

## 煙突型集風体に関する室内実験：第一報 集風体周 りの流れの観察と速度計測の検討

杉谷, 賢一郎  
九州大学応用力学研究所技術室

<https://hdl.handle.net/2324/17839>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 11, pp.55-68, 2010-03. Research  
Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

# 煙突型集風体に関する室内実験

## —第一報 集風体周りの流れの観察と速度計測の検討—

応用力学研究所技術室 杉谷賢一郎

### 1. はじめに

地球規模の温暖化、砂漠化、異常気象が顕在化し、化石燃料の枯渇化も伴って、クリーンで再生可能なエネルギー利用が提唱されている。そして世界各地で風力、水力、太陽熱など、それぞれの地域性に適したエネルギー利用が行われている。

J.Schlaichが発案したソーラーチムニー(図1)は透光性の集熱部で太陽熱を集め、中央部に設置した煙突状の構造体内部に誘起された熱上昇風によって発電を行うシステムである。このシステムの発電性能は日照強度、集熱部面積、煙突部高さによって決定されるため、太陽エネルギーが豊富で、広大な土地利用が可能な砂漠地域に特に適しており、砂漠化が環境問題として深刻になるなか、このような不毛の地域における有効なエネルギーの供給システムとして期待される。過去には1982年にスペインで100kw級のパイロットプラントが運転され、現在ではオーストラリアに発電能力200Mwが計画されている。しかしながら、この種の研究例は非常に少ない。

本研究は、風を創り出す煙突型集風構造体の縮尺モデル(図2)を用いた室内実験を行い、集風体内部に誘起される熱上昇流に関する様々な基礎データを収集することを目的とした。さらに、実験により得られた知見から、発電機設置部に相当する集風体下層部における上昇流の効果的な集風手法について検討する。



図1 ソーラーチムニー

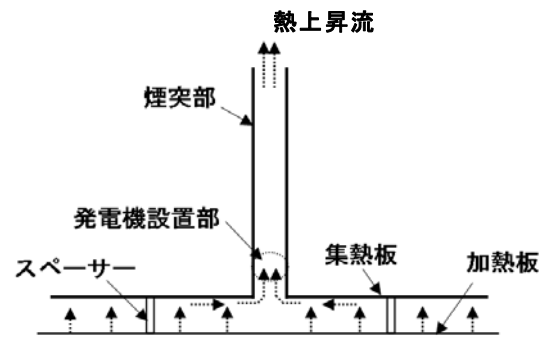


図2 煙突型集風構造体モデル

以下に研究手順を示す。

1. 集風構造体の縮尺モデル、温度制御が可能な加熱板などを製作する。また、気流の可視化システムを構築し、管内(煙突内)や集熱部付近の可視化観察を行って流れの状態を把握する。
2. 管内に誘起される上昇流の正確な速度を計測する。管内の流れは熱を伴った複雑な流れで

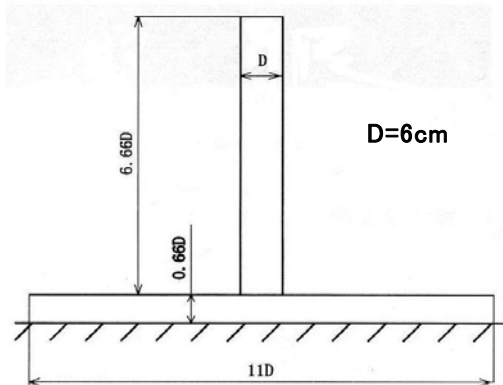
ある。この速度を求めるには流れの温度変化の影響を取り除いた計測が必要であり、その手法を検討する。熱線流速計、LDV(レーザードップラー流速計)、PIV(画像処理法)などを用いた手法で計測を行い、それらの結果を比較して速度を評価する。そのために、それぞれの計測法に応じた計測システムの構築が必要となる。

