

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 航空エンジン用排煙濃度測定装置の開発

岩澤 利幸, 山田 秀志, 牧田 光正, 山本 武

2009年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

概要	1
1. はじめに	1
2. 装置概要	1
3. 装置詳細	3
3-1 排煙採取機構	3
3-1-1 フィルタホルダ	3
3-1-2 フィルタペーパー	4
3-1-3 配管及びフィルタペーパーの温度管理	4
3-1-4 バルブ	7
3-1-5 質量流量計	7
3-1-6 サンプリングポンプ	8
3-1-7 インフローライン、及びサンプリングライン	8
3-2 排煙濃度測定機構	9
3-2-1 反射率測定条件	9
3-2-2 光源装置	9
3-2-3 反射率測定用光センサ	10
3-2-4 反射率の校正	10
3-2-5 バッキングプレート	11
3-3 装置の制御系	11
3-3-1 測定器用制御器	11
3-3-2 制御系の概要	11
4. 測定手順	13
4-1 測定前自己診断チェック	13
4-1-1 フィルタシステムリークチェック	13
4-1-2 サンプルラインリークチェック	13
4-1-3 システムクリーンチェック	13
4-2 サンプリング測定手順	15
4-2-1 測定準備	15
4-2-2 サンプリング量と測定回数	15
4-2-3 測定手順	15
4-2-4 SN'の定義、W/A の計算、SN の決定	16
4-2-5 特定の排煙サンプリング量 W/A 値での SN 評価	16
5. 計測例と考察	17
5-1 計測例	17
5-2 考察1：計測範囲	17
5-3 考察2：計測時間と計測誤差	17
6. まとめと今後の展望、展開	18
6-1 まとめ	18
6-2 排煙濃度計測の現状と今後の展望	18
謝辞	18
参考文献	18
付録	
付録1. 排煙濃度計測のジェットエンジンへの適用例	19
付録2. サンプリングプローブ	20

# 航空エンジン用排煙濃度測定装置の開発\*

岩澤 利幸<sup>\*1</sup>, 山田 秀志<sup>\*1</sup>, 牧田 光正<sup>\*1</sup>, 山本 武<sup>\*1</sup>

## Development of smoke measurement device for aircraft engine exhaust\*

Toshiyuki IWAZAWA<sup>\*1</sup>, Hideshi YAMADA<sup>\*1</sup>,  
Mitsumasa MAKIDA<sup>\*1</sup> and Takeshi YAMAMOTO<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

A measurement device of the exhaust smoke from the aircraft engine was developed by JAXA. The specification of the device and the measurement procedure conform to the ICAO regulations (ARP1179 of SAE), and the device is also enabled to measure in sequence almost automatically. Measurement tests were conducted to sample the smoke from an experimental aircraft combustor.

**Key words:** Smoke measurement, Exhaust gas from gas turbine engine, Aircraft combustor.

### 1. はじめに

近年、航空需要の伸びに伴い、地球温暖化等の環境問題への対応や、エネルギー利用効率を大幅に向上させた低コストエンジンの実用化に向けた技術開発が進められている。また、航空機から排出される排煙や NO<sub>x</sub>、CO、HC のエミッション規制を検討する機関である国際民間航空機関(ICAO<sup>†1</sup>)の航空環境保全委員会(CAEP<sup>†2</sup>)が定めている排出基準も NO<sub>x</sub> については数年ごとに強化されているが、排煙については当初のままである。

排煙濃度の規制は、排気ジェットが目に見えない濃度まで減らすことを目的としており、排煙濃度が等しくても、小型エンジンの場合には排気ノズルの口径が小さいために排煙が見えにくく、大型エンジンの場合には排気ノズルの口径が大きくなるため排煙は見えやすくなる。そのため、大型エンジンには小型エンジンよりも厳しい規制が掛けられている。

これまでの航空エンジン用燃焼器の研究開発における排煙濃度の測定については簡便な Bacharach スモークテスター(オイルバーナ用)等で代用していたが、正式の値を得るには、ICAO の規格に準拠した排煙濃度測定法で行うことが必要である。しかし国内で ICAO に準拠した排煙濃度測定装置を手に入れることは難しく、海外のメーカーでも二十数年前に製作された部品を組立てて出荷する程度のものしかない。また従来の装置ではスモークを採取したフィルタペーパーを取り出し、別途に反射率を測定してスモークナンバー(SN)を求めていた。そこで JAXA では ICAO の規格である SAE ARP1179 Rev C<sup>1)</sup>の規準書に基づき、スモーク採取機能とそのスモークの反射率を測定する機能を一体化させ、自動化計測を可能とした航空エンジン用排煙濃度測定装置を開発した。

### 2. 装置概要

航空エンジンの排煙濃度を測定する本装置(図 1、図 2 参照)は、排ガス中のスモークをフィルタペーパー上に採取し、その反射率を測定する。これをもとに排煙の濃さを示すスモークナンバー(SN)を算出し、表示する機能を有している。

図 3 に本装置の機能構成ブロック図を示す。排気ガスに含まれるスモークをフィルタペーパー上に採取する排煙採取部、採取した排煙の濃度を反射率で測定する排煙濃度測定部、測定した反射率から SN 値を演算する SN 演算部、採取から SN 値演算までの計測制御を自動化し、且つ遠隔制御する機能と SN 値の表示、記憶の機能を有する計測制御部から成る。

これらの排煙採取、濃度測定、SN 値決定の各機能については米国 SAE の ARP(Aerospace Recommended Practice)1179 Rev.C :Aircraft Gas Turbine Engine Exhaust Smoke Measurement の規準書に準拠するものである。

\* 平成 21 年 3 月 2 日受付 (Received 2 March, 2009)

\*1 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム (Clean Engine Team, Aviation Program Group)

† 1 International Civil Aviation Organization

† 2 Committee on Aviation Environmental Protection



図1 航空エンジン用排煙濃度測定装置



(遠隔操作パネル)

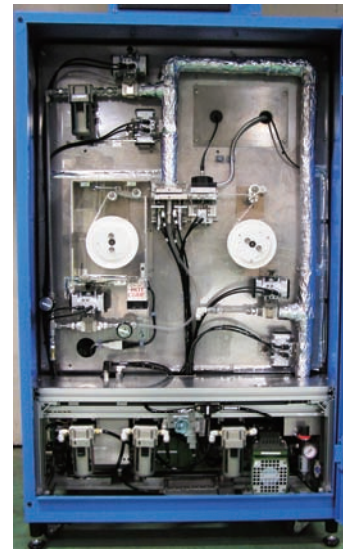


図2 本装置の採取測定機能実装面

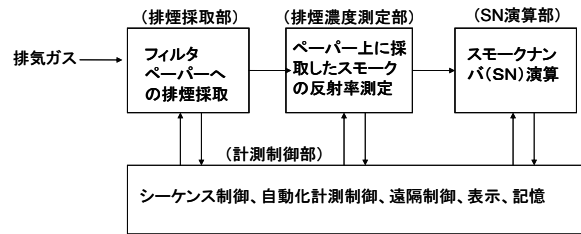


図3 航空エンジン用排煙計測の機能構成ブロック図

図4はARP1179規準書に記載されているサンプリング(排煙採取)システムであり、機能の詳細については4-1、4-2項で説明するが、概略としては、航空エンジンからの排気ガスをサンプリングプローブで採取し、そのうちの一定量の排煙をフィルタホルダに挟んだフィルタペーパーに通し、ペーパー上にスモークとして堆積させるものである。

図4をもとに排煙採取から排煙濃度測定までの連続計測と自動化への対応をした本装置の排煙採取・濃度測定システムを図5に示す。

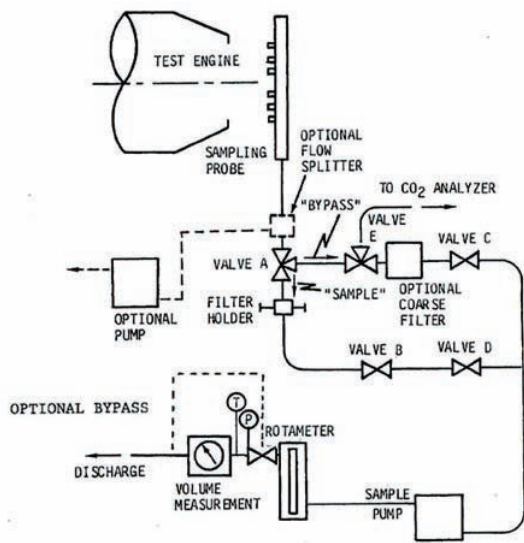


図4 サンプリングシステム図 (ARP1179)

