光学的にも劣るといわれるが<sup>38)</sup>、分離除去が容易その他の長所があり<sup>41)</sup>、使用例も多い。

気泡を用いる場合には、Lucas 社や Napier 社などのように、模型を垂直にとりつけ上向きに通水する<sup>41)</sup> 46)49)。前掲図22の透明模型についての観測例<sup>41)</sup>を図27に示す。気泡は、燃焼器や Stirred combustor 内の全般的流れ模様のほか、内筒冷却用空気流などの局所の流れの観測にも用いられている。

他方、固体粒の使用例には、アルミニウムやベークライトの粉末、ろう粒、おが屑などがあるが、密度そ

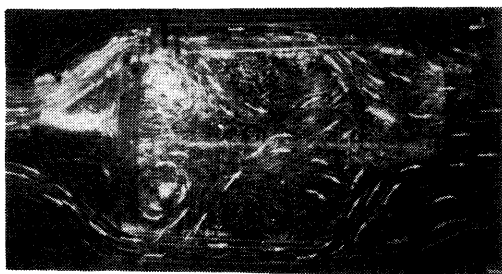
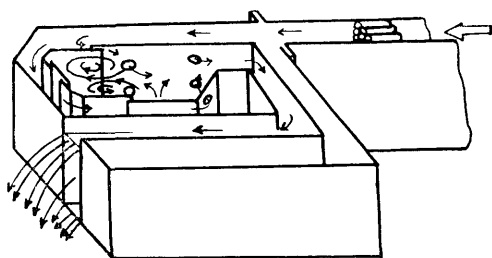
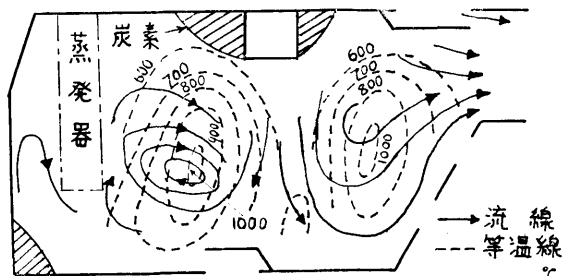


図 27 空気孔断面内の流れ模様 [水、気泡]<sup>41)</sup>



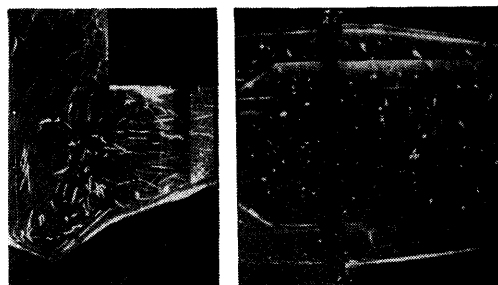
a. 観測装置



b. 流れ模様と等温線 [C型]

図 29 開水路観測装置と観測例 (西野)<sup>55)</sup>

他の点で、polystyrene の粒が優れているといわれる。その比重は、純粋なもので約 1.05 であるが、必要に応じ、ガス吸収による比重の低下 (最小値は約 0.93) または作動流体に食塩水を用いることによつて、作動流体との密度差を小さくすることもできる。またこのものは、球形の粒が容易に得られ、燃焼器では約 0.5 mm、灰やダクト内の流れには 0.5~2.5 mm の粒が用いられている。



a. 炉内の流れ<sup>54)</sup>

b. 燃焼器内の流れ  
[フラッシュ]<sup>45)</sup>

図 28 ポリスチレン球による観測例 [水]

図28 a は炉についての観測例<sup>54)</sup>、図 b はフラッシュ管による燃焼器についてのそれ<sup>45)</sup>、後者の方法により速度分布を求めることができる。このほか、燃焼器内に挿入した Polystyrene の単一粒を長時間に亘り撮影し、系内でのガスの滞留時間を求めた例もある。