3. 上昇流に関する様々な基礎データを収集する。可視化観察データを参考にして、管内の速度分布や速度変動の計測を行う。また、集熱部付近と上空の温度差の違いによる上昇流の速度や温度変化などの実験計測を行う。
4. 発電機設置部における上昇流の集風に関する実験を行う。例えば煙突部形状を変えた場合の上昇流の速度変化や、集熱部に構造体周辺の風を導入した場合の効果などについて調べる。

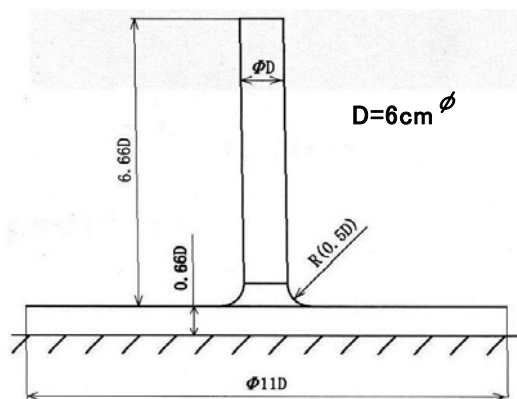
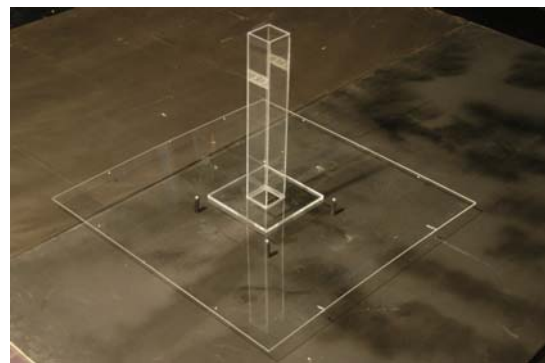
本報では第一報として、装置の製作、流れ場の観察、速度計測の検討など、主として研究手順1,2について技術的側面から報告する。

## 2. 集風構造体モデルと加熱底板

本研究では100m規模の集風構造体を想定し、その1/250スケールモデルを用いて室内実験を行う。図3に集風体モデルを示す。

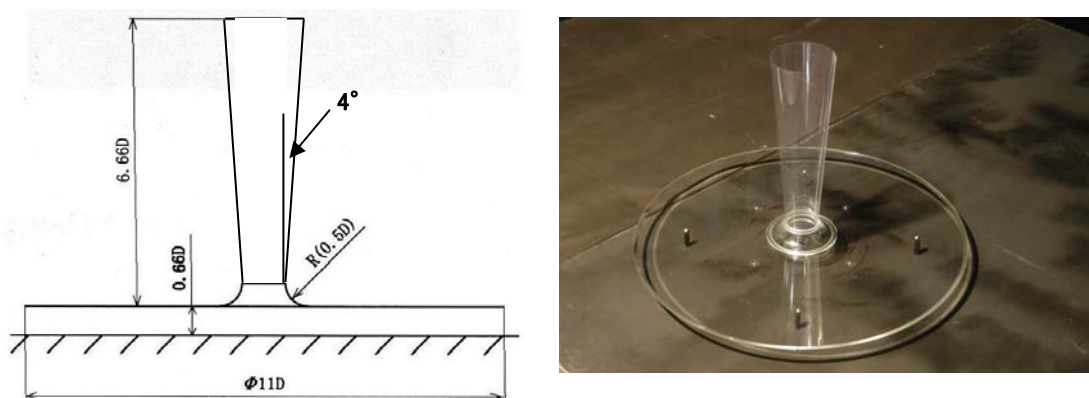


(a) 角型モデル



(b) 円筒モデル





(c) ディフューザモデル

図 3 集風構造体モデル

(a)角型モデルは煙突部が角柱で集熱部は正方形である。(b) 円筒モデルは煙突部が円筒で集熱部は円形である。(c) ディフューザモデルは円筒モデルの煙突部が高さ方向に開いた形状である。いずれのモデルも煙突内部の上昇流や集熱部の流れを観察するためにアクリル製である。