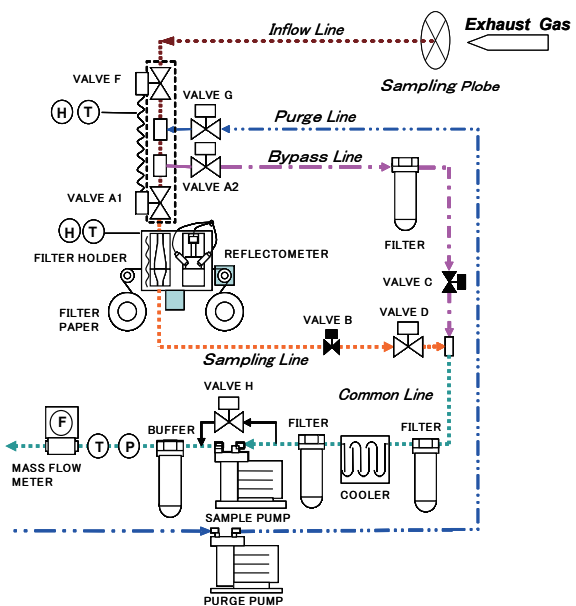


図5 本装置の排煙採取・濃度測定システム図

図5のシステムを配管別に分類すると、排気ガス(排煙)をサンプリングプローブから装置入口まで導入する「インフローライン」、送られてきた排ガスをフィルタペーパーに採取するフィルタホルダを含む「サンプリングライン」、次に非採取時に通過させる「バイパスライン」、両ラインの終端から排気出口までにポンプ、流量計&流量制御器、冷却器等を設け流量制御及び排出ガスの冷却、清浄化を行う「共用ライン」となる。さらに本装置ではインフローライン、サンプリングライン、バイパスライン、共用ラインを外部からの空気でパージする「パージライン」が付加されている。

次に排煙濃度測定の基本動作を図5で説明する。

- ①バイパスライン側を流路としてインフローラインに残っているガスを排出すると共に、これから計測する排ガスを通過させ、共用ラインの各機器に行き渡らせる。
  - ②この間にサンプリングラインにあるフィルタホルダに新しいフィルタペーパーを装着する。
  - ③排煙通路をサンプリングライン側に切り替え、規準書で定められた採取量の排煙を通過させ、フィルタペーパー上にスモークを堆積、採取する。
  - ④再び排煙通路をバイパスライン側に切り替え、スモークを堆積採取したフィルタペーパーを排煙濃度計測部に移動させ、採取サンプルに光を当て、その反射光を検出し反射率を測定する。
  - ⑤この反射率から規準書に基づいて仮スモークナンバー(SN')を算出する。
  - ⑥②～⑤の一連の行程を繰り返し3回以上サンプルを採取し、これらのSN'からスモークナンバーSN値を求める。
- 本装置ではこれらの手順は自動化されており、ボタンを押すだけでSN値が得られるようになっている。

### 3. 装置詳細

本装置はARP1179規準書に準拠し且つ「高速」、「高精度」、「簡単操作」を目的とした航空エンジン用排煙濃度測定装置である。この目的を具現化するために上記規準を遵守し且つ機能を高めた仕様となっている。ここでは本装置の各構成の仕様について、表1に示すようにARP1179規準書と対比しながら説明する。表1に記載されている規準書の内容については図4、本装置の仕様については図5を参照頂きたい。

#### 3-1 排煙採取機構

排煙採取機構は排煙を取り入れる装置入口から排煙を採取するフィルタホルダ、さらに流量計を経て装置出口までの排煙が通過する経路で構成される。

##### 3-1-1 フィルタホルダ

ARP1179規準書にはフィルタホルダについて次のような規定がある。(以後ARP1179規準書の内容を四角で囲んで示す。)

- ①形状：図6参照、(スポット径D：19.0～37.5mm)
- ②フィルタペーパーをしっかりと挟み込む。フィルタシステムリークチェックでのリーク量は5.0L/5min.以下。
- ③材質：耐食性且つ非帯電性

本装置でのフィルタホルダのスポット径の選定では、排煙採取時間を短くすることを優先した。排煙採取時間はフィルタホルダスポット径が小さくなるほど短くなるので、上記スポット径範囲のうち最小に近い20.0mmとした。

尚、スポット径を小さくしたために次のような事項に留意した。

単位時間にホルダ内を通過する流量が規定されているため、スポット径を通過する流速はスポット径の2乗に逆比例する。それ故、スポット径を小さくするほど高流速となる。

一方、フィルタに均一に堆積させるためにフィルタホルダ内の排煙の流れは、高速でも渦流等の乱れが起きないようにする必要があり、そのためフィルタホルダより上流の配管は継ぎ目での段差を極力少なくし、バルブもストレートに流れるものを使用した。

また図7に示すフィルタホルダ開閉機構では、リークを減少させるために次のような工夫を施した。

- ①リーク量軽減のためにフィルタペーパーを挟む上下のホルダに同心円状の平板ゴムを貼り付け、一方のホルダから加圧し、面で加圧接触させた。
- ②ホルダ開閉機構としてホルダへの強力な加圧を実現しランプ力を強化するため、また紙送りを短時間で行うために0.5秒以下でホルダを開閉できる空気圧シリンダーを採用し、且つ下部ホルダの両側から押し上げる構造とした。その結果フィルタシステムのリーク量は3.5L/5min. 以下となり、規準値5.0L/5min.をクリアすることが出来た。

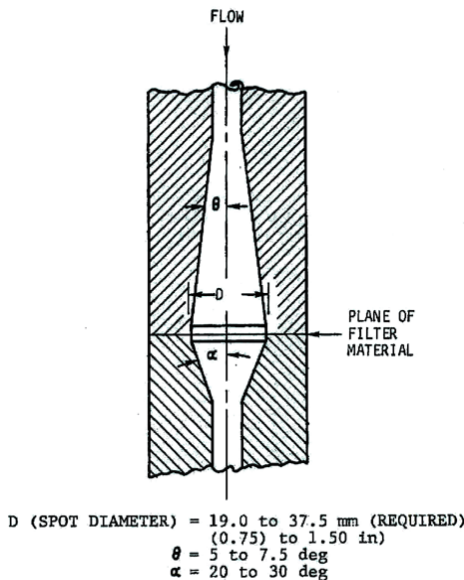


図6 フィルタホルダの形状

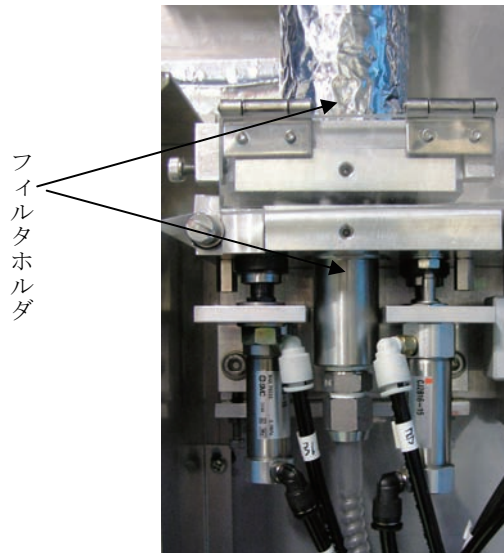


図7 フィルタホルダとホルダ開閉機構

### 3-1-2 フィルタペーパー

フィルタペーパーは WHATMAN NO.4 を使用のこと。

本装置では、自動連続計測のためロールタイプを採用し、WHATMAN NO.4 のフィルタペーパーを次のような仕様で特注し、図8のようなフィルタペーパーを使用している。

ロール幅：40mm

ロール長：100m

WHATMAN NO.4 フィルタペーパーの

粒子保持能は 20~25 $\mu$ m

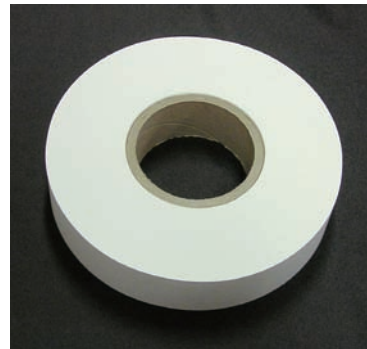


図8 ロールタイプのフィルタペーパー

### 3-1-3 配管及びフィルタペーパーの温度管理

プローブからフィルタペーパーまでの配管温度は 60~175 $^{\circ}$ C の間に保持し、測定中は配管温度の変動は $\pm 15^{\circ}$ C 以内に維持すること。

図9に示すように本装置の内部では配管近傍に設置されている電気部品の動作温度範囲を考慮して、排煙ガス取り入れ口からフィルタペーパーまでの配管温度を 60 $^{\circ}$ C とした。配管に発熱体を巻きつけその上から断熱材で覆い温度センサを付け変動幅 $\pm 1^{\circ}$ C 以内で温度をコントロールをしている。

またフィルタペーパーも、常温保存では採取時に排煙ガス温度との差が大きいため、湿気を多く含むガスを採取した場合は結露の原因となり、フィルタペーパー上への均一な付着を妨げる要因となるため、図10に示すように給紙側をボックスで囲み、ヒータ付きブローと温度センサを設け、設定温度に維持するようにボックス内に温風を送り込んでいる。