また、開水路模型に用いられたトレーサには、おが屑、黒こしょう粉などがある。西野は、円環型燃焼器 (蒸発型) の研究に際し、その 1/4 に相当する箱形燃焼器を燃焼実験に供するとともに、図29 a に示す実験装置を用いて流れを観測した<sup>55)</sup>。この場合には、おが屑のほか浮子式のセルロイド製回転板を用いて、渦の位置と大きさ、死水域および渦の強さ (但し、比較のみ)

などを調べた。

同図 b は、得られた流れ模様と、燃焼実験での温度分布および炭素堆積領域との関係を示す一例で、これらの実験から、①渦の中心近くに温度の山が、また死水域には谷が対応し、②渦が安定な構造のものは燃焼も安定であり、③死水域には炭素が著しく付着する、などの点が明らかになり、燃焼器特性のうち、燃焼の安定性と炭素堆積の点は通水試験により予知することができ、他の一、二の項目についてもおおよその推定ができる、としている。

2.4.2 計器による測定

Clarke ら<sup>41)</sup>は、前掲 図22 の燃焼器について、通気試験時と同じ要領で 図23 の噴射弁から水を噴射し、一次燃焼領域内の速度分布に及ぼす“燃料”噴射の影響を調べた。“燃料”を噴射すると、予想されるように壁近くでの速度が増大するが、他には著しい変化がみられなかった。

模型試験は通常、実物での試験には多大の時間、労力などを要し、または実物での現象が高速その他の理由により相当の精度を以て測定することが難しい場合に行われるが、燃焼装置では、相似準拠の数が多くこれらをすべて満足させることは不可能または試験の煩雑化を招くため、これについての模型試験の多くは、目的に応じ少数の相似準拠だけを合わせたいわゆる部分的模型試験 (partial modeling) である<sup>44)</sup>。

ガス流れについての上述の等温下の試験もその一つで、これでは、幾何学的相似性と  $Re$  数の二つだけを相似準拠とし燃焼による密度変化その他を度外視しているが、この種の試験により、例えば火災の安定化に不可欠の環状渦の生成について、少なくとも定性的には流れの良否を知ることができるなど、その有用性は、それによる結果を実物に応用したときの経験から認められており、燃焼器の開発試験には、大気圧および高・低圧の各空気源と並んで流れ可視装置が必要であるといわれる<sup>56)</sup>。可視装置は通水式が多く用いられ、Napier 社<sup>46)</sup>では、これを主として流れ模様の観察に用い、定量的測定は通気試験によっている。

なお等温下での試験は、流れの観測や燃焼器の圧力損失 (但し、固有抵抗) の測定のほか、あとでのべるように、燃焼器出口温度分布の推定などにも応用範囲が広がられようとしている。

3. 燃焼器特性の測定およびガス分析

燃焼器の特性のうち主な項目についての測定法と、

燃焼実験へのガス分析の応用例についてのべる。

3.1 燃焼器特性の測定

3.1.1 燃焼効率

燃焼効率  $\eta_b$  は、燃焼器の出入口におけるエンタルピの差の、供給熱量に対する比で定義され、(7)式で与えられる。

$$\eta_b = \{(w_a + w_f) i_e - (w a_i + w_f i_f)\} / (w_f \cdot H_u) \dots\dots\dots (7)$$

$w$ : 重量流量,  $i$ : エンタルピ [添字  $a, f, e$  はそれぞれ空気, 燃料, 燃焼ガス],  $H_u$ : 燃料の低位発熱量。

この際、出口ガスのエンタルピを正確に測ることが肝要で、ガス温の測定には遮蔽管つき熱電対温度計などが用いられる。図 30 は、高温用の構造例 (R. R. 社) で、素線は  $13\%R_h \cdot P_t - P_t$ 、二重管構造 (内管は短い) の遮蔽管は主として強度の点から  $40\%R_h \cdot P_t$  製とし、外管の直径は約 4mm である<sup>57)</sup>。出口ガス温の分布は