温度制御が可能な加熱底板を図 4 に示す。本装置はシリコンラバーヒーター(八光電機製作所,100v,30A, 有効加熱面積1m×0.5m,2 枚)により加熱する。加熱面の温度が均一になるようにラバーヒーターの上に厚さ 3mmの銅板を敷いた。銅板上面に白金測温抵抗体を取り付け、電子温度調節器(OMRON E5EN-CIP)を用いて温度制御を行う。

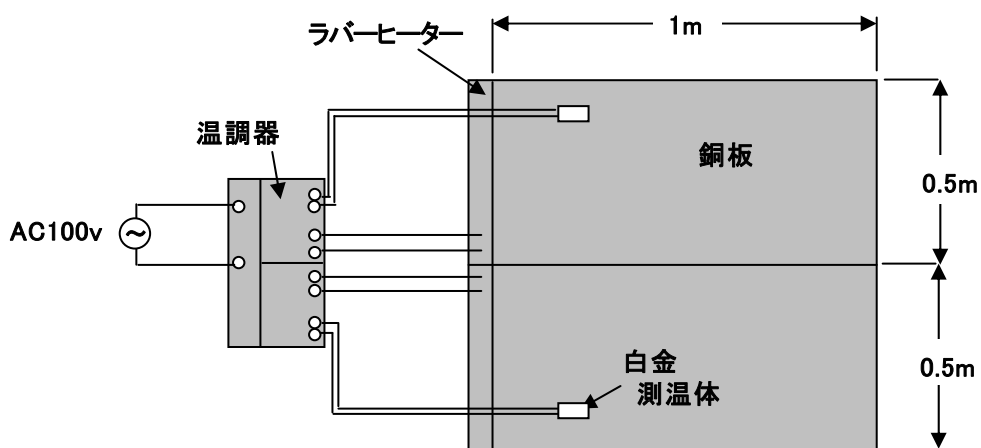


図 4 加熱底板

### 3. 集風構造体内部の流れの可視化

集風体内部に誘起される上昇流を確認し、その挙動を観察するために流れの可視化を行った。図 5 は可視化観察の概略図である。可視化に用いる煙は煙発生装置 (Dantec Fog Generator)

により生成した。この煙は加熱された高温の煙であるため、一度チャンバーに誘導して冷やし、低速回転のファンで集熱部に導入した。側面からプロジェクタ(Mastar HILUX, 1kw)で照明し、デジタルビデオカメラ(Sony DCR-TRV50,以下 DV カメラ)で撮影した。

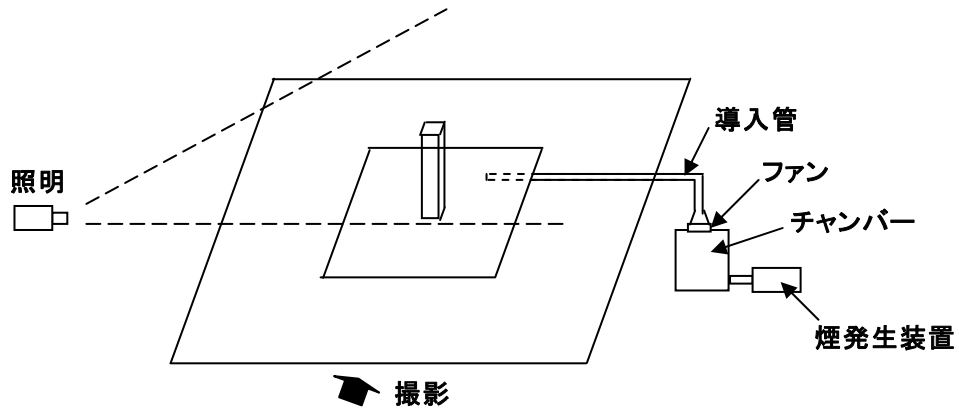


図 5 可視化の概略図

図6は可視化画像である。(a)の底板の加熱を行わない場合では、煙は導入に用いたファンの影響により集風体内外で浮遊して漂うが、時間の経過とともに落ち着き、集風体内の上昇流は観察されない。(b)は室温との温度差 30°Cで底板を加熱した場合である。このとき、底板周辺では加熱により煙が上昇している。集熱部の煙は煙突下部より流入し、煙突内を上昇して上部から流出する。その速度はかなり大きいことが観察された。