表1 SAE ARP 1179 規準書と航空エンジン用排煙濃度測定装置 仕様との対比

項目	SAE ARP 1179 規準書内容	航空エンジン用排煙濃度測定装置の仕様	本文参照
排煙採取	採取(サンプリング)法 フィルタホルダ スポット径:D スポット面積:A	フィルタホルダにフィルタ紙を採み所定排煙量を通過させフィルタ紙上に堆積させる。詳細は本文4-2項参照 D=19.0mm~37.5mm(図6参照) A=π(D/2) <sup>2</sup>	同左 4-2項
	スモーク流量 採取スモーク量:W/A	14.0±0.5L/min. (15°C, 101.32kPa) 単一サンプリング値モード測定時: W/A=16.2±0.7kg/m <sup>3</sup> 多サンプリング値モード測定時: W/A=12.0~21.0kg/m <sup>3</sup> 3回測定のとぎ1回はW/A=16.2kg/m <sup>3</sup> 以下の値で採取	D=20.0mm A=100πmm <sup>2</sup> 14.0L/min. (15°C, 101.32kPa) 単一サンプリング値モード測定時: W/A=16.2kg/m <sup>3</sup> 同左 同左 W/A=16.2kg/m <sup>3</sup> の時T= 0.056529868 A =17.760秒 4-2項
	採取時間:T	Whatman NO.4 filter paper	同左 3-1-2項
反射率測定	測定法	ANSI PH 2.17 記載の 環状45度、0度光学反射測定 (反射率)	同左 3-2-1項
	反射率計 光源 照射光ビーム径 光センサ 光センサのフィルタ特性	フィルタ上の照射光ビーム径: 0.1D~0.5D D: フィルタホルダ径 反射率計のセンサフィルタはASTM E 308とCIE standardsで定義545nmの(中心)ピーク波長透過性を持ち、100nmの半値幅(FWHM)を持つ3刺激値線フィルタ (green tristimulus filter)。 反射率校正用に反射率が約75~85%の無彩色の中間色の基準板を用いる。この1枚の反射率基準板で校正する。基準板は2年ごとに点検。 絶対反射率が3%以下の黒	ハロゲンランプを光源とするリングライト フィルタ上の照射光ビーム径: 8mm D=20mm Siフォトダイオード 同左 CIE standardsでピーク波長: 550nm 半値幅: 約110nm 同左 3-2-2項 3-2-3項
	バックング材		反射率3%程度(低明度)と90%程度(高明度)の無彩色の中間色基準板を用いる。これら2枚の反射率基準板で校正する。1~6ヶ月毎に市販の反射率濃度計で点検し、反射率を更新する。 バックングプレートの絶対反射率: 1.5%
SN値算出	SNの算出 W/Aの算出 SN値の特定	SN' = 100[1-Rs/Rw] 0~100 (high density) 採取した体積よりSample Mass: W/A=3.483PV/AT (kg/m <sup>3</sup> )を算出 W/A=16.2kg/m <sup>3</sup> でのSN' 単一サンプリング値モード測定時: 3サンプリングのSN'の平均値 ±3SN以内に取りまるまで測定を繰り返す 多値サンプリング値モード測定時: 全サンプリングのSN'の最小2乗法による値	同左 質量流量計の積算値より算出(採取時間に換算) 同左 同左 同左 同左 熱式質量流量計(マスフローメータ)&マスフローコントローラ 3-1-5項
流量計	測定方式	ロータメータ又は同等品	同左
	測定精度	±5% 流量計と積算計を別々に設置する場合 ±2% 積算計を使わず流量計からとめる場合	マスフローメータ& マスフローコントローラとして フルスケール流量: 30L(0°C, 1013hPa) 流量測定、制御範囲: 0.6~30L/min. 精度: ±0.3L以内 (±1%以内) 応答性: 1秒以内 設定標準流量: 14.0L/min. (15°C, 101.32kPa) 3-1-6項
積算流量計	測定方式	サンプリングの測定用として乾式または乾式正変位計を使用。 乾式形を使う場合はフィルタホルダと真空ポンプの間に設置。 ±2%	同左
	測定精度	変位計または積算流量計の直ぐ上流で圧力と温度を計る。	同左
バルブ	材質 バルブ-A	耐食材かつ非帯電材 速い動作、全開-全閉動作で「Close」、「Sample」、「Bypass」の位置を持った流れ切替バルブ。 お互いが独立して動くことができ、2つのバルブで構成されている。 システムフローレイトを確立するために用いるスロットバルブ フィルタホルダと分離させるために用いるシャットオフバルブ。 流れ切替バルブ。排ガス分析に使用しない場合は不要。	ステンレス。アクチュエータ: アルミ 同左、空気圧作動型ボールバルブを使用。 同時に動作する2個の空気圧作動型ボールバルブV-A1、V-A2で構成。 マスフローコントローラを用いるので必要ないが保守点検に使用。 同左、バルブ-Aで使用の空気圧作動型ボールバルブを使用。 設置していない。 3-1-4項
ポンプ	吸引(真空)能力 流量	25kPa以下 28L/min. 以上 (15°C, 101.32kPa)	同左 19.9kPa 40L/min. (15°C, 101.32kPa) 3-1-6項
温度計	温度計測定精度	±2°C以内	同左 3-1-5項
圧力計	圧力計測定精度	±0.2%以内(絶対圧値に対し)	同左 3-1-5項
サンプリング プローブ	材質 サンプリング箇所、面積 圧力降下	ステンレス 抽出点: 12箇所、ガス排出部全面積の50%以下 80%以上(20%以下の圧力)	同左 同左 同左 同左 付録-2項
サンプリング 配管	配管材 サンプリングライン内径、長さ	ステンレス、銅又はカーボン入りPTFE (帯電、蓄電されないこと) 内径: 4.0~8.5mm、長さ: 25m以下、4回以下の折り曲げ	ステンレス 内径: 8mm 3-1-7項
自己診断	反射率計の校正 フィルタシステムリークチェック サンプリングラインリークチェック システムクリーンチェック	POWER ON後に行うスモークメータの機能確認。 反射率75~85%の基準板で校正する。 5.0L/5min.以上の時は測定操作は不可とする。 2.0L/5min.以上の時は測定操作は不可とする。 SN'=3以上では測定操作は不可とする。配管、部品の清掃、取替えを要す。 60~175°C の内の定めた温度T 測定中はT±15°Cに保つ	同左 反射率約90%の高明度と約3%の低明度の基準板で校正。 同左。規定値以上の時は警告を発生し測定操作を不可とする。 同左。規定値以上の時は警告を発生し測定操作を不可とする。 同左。規定値以上の時は警告を発生し測定操作を不可とする。 パーズ操作は可能。 60°C 測定装置内部では60±1°C以内 供給側フィルタペーパーも同様に加温。 同左 操作作用タッチパネル型表示器で入力。 入力情報はメモリーカードに記憶、蓄積。 同左 操作作用タッチパネル型表示器で入力。 各計測毎に測定条件、測定データ、SN値をCSVファイル形式で自動的にメモリーカードに記憶、蓄積。 0~60°C 3-1-3項
加温設定	プローブ~フィルタ紙間の温度 温度変動幅	60~175°C の内の定めた温度T 測定中はT±15°Cに保つ	同左 3-1-3項
情報とデータの記録	情報 計測データ	試験設備、試験日、試験装置、プローブ設置位置、気象状態 飛行機、エンジンの記述: 製造社名、型番号、開始と終了時の環境条件(気圧、A/Wと流量、日時とデータ番号、開始と終了時の環境条件(気圧、エンジン入り口温度/湿度)、燃料流速、燃料名、リーク量と清浄度 採取時の流量、サンプリングラインの温度と長さ、等を記録。	同左 操作作用タッチパネル型表示器で入力。 入力情報はメモリーカードに記憶、蓄積。 同左 操作作用タッチパネル型表示器で入力。 各計測毎に測定条件、測定データ、SN値をCSVファイル形式で自動的にメモリーカードに記憶、蓄積。 0~60°C 900(W)×600(D)×1485(H) (単位:mm) 100VAC 50/60Hz 単一サンプリング値モード/3回(約133秒) 4回(約154秒) 5回(約175秒) 6回(約196秒) 多サンプリング値モード/3回(約131秒) 6回(約194秒) 9回(約257秒) 「自動化計測/マニュアル計測」の両用 「自動化自己診断/マニュアル自己診断」の両用 「遠隔操作/測定装置での直接操作」の両用 (両操作ともタッチパネル型表示器による) 5-3項
	動作温度		
	寸法	900(W)×600(D)×1485(H) (単位:mm)	
	電源	100VAC 50/60Hz	
	測定モード/採取回数(測定時間)		
	計測形態		
	操作形態		



図 9 温度管理された配管

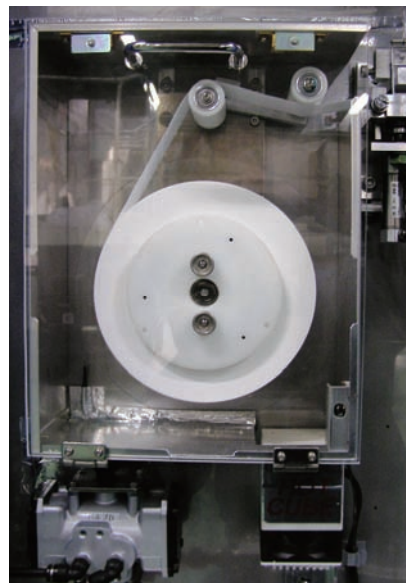


図 10 温度管理されたフィルタペーパーボックス

### 3-1-4 バルブ

- ①材質は耐食性且つ非帯電性であること。
- ②バルブ A：速い動作、全開-全閉動作で「Close」, 「Sample」, 「Bypass」の位置を持った流れ切替バルブ。  
お互いが独立して動くことができないように内部でロックされた2つのバルブで構成されること。
- ③バルブ B,C：流量を確立するために使用するスロットルバルブ
- ④バルブ D：フィルタホルダを分離させるために用いるシャットオフバルブ。
- ⑤バルブ E：流れ切替バルブ。排ガス分析に使用しない場合は不要。