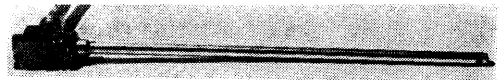


図 30  $40\%R_h \cdot P_t$  遮蔽管つき温度計 (Stewart)<sup>57)</sup>

通常不均一で、多くの場合、出口断面を多数の区画に分割し区画ごとの燃焼ガスの温度と流量とから平均温度を求めているが、二重流量計法<sup>58)</sup>などによれば、このような手数を省くことができる。

なお、ガス分析による燃焼効率の測定法については、あとでのべる。

3.1.2 圧力損失

燃焼器の圧力損失は、全圧損失率  $\Phi$  または圧力損失係数  $\varphi$  で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Delta p / P_1 \\ \varphi &= \Delta p / (\rho_1 u^2 / 2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$\Delta p$ : 全圧損失,  $P_1$ : 入口における全圧,  $\rho_1$ : 入口空気密度,  $u$ : 最大断面平均風速 (= 入口における容積流量 / 燃焼器の最大断面積)。

$\Delta p$  は、燃焼器の固有抵抗 (別名、形状抵抗)  $\Delta p_f$  と、燃焼による加熱膨脹に基く燃焼抵抗  $\Delta p_m$  とから成り、これらは(9)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_f &= K_1 \cdot \rho_1 u^2 / 2 \\ \Delta p_m &= K_2 \{ (T_2 / T_1) - 1 \} \rho_1 u^2 / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$T_1 (T_2)$ : 入口 (出口) 温度,  $K_1, K_2$ : 定数。したがって  $\Phi, \varphi$  はつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \varphi \cdot \rho_1 u^2 \\ &= K_1 + K_2 \left\{ \frac{(2P_1)}{(T_2/T_1)} - 1 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

3.1.3 出口ガス温度分布

主としてタービン翼の強度の点から、タービンの半径方向には図31のような分布、円周方向には一様であ

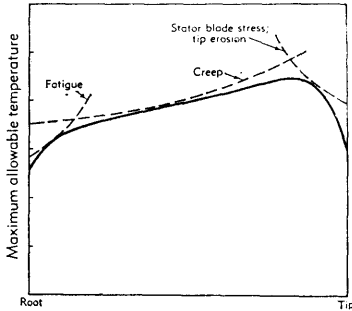


図 31 望ましい出口温度分布〔半径方向〕

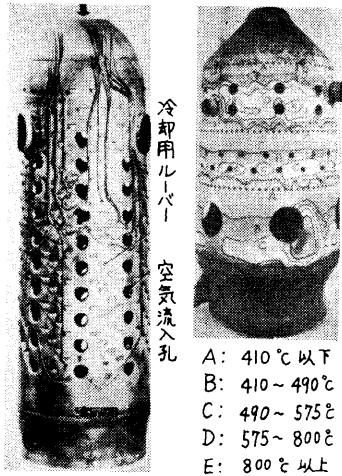
ることが望ましい。不均一の程度は通常、(11)式<sup>59)</sup>またはその逆数で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= (T_{2, \max} - T_2) / (T_2 - T_1) \\ \sigma_L &= (T_2 - T_{2, \min}) / (T_2 - T_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$T_{2, \max}$  ( $T_{2, \min}$ ): 出口における最高 (最低) ガス温度。

3.1.4 内筒壁温

内筒の耐久性の点から、これが低くかつ時間的および場所的变化の少ないことが望ましい。その測定には、熱電対や測温塗料 (別名、示温塗料) が用いられ、熱



a. 熱電対による測定要領<sup>60)</sup> b. 測温塗料による測定例<sup>61)</sup>

図 32 内筒壁温の測定

電対による測定要領<sup>60)</sup>および測温塗料による測定例<sup>61)</sup>を、図32に示す。

3.2 ガス分析の応用例

3.2.1 試料ガス採取器その他

図33は、Hibbard 氏<sup>62)</sup>が内筒最大径 7.5" のターボジェット用燃焼器について、出口および燃焼領域から試料ガスを採取するのに用いたもので、その軸を燃焼器中心線に合わせてとりつけ、左右交互に1回転づつ