図7は煙突下部の流入の様子である。導入管からゆっくりと流れ出た煙が煙突入口に吸い込まれるように流入する様子がわかる。



(a)底板加熱なし



(b)底板加熱(室温との温度差 30°C)

図 6 煙による流れ場の可視化(角型モデル)



図 7 煙突下部の流入(円筒モデル)

#### 4. 管内(煙突内)速度の計測

管内に誘起される上昇流の正確な速度を求めるための計測手法を検討した。管内の流れは熱を伴った複雑な流れであり、この速度を求めるには流れの温度変化が影響しない計測法でなければならない。実験では、画像処理を利用した PIV 計測、レーザードップラー流速計を用いた LDV 計測、および、ワイヤープローブをセンサとする熱線流速計による計測の三手法を試みた。本計測では全て角型モデルを対象としている。

##### 4-1. PIV 計測

PIV は作業流体中に混入させたトレーサ(微粒子)の動画画像から粒子の動きを追い、速度を求める方法である。この手法で用いるトレーサの比重は作業流体と同程度であることが必要で、流体が空気の場合は使用できるトレーサの種類が少ない。本研究ではトレーサにタンポポの冠毛を用いた場合と、流れの可視化に使用した煙による計測を行った。

##### タンポポの冠毛による計測

タンポポの冠毛を用いた計測を行った。この計測は温度に依存することなく、微風においても流れ場の大まかな様子が観察可能である。図8に示すように先端に網を取り付けた導入棒を用いて冠毛を煙突入口付近に挿入する。側面からプロジェクタで照明し、DV カメラで撮影した。

図9は室温と加熱面の温度差 30℃の場合における冠毛の挙動を示す。撮影に用いた DV カメラのフレーム間隔は 1/30sec で、図は 5 フレーム毎の画像である。また、画像に示す目盛りは 5cm である。時間の経過とともに冠毛が上昇し、煙突内の上昇流の存在が明らかである。

図 10 に各高さにおける冠毛の上昇速度を示す。上昇速度の解析には流体画像解析ソフト Flow-vec32 を用いた。実線は 4 回行った実験値を最小二乗法で近似した直線であり、冠毛の上昇速度として約 0.36~0.37m/s を得た。

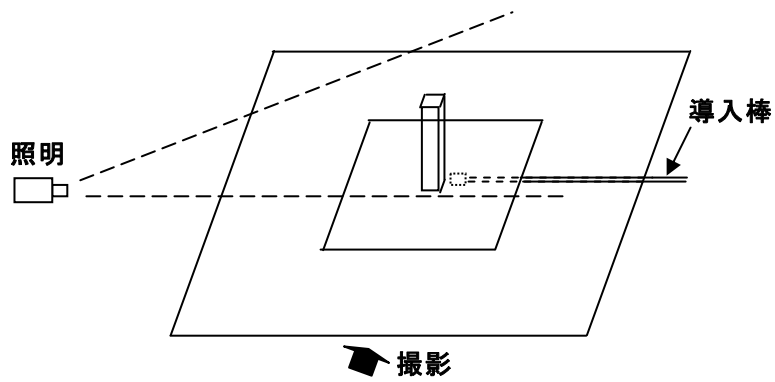


図 8 タンポポの冠毛による計測

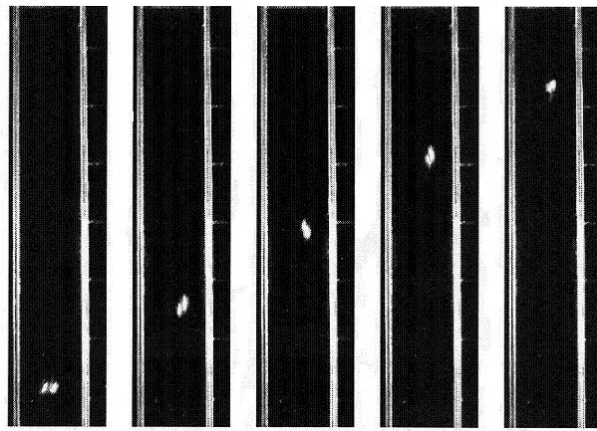


図 9 冠毛の挙動(5/30sec 間隔)