本装置では排ガスをガス分析用に使用しないため、図4におけるバルブ E を省略し、また図4のバルブ A を2個の同時に作動するシャットオフバルブ V-A1、V-A2 で構成した。更に本装置ではマスフローコントローラを使用しているために流量設定用のスロットルバルブのバルブ B,C は不要であるが、メンテナンス時に使用できるように通常全開状態で取り付けてある。

図5において、制御用バルブは V-A1、V-A2、V-D、V-F、V-G、であり、手動バルブは V-B、V-C、V-H である。V-A1 と V-F の制御用バルブで求められる要件は、本文の3-1-1項で述べたように「流路がストレートであること」と、サンプリング精度を高めるために「高速動作が出来ること」である。モータを用いた制御用電動バルブは動作が遅く、電磁バルブは流路がストレートでないか又は障害物があり、渦流発生の原因となるために本装置のバルブとしては不適當である。そこで流路がストレートで障害物がなく、高速動作が可能な「空気圧作動型ボールバルブ」を採用した。(図11参照)

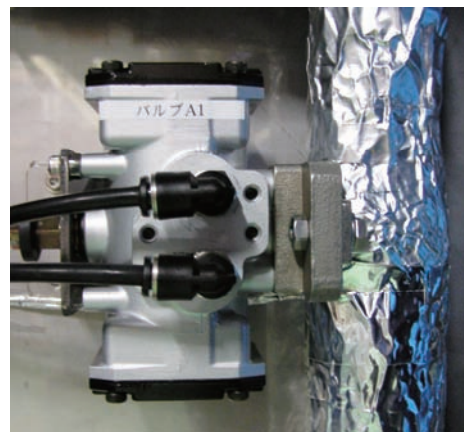


図 11 空気圧式ボールバルブの外観

### 3-1-5 質量流量計

積算流量計の測定精度：	±2%以内	
流量計	：	±5%以内 但し積算用の時 ±2%以内
圧力計	：	±0.2%以内 (絶対圧値に対して)
温度計	：	±0.2℃以内

本装置の測定精度を左右する重要な部品の1つに採取排煙量を計測する流量計、及び積算流量計がある。従来の流量計は体積流量計測値に温度、圧力で補正をする必要があったが、最近半導体技術や微細加工技術の発達により種々



の流量計が開発されている。その中で質量で流量値を計測できる熱式のマスフローコントローラを採用した。これは質量流量測定機能と測定した流量信号をもとに指定した流量に設定できる流量制御機能を備えたものである。測定精度を維持するために図 12 に示すように共用ラインにある流量計の前段に冷却器と複数のフィルタ及びバッファータンクを設け、湿気と汚れと脈流を取り除いている。

マスフローコントローラの流量設定について

排煙採取時のサンプリングレートは  $14.0 \pm 0.5$  L/min.(at 15°C、101.32kPa) とする。

フィルタペーパーを通過する流量が 14.0 L/min.となるよう、マスフローコントローラを設定した。なお流量チェックのため、マスフローコントローラの出口側に温度計、圧力計及び体積型の積算流量計を接続し、マスフローコントローラの設定値が正しいことを確認している。

マスフローコントローラ的主要仕様は次の通りである。

標準流量レンジ：30 L (0°C、1013hPa)      バルブ構造      : ノーマル・クローズ  
 流量制御範囲    : フルスケールの 2~100%      精度                : フルスケールの $\pm 1\%$ 以内

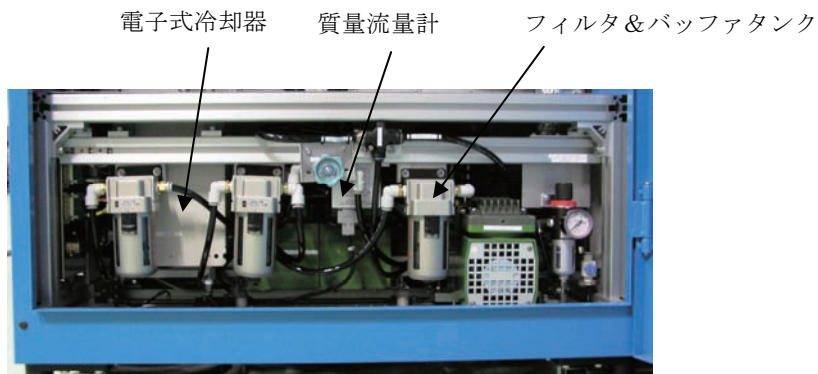


図 12 共用ラインの部品配置

### 3-1-6 サンプリングポンプ

真空能力：25kPa 以下  
 排気流量：28L/min. 以上  
 (15°C、101.32kPa 時)

サンプリングポンプを図 13 に示す。

仕様は次の通りである。

方式：ダイヤフラムタイプ

真空能力：19.9kPa

実行排気速度：40L/min.

なおリークチェック時には 30L/min.で排気している。

また振動を発生するため除震機構を設け、計測に影響を与えないようにしてある。



図 13 ポンプ外観図

### 3-1-7 インフローライン、及びサンプリングライン

インフローライン、及びサンプリングラインとはプローブ出口からフィルタホルダを経由しバイパスラインとの合流点までの配管である。

- ①プローブ出口からフィルタホルダ入り口までの配管では、管径の 10 倍以下の曲率半径の折り曲げは 4 回以下とする。
- ②配管はもつれ、よじれやループがなく真っ直ぐにすること。
- ③フィルタホルダ入り口までの配管内径は 4.0~8.5mm とする。
- ④プローブからの配管長は 25m 以下で最短にし、不要な付属品や亀裂部分のないこと。
- ⑤配管材は微粒子や静電気が帯電、蓄電されないようにステンレス、銅、カーボン入り(接地された)PTFE とする。

本装置の該当配管はステンレス製、内径：8mm、曲げ回数は 3 回とした。

### 3-2 排煙濃度測定機構

図 14 に示す排煙濃度測定機構は、フィルタホルダから送られてきたフィルタペーパーをクランプし、フィルタペーパー上に採取堆積したスモークに光を投射し、その反射光を測定して反射率を求める機能を有する。ここで計測した反射率  $R_s$  と、未使用のクリーンなフィルタペーパーでの反射率  $R_w$  とを比較し、相対反射率  $(R) = R_s / R_w$  を求める。

この反射率の測定精度が本排煙濃度測定装置の精度を左右するため、排煙採取量の正確さと共に反射率測定の正確さが重要となる。

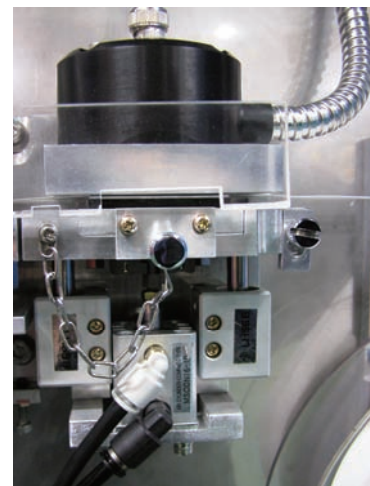


図 14 排煙濃度測定機構

#### 3-2-1 反射率測定条件

反射率を測定する際、投射光と反射測定光の関係は

ANSI PH2.17 記載の環状 45°、0°光学反射測定に準拠すること。

「環状 45°、0°光学反射測定」とは図 15 に示すような入射、反射の構成である。入射光として環状の光を  $45 \pm 5^\circ$  より投射し、その焦点に被測定物であるスモークを堆積させたフィルタペーパーを置き、その反射光を  $\pm 5^\circ$  の円錐形内で受光測定する。但し入射と反射の位置関係がこの逆でも良いとしている。本装置では環状光として特注のリングライトガイドを用い  $45^\circ$  の角度より投射し、 $0^\circ$  の軸上に光センサを設ける構成とした。図 16 の写真は本装置のリングライトガイドからの  $45^\circ$  への投射状態を示す。

サンプリングアパーチャであるフィルタペーパー上の光ビーム径について、

フィルタペーパー上の光ビーム径は  $0.1D \sim 0.5D$  とする。  $D$ : フィルタホルダスポット径

本装置のフィルタホルダスポット径は  $20\text{mm}$  であるから光ビーム径は  $2 \sim 10\text{mm}$  が規定範囲であり、大きいほど平均化された値を計測できる。しかし、光センサの受光面積が小さい場合は光ビーム径をあまり大きくしても効果が小さい。光センサとの関係から本装置ではビーム径を  $8\text{mm}$  とした。

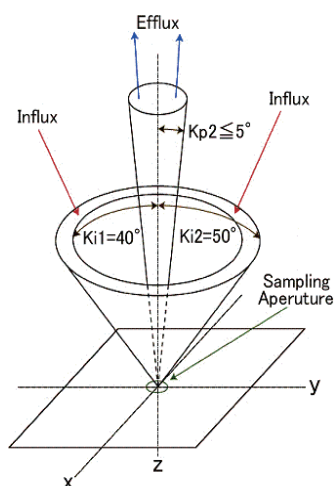


図 15 環状 45°、0°光学反射測定



図 16 本装置のリングライトガイドの 45° 投射

#### 3-2-2 光源装置

正確な反射率を測定するためには諸環境下における投射光量の安定化が必要である。そのためにリングライトガイドの光源として、図 17 に示すように、出力光をモニターすることにより光量を一定に制御する機能を有し、且つ耐高温多湿ランプを備えた装置を採用した。この光源はハロゲンランプと蒸着による多層膜反射鏡から成り、出力波長範囲