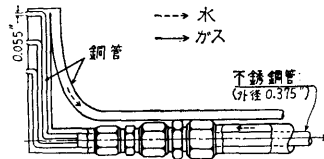


図 33 試料ガス採取器 (Hibbard)<sup>62)</sup>

廻しながら (18回/分) 採取する。三つの採取孔は、断面を等面積の三つの円環に分割したとき、それらの中心を通るように配置され、試料ガスの吸引速度は、ガス流速の 1/2~2 倍とした。この際、燃料にケロシン (終点は約 230°C) を用いると sampling 系統に未燃分が凝縮するので、これを避けるためガソリン (沸点約140°C) または Diisopropyl (沸点約58°C) を用い、O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の分析には精密型オルザート、H<sub>2</sub>、CO、炭化水素には Combustion train system を用いた。

一般に燃焼領域では、ガスの速度と温度が場所によって異なり、更に油粒などが存在する場合にはとくにそうであるが、正しい試料を採取することが難しい。このような条件下では、採取孔を流れに正対させ、それと等速度で採取することが必要であり<sup>63)</sup>、図34は、等

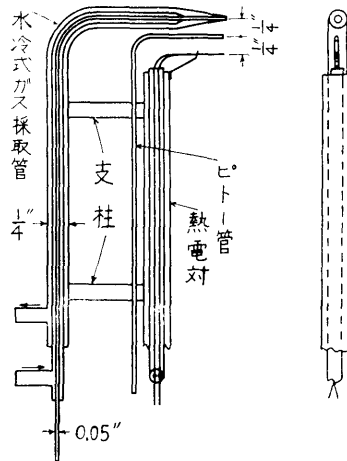


図 34 試料ガス採取器〔組み合わせ型〕<sup>64)</sup>

速採取に便なるよう、採取管を熱電対および全圧管と組み合わせた構造例<sup>64)</sup>である。

なお試料採取管は、管内における試料ガスの組成変化を防ぐためこれを冷却することを要し、他面、流れを乱さないよう小型であることが望ましい。図 34 では冷却水を還流式としているが、Holderness ら<sup>63)</sup>や Wykoff ら<sup>65)</sup>は、これを一方向流として小型化を図っている。後者のそれは外径 1/8" で、採取器の移動や試料瓶との接続、試料採取などの操作をすべて自動化し、燃焼器内の 8 箇所からの試料採取が連続して行えるようにしてある。

3.2.2 燃焼効率の測定

出口ガスを分析し未燃分の発熱量を  $Q_R$  とすれば、燃焼効率  $\eta_b$  は (12) 式で与えられる。

$$\eta_b = 1 - Q_R / (w_f \cdot H_u) \dots\dots\dots (12)$$

Toone ら<sup>53)</sup>は、内筒直径約 4" の噴霧型燃焼器 (ケロシン使用) について、燃焼効率と未燃分の組成との関係を調べるとともに、ガス分析法の精度を検討した。

図 35 は前者の関係を表わしたもので、例えば  $\eta_b = 90\%$  の場合の効率の低下 10% は、未燃燃料による分 5%、CO による分約 4% および未燃水素による分約 1% から成ることを示し、効率の低下は、 $\eta_b > 98.5\%$  では CO により、 $\eta_b < 98.5\%$  では主として未燃燃料によつておこることがわかる。

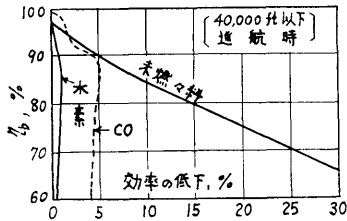


図 35 燃焼効率と未燃分との関係<sup>53)</sup>

また後者については、空燃比が 60 のときのガス分析法による測定精度は、 $\eta_b = 99\%$  で  $\pm 0.1\%$ 、 $\eta_b = 93\%$  では  $\pm 0.3\%$  であるという。なお、これらの研究におけるガス分析は、CO と CO<sub>2</sub> には infra-red analyser を、また H<sub>2</sub> には Differential Katherometer を用いて行ない、未燃燃料は炉で酸化したときの CO<sub>2</sub> の全量から求めた。