が 370～730nm で 480～640nm では比較的平坦に近い特性を持ち、色温度約 4900K である。

また、反射率測定用センサと光源装置のモニタ用光量センサは同一特性の光フィルタを使用し、反射率測定用光量の安定化を図った。

更に光量設定入力のカヒステリシス幅を設定照度の±0.5%に狭め、環境変動によるフィードバック制御感度を向上させた。

仕様

光量：最大 50 万 LUX. 可変範囲は 3～100%



図 17 モニタ機能つき光源装置

### 3-2-3 反射率測定用光センサ

反射率計に用いるフィルタは ASTM E 308 と CIE Standards で定義されているように中心値として 545nm のピーク波長透過性を持ち 100nm の半値幅 (FWHM) を持つ縁の 3 刺激値感度フィルタとする。

本装置では図 18 に示すような CIE 規格に準拠した明度特性 [感度波長範囲：480～660nm、最大感度波長：550nm、半値幅：約 110nm(500～610nm)の 3 刺激値縁フィルタ特性] を備えた光フィルタを用い、この光フィルタを反射率測定用光センサの入射窓に貼り付けた。

また反射率測定器用光センサは、暗電流、温度ドリフト、等を考慮して選定し、次の特性を持つ。

- ・ Si フォトダイオード型
- ・ 暗電流：0.05nA (Max.)
- ・ 温度ドリフト：
  - (センサ単体) -0.007%/°C
  - (at 550nm)
  - (アンプ接続時)-0.016%/°C
  - (15～35°C、4V 出力時)

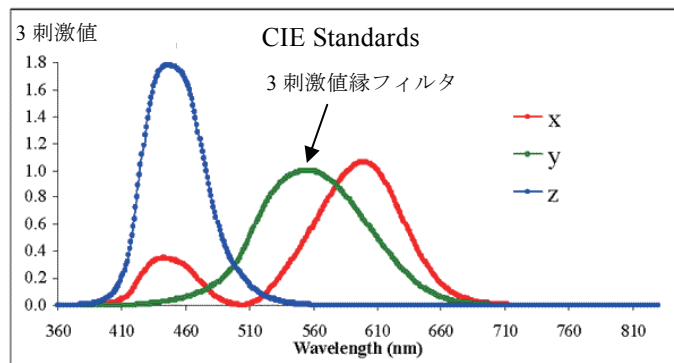


図 18 光フィルター特性<sup>7)</sup>

### 3-2-4 反射率の校正

反射率校正用基準板

米国 NBS(国家基準局)やそれと同等の機関の放射反射率用規準に対応した検証可能な副基準を用い、確かな基準に基づいて校正する。

校正用のタイル(基準板)とは無彩色の中間色であり、x y z 軸の色特性用に校正されるタイルのうち y 軸(明度)に関しはば 75～85%の反射率を持つ。

タイルは 2 年毎に点検すること。

光が過剰に強くない範囲では、反射率(R)とその反射光測定用センサ出力(Y)の間にはリニアな関係が成立し、 $Y=AR+B$  (ここで A, B は定数)の式が成立する。規準書では 1 枚の基準板(タイル)を使用し校正する。つまり上記式において B を固定値と考え、校正することにより A を決定するものである。これは投射光量の変化が少ない場合は対応できるが、環境によりノイズレベルが変動する場合は B が変化するために対応できない。また上記 1 枚の基準板でのセンサ出力と投射光をオフした時のセンサ出力とで定数 A, B を求める方法もあるが投射光をオフすると投射光による迷光等の雑音成分もなくなるので正確な定数 A, B を求めることは出来ない。

一方、市販の反射濃度計では明度の異なる 2 枚の基準板を用いて反射率の直線を決定する。つまり A 値と B 値を決定する方法で校正を行っており、この方法を用いれば光量変化だけでなく環境変化にも対応できるので 1 枚の基準板で校正するより格段に精度が向上する。そのため本装置では図 19 に示すようにこの 2 枚の基準板を用いる方法を採用

した。そして2枚の反射率基準板として Munsell Neutral Value Scale の中から反射率3%程度(低明度)と90%程度(高明度)の無彩色の中間色基準板を用いている。

基準板は汚れが付かないよう注意が必要であり、校正時以外はケースに入れ保管する。

また基準板の点検では使用頻度に応じ1~6ヶ月毎に市販の反射濃度計で点検し、反射率を更新する。

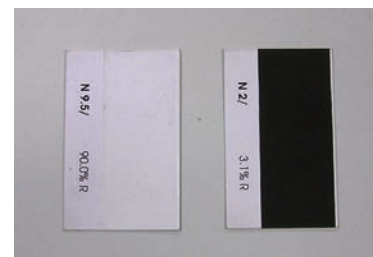


図 19 反射率校正用基準板

### 3-2-5 バックングプレート

バックング材は3%の最大絶対反射率(3%以下の絶対反射率)を持つ黒色体であること。

バックング材とは反射率を測定するときに被測定物であるフィルタペーパーの下に敷く一定の濃度を持つ敷物である。

本装置では図20に示すようにバックングプレートとして1.5%以下の反射率の黒色無光沢塗装アルミ板を採用し、このバックングプレートの下にゴム板のバックング台座を敷く構成とした。これによりシリンダーによるフィルタペーパーのクランプ時の衝撃を緩和し、しかもスモークをトラップしたフィルタペーパーである反射率測定試料と光センサとの間隔を常に一定に保つことができ、信頼性の高い反射率測定が行える。



図 20 バックングプレートと台座

### 3-3 装置の制御系

本装置の制御系は排煙採取と反射濃度測定、スモークナンバー(SN)値の演算、及びこれら一連の制御機能の自動化からなっている。

図21に制御系側の内部写真を示す。

#### 3-3-1 測定器用制御器

計測器に必要な条件は「速く」、「正確に」且つ専門知識や技術を持たなくても「誰でもが簡単に計測できる」ことである。

一般に機器制御を行う場合、制御用ソフトを組み込んだパソコンを使用する場合と、制御専用のプログラム可能なコントローラを用いる場合がある。前者は他の制御用パソコンや制御機器との通信機能が充実していること、後者は制御速度が高く制御機能や使い易さが充実していることが特長である。本装置では計測器としての性能を優先し、通信よりも制御速度と機能及び使い易さを重視して、後者であるコントローラを選定した。

表示・操作パネル

コントローラ

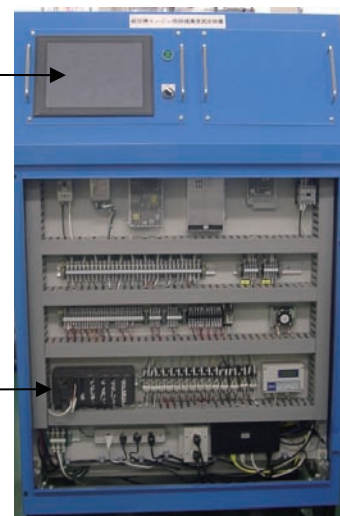


図 21 本装置の制御系実装面

#### 3-3-2 制御系の概要

図22に本装置の制御系統図を示す。

プログラマブルコントローラによるセンシングとアクチュエータ制御で構成される。この制御系は以下の6項目の排煙濃度測定装置の基本機能を有している。

- ①排煙流路をバイパスライン側にしてこれから計測する排煙を一定時間取り込み共通ラインの各機器に行き渡らせる。
- ②この間に、クリーンなフィルタペーパーをホルダ上に移動

- ③流路をサンプルライン側に切り替え、一定量の排煙を正確にフィルタペーパーに採取。
- ④流路を再びバイパスライン側に切り換え、排煙採取したフィルタペーパーを反射濃度測定器へ移動。
- ⑤反射率を測定し SN' を計算。
- ⑥上記②～⑤の動作を繰り返して3回以上 SN' を取得し SN 値を算出。②～⑤の繰り返し動作において②と④はフィルタペーパーの移動という同一動作であり、その後の③と⑤も同時に進行させ、計測時間の短縮を図っている。

そのほか、この制御系は自己診断、操作の自動化、遠隔制御、PID制御による温度制御、データの記憶と蓄積等の機能を持つ。

制御内容の詳細については次項「4. 測定手順」で詳述する。

また本装置の表示・操作用タッチパネルの表示例を図23に示す。

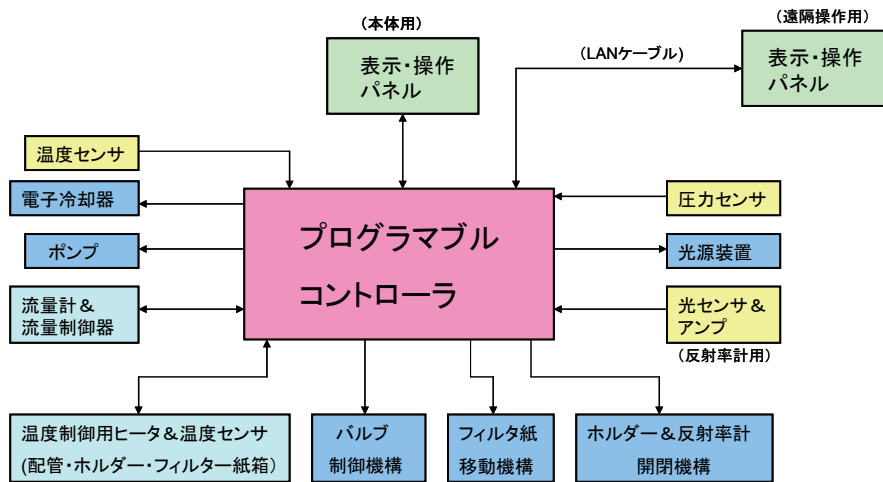


図22 本装置の制御系統図

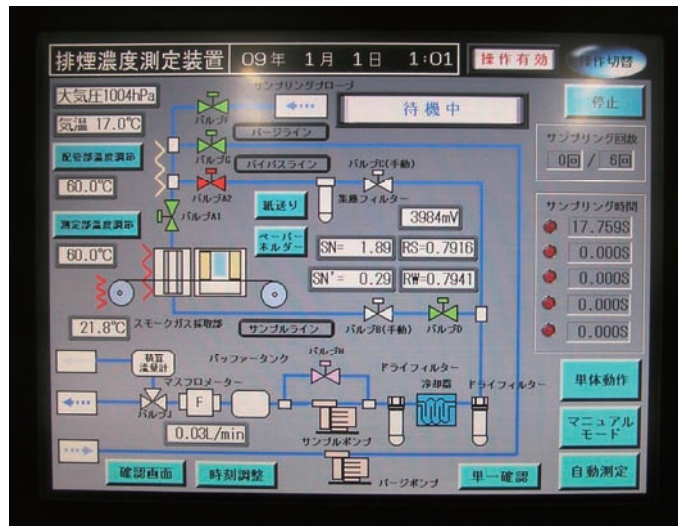


図23 表示・操作用タッチパネルの表示例

#### 4. 測定手順

本項では排煙濃度測定装置の測定時の操作手順ではなく、ARP1179 に準拠した排煙濃度測定の方法、手順について説明する。なお本装置では本文 3-3 項で説明したように、ここで説明する測定方法、手順を全てコントローラにプログラムし、操作項目毎のソフト SW を押すことにより自動的にチェック、及び測定を実行する構成となっている。

図 24 に本装置の自動化された測定動作手順のフロー図を示す。

##### 4-1 測定前自己診断チェック

サンプリング測定前手順として ARP1179 規準書では測定器の自己診断チェックがあり、配管システムのリークチェックである「フィルタシステムリークチェック」、「サンプルラインリークチェック」と配管内のクリーンチェックである「システムクリーンチェック」を行うことが規定されている。またシステムクリーンチェックでは反射率測定を行うため、「反射率計の校正」を事前に行っておく。

次に各チェックについて図 5 をもとに説明する。

##### 4-1-1 フィルタシステムリークチェック

フィルタペーパーを挟んだ状態でのフィルタホルダを含むサンプリングライン、及び共通ラインのリークチェックを行うものであり以下の手順で行う。

- ①クリーンなフィルタペーパーをホルダにクランプする。
- ②ホルダ入力側のバルブ V-A1、V-A2 を共に閉じ他のバルブ (V-B、V-C、V-D) はすべてオープンにする。
- ③ポンプを 1 分間以上 ON にする。システムが安定後 5 分間リークチェックを行う。
- ④積算流量計測を観測、記録する。5 分間の積算流量が 5.0L (15°C、101.32kPa)以下であれば合格。

##### 4-1-2 サンプルラインリークチェック

フィルタホルダ系統以外の配管及び配管に結合されている部品のリークチェックである。

- ①なるべくなら全てのプローブのオリフィスを封印する。あるいはサンプルラインを封印する。
- ②バルブ V-A1 : 閉、V-A2 : 開(この状態を BYPASS と呼ぶ)、他のバルブ V-C : 開、V-D : 閉とする。
- ③ポンプを 1 分間以上 ON にする。システムが安定後 5 分間リークチェックを行う。
- ④積算流量計測を観測、記録する。5 分間の積算流量が 2.0L (15°C、101.32kPa)以下であれば合格。

##### 4-1-3 システムクリーンチェック

夫々のエンジンテストの前にシステムのクリーンチェックを行い、部品や配管内部のスモークによる汚れ度合いや部品交換の必要性を調べる。

- ①バルブ V-B、V-C、V-D をすべて開にする。
- ②ポンプを ON にし、バルブ V-A1 : 閉、V-A2 : 開 (BYPASS)と バルブ V-A1 : 開、V-A2 : 閉(この状態を SAMPLE と呼ぶ)とを交互に切り替え、クリーンな空気ですべてシステム内のガスを追い出せるまで 5 分以上ポンプを作動させる。
- ③バルブ V-A1 : 閉、V-A2 : 開 (BYPASS)にする。
- ④バルブ V-D を閉にした後、フィルタペーパーをホルダにつけ、バルブ V-D を開にする
- ⑤バルブ V-A1 : 開、V-A2 : 閉(SAMPLE)にして、フィルタペーパーに 50kg/m<sup>2</sup>のインフローラインからの空気を通した後 バルブ V-A1 : 閉、V-A2 : 開 (BYPASS)にする。

フィルタペーパーのスポットでの SN'値が 3 以上の場合はシステムラインは清掃するか取り替えねばならない。この清浄要求(SN'値が 3 以内)に合致するまでこのシステムは使ってはならない。

(注) ここで「フィルタペーパーに 50kg/m<sup>2</sup>のインフローラインからの空気を通す」とは、本装置の場合スポット径が 20mm であり、サンプリング流量が 14.0L/min.であるため、約 54.8 秒フィルタペーパーに空気を通すことを意味する。

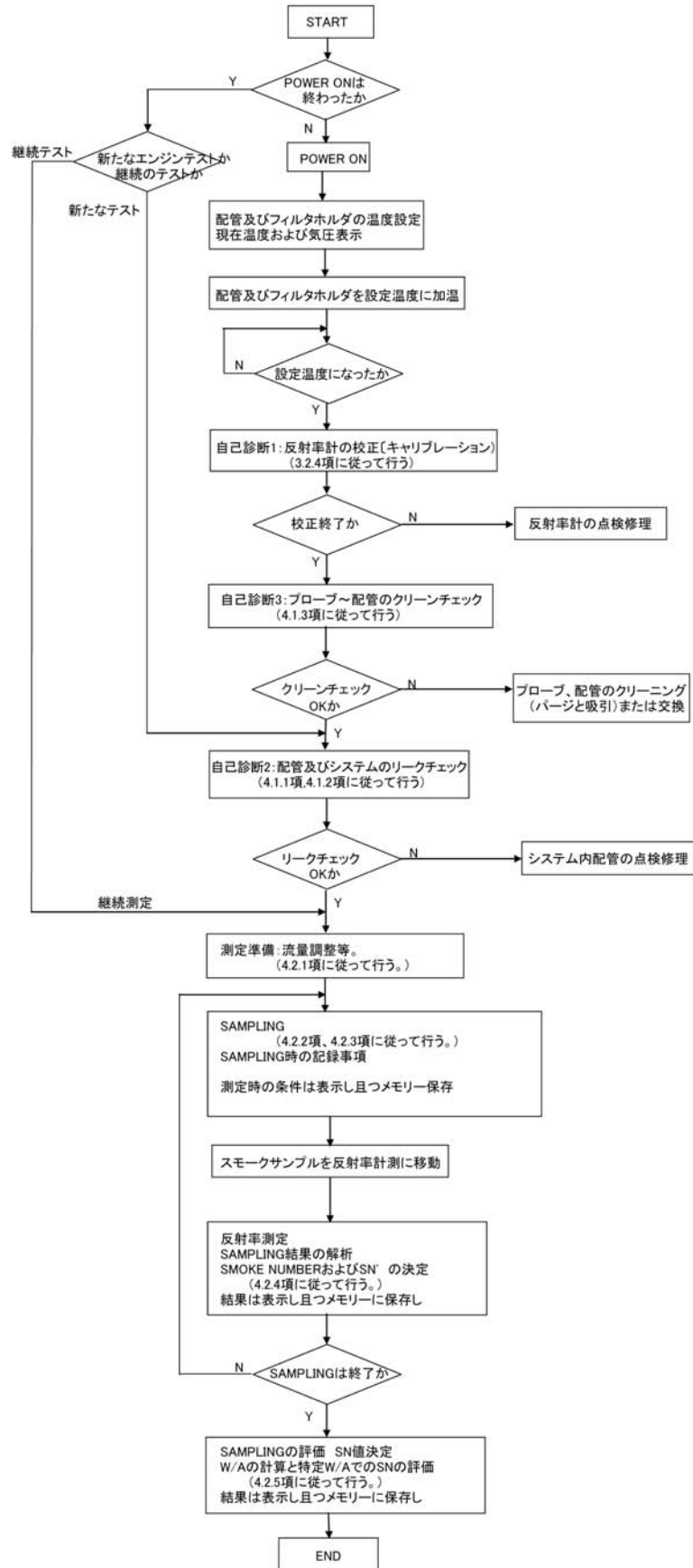


図 24 ARP1179 に準拠した本装置の動作フロー図

## 4-2 サンプリング測定手順

### 4-2-1 測定準備

- ①バルブ V-A1：閉、V-A2：開 (BYPASS)、バルブ V-C：開、V-D：閉とする。
- ②ポンプで排気ガスを 5 分以上引き込み、流量が  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  となるように V-C を調整する。＜本装置ではこの手順は不要＞
- ③クリーンなフィルタペーパーをホルダにつける。
- ④バルブ V-D：開
- ⑤バルブ V-A1：開、V-A2：閉(SAMPLE)とし、流量が  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  となるようにバルブ V-B を調整する。フィルタペーパー上の堆積粒子が過剰の圧力降下となる前に素早く終了する。＜本装置ではこの手順は不要＞
- ⑥バルブ V-A1：閉、V-A2：開 (BYPASS)、バルブ V-D：閉とする。
- ⑦ホルダを外し、フィルタペーパーを取替え捨て去り、ホルダにクリーンなフィルタペーパーをつける。