Hibbard ら<sup>62)</sup>は、heat balance 法 ((7) 式) とガス分析法との比較実験および両者の長短比較を行い、ガス分析法の長所は、燃焼効率が高いときには精度が高く、熱電対が使えないような高温の場合にも適用でき、

反応速度を制限する過程が未燃分の組成からある程度判断できること、短所は、試料ガスの採取が面倒、未燃分の凝縮による精度低下がおり易い、未燃分の定量が難しく、出口温度分布が得られないことである、としている。

3.2.3 燃焼領域におけるガス温の測定

燃焼領域内には部分的にかなり高温の領域もあり、ガス温の測定が一般に難しい。

高温ガスの温度測定用には  $W-26\%Re \cdot Ta$  その他の熱電対や sonic-flow-orifice temperature probe などもあるが、Toone ら<sup>53)</sup>によれば、ガス分析法が適しているといわれる。これは、試料ガスの組成から局所空燃比と局所燃焼効率を求め、これと、その空燃比における平衡火炎温度とから局所ガス温を算定するもので、Clarke ら<sup>41)</sup>は、プロパンガスおよびケロシンを燃焼したときの一次燃焼領域における局所ガス温を、この方法で求めた。

3.2.4 冷間試験による出口温度分布の推定

Clarke ら<sup>41)</sup>は、等温下での通水および通気試験により、燃焼時の出口ガス温度分布を推定することを試みた。

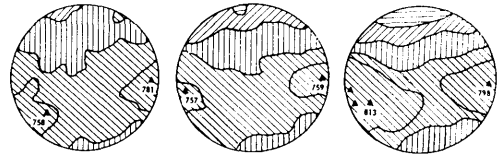


図 36 出口温度分布の比較 (Clarke)<sup>41)</sup>

一例をあげると、前掲図22の燃焼器に通気するとともに総空燃比60でプロパンガスを噴射して、出口における空燃比の分布を求め、それぞれの局所空燃比で完全燃焼したとして、図36 a の温度分布を得た。図 b, c は、総空燃比を通気時と同じく 60 とし、同一燃焼器でそれぞれプロパンガスおよびケロシンを燃焼したときの実測温度分布で、等温線の模様その他が図 a とかなりよく合っている。

他の燃焼器でもこの程度的一致が得られれば、本法は燃焼器の開発試験に有用であろう。

付 記

日本機械学会では、燃焼状態および燃焼機構を明確に把握するにはその正確な測定を行うことが必要であると、第210回講習会 (燃焼の計測, 昭39-4-20. 21)



を開催した。本文は、筆者が同講習会で標記についてのべるに当つて作製した教材に一部補足したものである。

ガスタービンにおける燃焼に関する計測上の主な項目には、本文でのべたものほかに、高温ガスの温度、流体の圧力、流量、流速の測定およびガス分析などがあるが、化石燃料を使用する熱機関に共通なこれらの測定法については、同講習会でそれぞれ専門別にのべられているので、本文では、標記に関連した特徴のある二、三の測定法をあげるにとどめた。

本文はこのような内容のものであるが、ガスタービン用燃焼器のほかボイラその他の燃焼装置の実験的研究や、より一般的には煙霧質の計測などに際し、多少の参考になれば幸いである。

なお、教材の準備に当つては、図表の作製に佐藤誠四郎、熊倉孝尚両技官および柴田良治君（現在、日本クラウンコルプ(株)勤務）の労を煩わした。ここに記して謝意を表わす。