規準書で  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  と指定されている流量は、本装置では  $14.0 \text{L/min}$  とした。

本装置では流量設定として、マスフロコントローラを用いているため流量設定の①～⑤の項目は不要であり、測定準備としては⑥、⑦の項目のみ実施する。

### 4-2-2 サンプリング量と測定回数

1 分以上の十分な時間をかけて、ガスサンプルがシステムに十分に行き渡るようにする。

サンプリングの流量は  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  に維持されていること。

#### A. 異なったサンプルサイズで計測する場合

排煙サンプリング量： $W/A = 12 \sim 21 \text{kg(排煙量)/m}^2$  (フィルタペーパーのスマークスポット面積) の範囲内で少なくとも 3 回サンプルを採り測定。

3 回の測定の内、2 回は  $16.2 \text{kg/m}^2$  以上の値で、1 回は以下の値で測定。

#### B. 1 個のサンプルサイズで計測する場合

上記測定サイズを達する代わりに次のような方法でも良い。少なくとも 3 回の測定で測定結果が  $\pm 3 \text{SN}$  以内に収まるまで、 $W/A = 16.2 \pm 0.7 \text{kg/m}^2$  で継続的にサンプルを採り測定を行う。

本装置では「1 個のサンプルサイズで計測する場合」は、排煙サンプリング量  $W/A$  を  $16.2 \text{kg/m}^2$  とした。

「異なったサンプルサイズ」、「1 個のサンプルサイズ」とは、4-2-5 項の「異なった  $W/A$  値」、「1 個の  $W/A$  値」と同意語であり、本装置では夫々「多サンプリング値」、「単一サンプリング値」と呼ぶ。(4-2-5 項、5-1 項参照)

### 4-2-3 測定手順

夫々のサンプリング量での排煙採取の手順は次の通りである。

- ①バルブ V-D：CLOSE、バルブ V-A1：閉、V-A2：開 (BYPASS) とし、1 分以上排気ガスを(システム)ラインに充満させる。  
V-C で調整して流量を要求通りの  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  に再設定する。＜本装置ではこの手順は不要＞
- ②バルブ V-D：開とする。
- ③バルブ V-A1：開、V-A2：閉(SAMPLE)とし、流量が  $14.0 \pm 0.5 \text{L/min}$  であることを確認し、もし必要ならば再設定後、選定したサンプリング容量を通過させる。次にバルブ V-A1：閉、V-A2：開 (BYPASS) とする。
- ④バルブ V-D：閉、とし、ホルダのクランプを外し、フィルタペーパーを取り除き、クリーンなフィルタペーパーをホルダにつける。
- ⑤ ②～④を繰り返し、4-2-2 項の各要求に沿った測定をする。



## 4-2-4 SN' の定義、W/A の計算、SN の決定

## ①SN' の定義

仮 Smoke Number (SN') は夫々の Smoke Sample 毎にスポットの相対的反射率によって決定される。

SN' は夫々のスポットでの反射率測定値を用いて次のように定義される。

$$SN' = 100 [1 - R_s / R_w]$$

ここで  $R_s$  : サンプルスポットでの絶対反射率

$R_w$  : クリーンなフィルタペーパーでの絶対反射率

## ②排煙サンプリング量 : W/A の計算

スポットの反射率はペーパーを通してろ過されたサンプリング量に依存するので、比較を目的とするために、フィルタペーパーの単位スポット面積あたりの Sample Mass (W/A) を特定する必要がある。

ここで A : フィルタペーパーのスポット面積

W : 計測した Sample の体積 (Volume) より計算した質量 (Mass)

フィルタスポット面積当りの Sample Mass (排煙サンプリング量と呼ぶ。4-2-2 項参照) : W/A は夫々採取したサンプルのサイズ (つまり体積) から次のように計算される。

$$W/A = 3.483PV / AT \quad (\text{kg/m}^2)$$

ここで P : サンプルの圧力 (kPa)      T : サンプル温度 (K)

V : 計測したサンプル体積 (m<sup>3</sup>)

## ③SN の決定

排煙サンプリング量  $W/A = 16.2 \text{kg/m}^2$  の時の SN' の値である。

## 4-2-5 特定の排煙サンプリング量 W/A 値での SN 評価

## A. 異なった W/A 値からの SN での計測の場合

異なった W/A 値の複数のスモークサンプルを取得した場合 :

① W/A を Log 横座標とする semi-Log の座標上に SN' 対 W/A をプロットする。

② 最小 2 乗法を使いこれらのポイントに直線を引く。

③  $W/A = 16.2 \text{kg/m}^2$  での直線関数上から SN 値が読み取れる。

個々のポイントサンプルを取得した場合 :

① 上述した方法を用いて夫々のサンプリング位置での SN' 読み取り値から、最小 2 乗の直線が得られる。

② SN は、 $W/A = 16.2 \text{kg/m}^2$  での幾つかの最小 2 乗直線から読み取った Smoke Numbers の算術平均値となる。

SN は、上述したように夫々の特定した質量値で決められる。

最小 2 乗曲線の当てはめが、コンピュータでなされる場合は上述したカーブを物理的にプロットする必要はない。データにより直線からの個々の SN' 値変化ならびに曲線の設定の相関係数を示した表を作成する。

## B. 1 個の W/A 値からの SN の計測の場合

スモークサンプルを 4-2-2 項の交互に行う方法を用いて  $16.2 \text{kg/m}^2$  という 1 個の W/A 値でのみ取得した場合 :

SN は、4-2-2 項の基準に合致した 3 個のサンプルの SN' 値の算術平均になる。

個々の SN' 値は、この平均からのずれ具合によって表に取り込まれる。

本装置では、「異なった W/A 値からの SN での計測」を「多サンプリング値モード計測」、「1 個の W/A 値からの SN での計測」を「単一サンプリング値モード計測」と呼ぶ。(5-1 項参照)

## 5. 計測例と考察

### 5-1 計測例

本装置によるエンジン燃焼器の排煙濃度計測結果について述べる。

図 25 に単一サンプリング値モード計測での採取サンプル例を示す。

これは  $W/A=16.2\text{kg/m}^2$  での排煙採取を 3 回以上行い、そのスモークスポットを測定して、内 3 回の SN' の平均値と各 SN' との差が  $\pm 3$  以内であればその平均値を SN とするものであり、図では SN=10、20、30 の時の採取サンプルである。

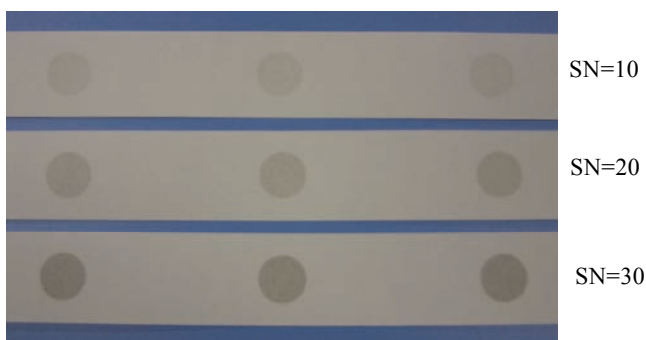


図 25 採取サンプル

次に、多サンプリング値モード計測での結果を図 26 に示す。これは、フィルタに通過させる試料ガスを

$W/A=16.2\text{kg/m}^2$  を挟むように  $12\sim 21\text{kg/m}^2$  の範囲で 3 点以上で採取し、各スモークスポットから SN' を求め、 $W/A$  の対数を横座標に、縦軸に SN' をプロットして、最小二乗法による直線を求め、その直線での  $W/A=16.2$  の時の SN' 値を内挿してスモークナンバー-SN を求めるものであり、これらの演算は制御コントローラで行われ結果が表示され、記憶される。

図 26 は燃焼条件を変え、7 回の試験を行い、1 回の試験について排煙採取量  $W/A$  を変えながら、9 回排煙サンプルを採取した時のメモリーカードに記憶された計測結果データをグラフ化したものである。