## 参 考 文 献

- 1) 棚沢, 燃料噴射論〔大井上ほか4, ディーゼル機関 I (熱機関体系 6), 山海堂, 昭和31年, 41頁~142頁。
- 2) 棚沢, スプレイ・テクノロジー, 機械学会誌, 66巻531号 (昭和38年), 542頁~548頁。
- 3) 棚沢, 液体噴霧粒群の大きさの表わしかた (1~5), 機械の研究, 15巻(昭和38年)4号, 505頁~511頁; 同6号, 759頁~764頁; 同10号, 1245頁~1250頁; 同11号, 1385頁~1391頁; 同12号, 1515頁~1522頁。
- 4) 一色, 液体燃料噴霧の測定法, 機械学会第144回講習会教材 (昭和36年1月), 13頁~26頁。
- 5) Giffen, E. & Muraszew, A., *The atomisation of liquid fuels*, Chapman & Hall Ltd., 1953, pp. 203~234.
- 6) 棚沢, 微小液滴の大きさの測定について, 機械および電気, 2巻2号 (昭和12年), 337頁~344頁。
- 7) Rupe, J.H., A technique for the investigation of spray characteristics of constant flow nozzles, *3rd Symposium on Combustion*, Williams & Wilkins Co., 1949, pp. 680~694.
- 8) 根矢, 噴霧特性の測定法, 燃料協会にて発表, 昭和36年6月。
- 9) Tate, R.W., Immersion sampling of spray droplets, *J. amer. Inst. chem. Engr.*, Vol. 7, No. 4, (1961), pp. 574~577.
- 10) 倉林, 回転噴孔による液体の微粒化 (第2報), 機械学会論文集, 25巻160号 (昭和34年), 1259頁~1265頁。
- 11) 根矢, 任意の種類および状態の周囲気体内での噴霧特性測定法, 機械学会第708回講演会前刷集 (昭和38年), 35頁~38頁。
- 12) May, K.R., The cascade impactor — an instrument for sampling coarse aerosols, *J. Sci. Instr.*, Vol. 22 (1945), pp. 187~195.
- 13) 丸山, 浜, 酸化マグネシウム煙による霧粒の測定法, 気象集誌, 32巻5・6号 (昭和29年), 167頁~174頁。
- 14) May, K.R., The measurement of airborne droplets by the magnesium oxide method, *J. Sci. Instr.*, Vol. 27, No. 5 (1950), pp. 128~130.
- 15) Bitron, M.D., Atomization of liquids by supersonic air jets, *IEC*, Vol. 47, No. 1 (1955), pp. 23~28.
- 16) 根矢, 杉本, 2次元噴射弁の研究 (第3報), 運輸技研報告, 10巻8号 (昭和35年), 1頁~9頁。
- 17) Golovin, M.N. & Putnam, A.A., Inertial impaction on single elements, *IEC (fundamentals)*, Vol. 1, No. 4 (1962), pp. 264~273.
- 18) York, J.L. & Stubbs, H.E., Photographic analysis of sprays, *Trans. ASME*, Vol. 74 (1952), pp. 1157~1162.
- 19) De Corso, S.M., Effect of ambient and fuel pressure on spray drop size, *Trans. ASME*, Vol. 82, Series A, No. 1 (1960), pp. 10~18.
- 20) Kling, R., Mikrofotografische Untersuchungen von Brennstoffnebeln in Brennkammern, *BWK*, Bd. 10, Nr. 6 (1958), S. 257~S. 263.
- 21) Dell, H.A., Hobbs, D.S. & Richards, M.S., An automatic particle counter and sizer, *Philips Tech. Rev.*, Vol. 21, No. 9 (1960), pp. 253~267.
- 22) Joyce, J.R., The wax method of spray particle size measurement, *Shell Tech. Report*, No. ICT/7, 1946.
- 23) 棚沢, 広安, 熔けた「ろう」による噴霧の粒度分布測定法, 機械学会論文集, 26巻162号 (昭和