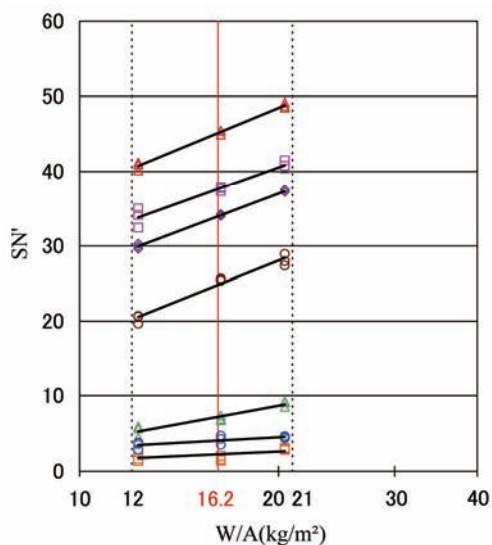


図 26 計測結果例

### 5-2 考察 1 : 計測範囲

本装置の SN 値の計測可能範囲は 0 以上 100 以下であるが、SN 値の決定基準となるフィルタペーパーの反射率  $R_w$  が均一でなく場所により  $\pm 0.5\sim \pm 1\%$  程度変化する。SN が 0~2 程度ではスモークの堆積が目視では確認が難しい位の濃度であるので  $R_w$  の変化の影響を受け易くなるが、SN が 3 程度になると反射濃度では約 0.1 であり、スモークの堆積が目視でも確認できる濃度になるので  $R_w$  の変化の影響は受け難くなり、 $R_w$  値を一定値とすることで SN は特定できる。またフィルタペーパーに堆積するスモークの量と反射濃度との関係はリニアではなく、GE 社の報告書<sup>6)</sup>によると反射濃度が 0.9 程度以下では比較的勾配の大きい曲線で飽和状態ではないことがわかる。反射濃度が 0.9 のとき反射率は約 0.126 でありこのとき SN 値は約 85 程度になる。従って本装置は SN 値が 3~85 程度、反射濃度では 0.1~0.9 程度の排煙濃度計測に適していることが判る。

### 5-3 考察 2 : 計測時間と計測誤差

本装置の計測では、本文の 4-2-2 項で説明したように ARP1179 規準書で「排煙採取前に必ず 1 分以上排煙を取り込み配管内に行き渡らせること」、「排煙採取を 3 回以上行うこと」が規準化されているので信頼性の高い結果が得られる代わりに計測時間が長くなる。計測時間の短縮のためにハード面ソフト面から検討を行い、現時点で ARP1197 に準拠した方法ではほぼ限界状態である。例えばフィルタホルダのスポット径は規準書では  $19\sim 37.5\text{mm}$  となっているが時間短縮のため本装置では  $20\text{mm}$  にしており、この条件で  $W/A=16.2\text{kg/m}^2$  の排煙採取のみで約 17.8 秒間必要である。このとき 3 回採取の計測時間は表 1 に示すように約 2 分 13 秒となる。これ以上の時間短縮はフィルタペーパーの移動やクランプ、バルブの切替などの機構制御時間を短縮化することになるが、動作を不安定にし、信頼性の低下を招くことになるので実施できない。

またこの装置の計測誤差は排煙採取時に  $\pm 2\%$  以内の流量設定・測定誤差、反射率測定時に  $\pm 0.5\%$  以内の光量変動、及び光センサとアンプの温度ドリフト -  $159\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 、等を考慮し SN 値が 3~85 においては  $\pm 3\%$  程度の誤差変動と考える。

## 6. まとめと今後の展望、展開

### 6-1 まとめ

SAE ARP1179 に準拠し、自動化計測、且つ遠隔計測できる航空エンジン用排煙濃度測定装置を開発、製作し、ジェットエンジン用燃焼器の開発、ジェットエンジン制御開発の際に排煙濃度の測定に供している。本装置の開発結果である仕様は表 1 に示すとおりである。

### 6-2 排煙濃度計測の現状と今後の展望 —低濃度排煙計測と微粒子排煙計測への対応—

ARP1179 に準拠した本装置は SN 値が 3~85 程度の濃度の計測に適しているが、最近の大型航空エンジンは 20 以下が一般的であり、10 以下のものも多くなっている。一方現在の航空エンジン用排煙濃度計測器は本装置を含めフィルタペーパーにトラップされた堆積物であるスモークの反射濃度を計測しており、フィルタペーパーを通過した粒子 (WHATMAN NO.4 の場合は 20~25 $\mu\text{m}$  以下の粒子) を含めた全ての排煙粒子で計測している訳ではない。それゆえ今後、航空エンジン用として SN 値が 0~20 の低濃度において排煙の全粒子を安定して計測するための規準書と、排煙の全粒子を計測できる例えば透過型の計測器の出現とが望まれる。また今後環境問題が更に重要視されることが予測されるため、排煙に関してはこの 25 $\mu\text{m}$  以下の微粒子がどの程度存在するかの検証、及びこの微粒子が人体に害を及ぼすかどうか、及ぼすとすれば人体にどう影響を及ぼすか等の調査が必要になる。それに伴い現在開発されている排煙濃度の減少化とともに微粒子を減少させる燃焼器及びエンジンの開発へと展開されることとなり、エミッション低減を基軸とした環境適応エンジンの開発が今後一層重要である。

### 謝辞

本装置の開発、運用及び本報告書作成にあたり、多大なご援助、ご指導を頂きました当チームの林チーム長、下平主幹研究員、藤原主任研究員に、また製作に協力頂きました(株)アトム技研の西村様に、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) Aerospace Recommended Practice. SAE ARP1179, Aircraft Gas Turbine Engine Exhaust Smoke Measurement, Rev C 1997.
- 2) 山田 秀志, 岩澤 利幸, 牧田 光正, 山本 武, 「航空エンジン用排煙濃度測定装置の開発」、2008 年 11 月 ガスタービン学会講演論文集 B-24
- 3) For Photography, Density Measurements, Part4: Geometric Conditions for Reflection Density. ANSI PH2.17-1985
- 4) Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System. ASTM E 308-06
- 5) ICAO Engine Emissions Databank-Issue 15-C, Updated 07 April 2008
- 6) Wayne M. Shaffernocker and Chales M. Stanforth, “Smoke Measurement Techniques”, SAE paper 680346
- 7) Jim Bell and Dmitry Savransky (Cornell University), “Estimating the True Colors of Mars”, Pancam Instrument Site ([http://pancam.astro.cornell.edu/pancam\\_instrument/projects\\_1.html](http://pancam.astro.cornell.edu/pancam_instrument/projects_1.html))

## 付録

## 付録 1. 排煙濃度計測のジェットエンジンへの適用例

ESPR エンジンの排煙濃度計測例を図 27～図 29 に示す。

エンジンが定常出力の場合には SN'の変動幅が小さく再現性が良かった。

サンプリングプローブについては付録 2 に記載したので参照頂きたい。



図 27 ESPR エンジンの排気計測の様子



図 28 エンジンノズル後方にセットしたサンプリングプローブ

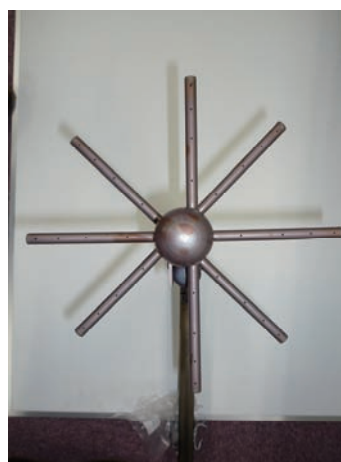


図 29 サンプリングプローブの採取孔の配置  
+ : 排煙用採取孔  
× : 排ガス用採取孔

## 付録 2. サンプリングプローブ

### ARP1179 規準と本装置のプローブについて

サンプリングプローブとはエンジン等の排煙発生体からの排煙取り入れ口であり、

- ①材質はステンレス製とする。
  - ②ミキシングプローブを使う場合は、すべてのサンプリング用の穴径は同一にする。
  - ③全プローブのオリフィス部分では、自由な流れからプローブ出口までのプローブアセンブリーを通過した排煙の圧力降下がオリフィスで 80%以上とする。
  - ④プローブ先端部（導入口）とサンプリング位置については
    - ㉔12 箇所以上のサンプリングポイントが用いられる。プローブは排煙用、排ガス用のミキシング型でも分離型でもよい。
    - ㉕サンプリング面の軸位置はエンジンパフォーマンスパラメータ認可書に示されているように出口ノズル面に接近させる。しかしどんな場合でも出口面の出口ノズル径の 0.5 倍以内に保たれている。
    - ㉖サンプリングポイントはストレートターボジェット、ターボプロップ、ターボシャフト及び合流ファンエンジンの場合には排出ノズル出口部分に、非合流ファンエンジンの場合にはコアノズル出口部分に配列される。
    - ㉗均一な排煙測定を行えるように、付与されたエンジンの型や番号とともにプローブ設計仕様が使用に当たって標準化されている。サンプリング面における詳細なトラバース測定によって、このプローブ設計が代表的な排煙サンプルであることが実証されるはずである。
    - ㉘フィルタホルダ中よりもこのプローブ中でのサンプル流れ率を高くしたいと望む場合は、余分な流れを捨てるために流れ分割器をプローブと VALVE-F との間に置く。(図 4、図 5 参照) この余分な流れを捨てるための配管はできるだけプローブ側に接近させ、プローブアセンブリーを通った排煙の圧力降下を要求されている 80%に維持するためのサンプリングシステムの能力に影響させてはいけない。この捨てられた余分な流れは、CO<sub>2</sub> 分析器や完全なエミッション分析システムに送出される。
- 流れ分割器を使った場合は、流れ分割器を設けても、フィルタホルダを通過する排煙レベルに変化がないことを実証するためのテストが行う。このテストとは流れ分割器から出口への流れを逆にすることであり、そして排煙レベルはその手順における精度内にあり、変化しないことを示すことによりなされる。

本装置のサンプリングプローブでは図 29 に示すように排煙用とガス分析用に分離したタイプとし、流れ分割器は使用していない。プローブの形状は十字形とし、サンプリングポイントは同一穴径で 16 箇所である。材質はステンレスとした。