- 35年), 224頁~232頁。
- 24) 北岡, 溶けた「ろう」による噴霧の粒径測定, 三井造船技報, 23号(昭和33年), 33頁~39頁。
- 25) 前沢, 斎藤ほか, 二流体噴霧器の噴霧特性の一考察, 機械学会第39期総会講演会前刷集(昭和37年), 13頁~16頁。
- 26) 広安, 棚沢, 沈降塔による液体噴霧の粒度分布測定法, 機械学会論文集, 29巻198号(昭和38年), 377頁~385頁。
- 27) Taylor, E.H. & Harmon, D.B., Measuring drop sizes in sprays, *IEC*, Vol. 46, No. 7 (1954), pp. 1455~1457.
- 28) Eisenklam, P., Atomisation of liquid fuel for combustion, *J. Inst. Fuel*, Vol. 34, No. 243 (1961), pp. 130~143.
- 29) Ranz, W.E. & Hofelt, C., Mist and dust collection equipment, *Industrial Wastes*, Sept., 1959, pp. 146~151.
- 30) Michell, R.I. & Pilcher, J.M., Improved cascade impactor for measuring aerosol particle sizes in air pollutants, commercial aerosols and cigarette smoke, *IEC*, Vol. 51, No. 9 (1959), pp. 1039~1042.
- 31) Binark, H. & Ranz, W.E., Quick method for measuring drop size of hollow cone sprays, *IEC*, Vol. 51, No. 5 (1959), pp. 701~702.
- 32) Poulston, B.V. & Winter, E.F., Techniques for the study of air flow and fuel droplet distribution in combustion systems, *6th Symposium on Combustion*, Reinhold Pub. Corp., 1957, pp. 833~842.
- 33) De Corso, S.M. & Kemeny, G.A., Effect of ambient and fuel pressure on nozzle spray angle, *Trans. ASME*, Vol. 79 (1957), pp. 607~615.
- 34) 根矢, 液体燃料供給装置 [八田・浅沼編, 内燃機関ハンドブック, 朝倉書店, 昭和35年, 773頁~783頁]
- 35) Tate, R.W., Spray patternation, *IEC*, Vol. 52, No. 10 (1960), pp. 49A~53A; *i-bid.*, Vol. 53, No. 4 (1961), pp. 65A & 66A.
- 36) 根矢, 佐藤, 柴田, 渦巻噴射弁の噴霧特性に及ぼす周囲気体圧力および噴射圧力降下の影響, 第2回船舶技研研究発表会前刷集(昭和39年), 33, 34頁。
- 37) 浜部, 燃焼室内ガス流れの模型試験法, 機械学会誌, 65巻517号(昭和37年), 241頁~249頁。
- 38) Winter, E. F., Flow visualization techniques [Ducarme, J. et al., *Progress in combustion science and technology*, Vol. 1, Pergamon Press, 1960, pp. 1~36.]
- 39) Way, S., Combustion in the turbojet engine, *AGARD Selected combustion problems (II)*, Butterworths Sci. Pub., 1956, pp. 296~327.
- 40) Nicholson, H.M. & Field, J.P., Some experimental techniques for the investigation of the mechanism of flame stabilization in the wakes of bluff bodies, *3rd Symposium on Combustion*, Williams & Wilkins Co., 1949, pp. 44~68.
- 41) Clarke, A.E., Gerrard, A.J. & Holliday, L.A., Some experiences in gas turbine combustion chamber practice using water flow visualization techniques, *9th Symposium on Combustion*, Academic Press, 1963, pp. 878~891.
- 42) Clarke, J.S., The relation of specific heat release to pressure drop in aero-gas-turbine combustion chambers, *Proc. Joint conference on combustion (IME & ASME)*, Inst. Mech. Engrs., 1955, Section V (Gas turbine), pp. 24~31.
- 43) Johnstone, R.E. & Thring, M.W., *Pilot plants, models, and scale-up methods in chem. engng.*, Mc Graw-Hill, 1957.
- 44) Spalding, D.B., The art of partial modeling, *9th Symposium on Combustion*, Academic Press, 1963, pp. 833~843.
- 45) Winter, E. F. & Deterding, J.H., Apparatus and techniques for the application of a water flow system to the study of aerodynamic systems, *Brit. J. appl. Phys.*, Vol. 7 (1956), pp. 247~260.
- 46) Morris, R. E. & Haythornthwaite, B., Water flow analogues for gas dynamics, *Engineering*, Vol. 190, No. 4922 (1960), pp. 261~263.
- 47) Thring, M.W., *Discussion on* "Putnam, A. A. & Ungar, E.W., Basic principles of combustion-model research, *Trans. ASME*, Vol. 81, Series

- A, No. 4 (1959), pp. 383~388".
- 48) Watson, E. A., Fuel control and burning in aero-gas-turbine engines, *Chartered Mech. Engr.*, Feb. 1956, pp. 91~127.
  - 49) 根矢, 熊倉, 小型ガスタービン用噴霧式エルボ型燃焼器の研究(第3報), 第2回船舶技研研究発表会前刷集(昭和39年), 36頁~37頁。
  - 50) Olson, W.T., Childs, J. H. & Jonash, E.R., The combustion efficiency problem of the turbojet at high altitude, *Trans. ASME*, Vol. 77, No. 5 (1955), pp. 605~615.
  - 51) Ramshorn, R., Sehr kleine Sonden für Strömungsmessungen, *VDI*, Bd. 101, Nr. 20 (1959), S. 832~S. 834.
  - 52) Bryer, D.W., Walshe, D.E. & Garner, H.C., Pressure probes selected for three-dimensional flow measurement, *ARC, R & M* No. 3037, 1958.
  - 53) Toone, B. & Arkless, F., The application of gas analysis to combustion chamber development, *7th Symposium on Combustion*, Butterworths Sci. Pub., 1959, pp. 929~937.
  - 54) Patterson, R.C. & Abrahamsen, R. F., Flow modeling of furnaces and ducts, *ASME paper* No. 61-WA-45, 1961.
  - 55) 西野, 逆流式環状燃焼室の研究, 機械の研究, 13巻9号(昭和36年), 1179頁~1182頁。
  - 56) Clarke, J. S. & Jackson, S. R., General considerations in the design of combustion chambers for aircraft and industrial gas turbines, *SAE Autom. Engng. Congress* (Jan. 1962), *paper* No. 444A.
  - 57) Stewart, P. J., Combustion efficiency in gas turbine engines, *Platinum metals Rev.*, Vol. 6, No. 4 (1962), pp. 126~129.
  - 58) 棚沢, 高玉, 燃焼器の特性とその測定法, 機械の研究, 6巻1号(昭和29年), 93頁~98頁。
  - 59) 須之部, 根矢, 木村, ガスタービン用重油燃焼器の実験的研究, 運輸技研報告, 1巻9・10号(昭和26年), 1頁~8頁。
  - 60) Chiarito, P.T., Morgan, W.C. & Morse, C.R., Experimental determination of the temperature and dynamic-strain environment of a tubular combustor liner in a turbojet engine, *NASA TN D-204*, 1960.
  - 61) Clarke, J.S. & Lardge, H.E., The performance and reliability of aero-gas-turbine combustion chambers, *Trans. ASME*, Vol. 80, No. 8 (1958), pp. 1741~1755.
  - 62) Hibbard, R.R. & Evans, A., Application of gas analysis to combustor research, *NASA Memo* 1-26-59E, 1959.
  - 63) Holderness, F.H. & Macfarlane, J.J., The continuous flow instrumental analysis of flame gases, *7th Symposium on Combustion*, Butterworths Sci. Pub., 1959, pp. 923~928.
  - 64) Hottel, H.C. & Williams, G. C., Experimental techniques [Hawthorne, W.R. & Olson, W.T., *Design and performance of gas turbine power plants (High speed aerodynamics and jet propulsion*, Vol. XI), Princeton Univ. Press, 1960, pp. 44~91].
  - 65) Wykoff, W.R., Zelinski, W.H., Davis, S. M. & Reid, W.T., The automatic sampling of gases at high temperatures and pressures, *3rd Symposium on Combustion*, Williams & Wilkins Co., 1949, pp. 674~679.