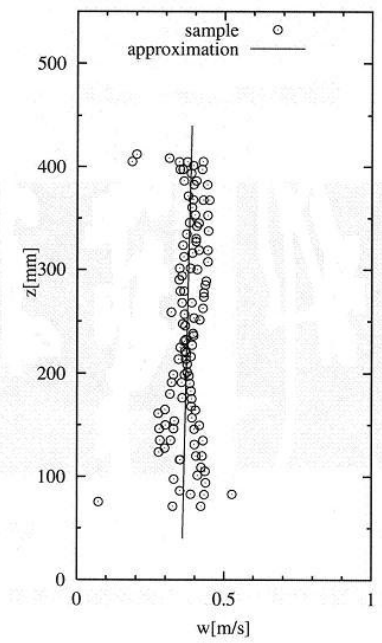


図 10 冠毛の上昇速度



## 煙による計測

煙発生装置で生成した煙をトレーサとして上昇流の速度計測を行った。計測装置の配置は図 5 の流れの可視化観察の場合とほぼ同様である。但し、流れ場の撮影には高速度 CCD カメラ (Kodac Motion Corder Analyser SR-Ultra) を用いた。

図 11 は室温と加熱面の温度差 30℃における撮影画像であり、図 12 は解析したベクトル図である。解析には画像解析ソフト Flow-vec32 を用いた。図 11(a)は煙突全体を対象とした撮影範囲が広い場合 (90～390mm) で、12mm の広角レンズを使用し、カメラのシャッタースピード 1/250sec、撮影速度は 125fps (フレーム・パー・セコンド) である。この場合、図 12(a)に示すように煙の移流範囲が大きく、これに伴って誤追跡ベクトルが生じ、計測精度が下がる。その改善策として、撮影範囲を下部(b,90～190mm)、中部(c,190～290mm)、上部(d,290～350mm)、出口部(e,340～440mm)に4分割して撮影を行った。分割撮影における撮影条件は 25mm レンズ使用、シャッタースピード 1/250sec、撮影速度 250fps である。

画像解析ソフト Flow-vec32 は濃度パターンを追跡するアルゴリズムであり、適度な濃度分布を必要とする。図 11 の下部(b)では流れが吸い込まれるように流入し、煙は一様に筋状に分布している。この状態では濃度パターンの変化がほとんどなく、適切な解析が行われぬ(図12(b))。図 11 で中部(c)に達した煙は乱れ始め、上部(d)や出口部(e)ではさらにその傾向が顕著である。この状態の解析(図 12)では、(c)で欠落ベクトルが点在しているが、適当な乱れが生じる(d)や(e)では欠落ベクトルがほとんどみられず、解析が適切であることを示す。

図 13 は連続したベクトルデータから過誤ベクトルを削除し、平均化したベクトル図であり、図 14 は、これより求めた水平断面の上昇速度である。図より、下部では 0.2～0.3m/s、中部では 0.3～0.5m/s、上部、出口部では 0.5～0.6m/s の平均速度を算出し、本計測では煙突内部を上昇するにしたがって平均上昇速度が増す傾向を示している。

## 4-2. LDV 計測

レーザードップラー流速計は流体に混入させた微粒子(以下、ドップラー粒子)にレーザー光を当て、その散乱を利用して粒子の移動速度(=流速)を検出する。

本計測では当研究室で所有する前方散乱型流速計(DANTEC 55N20)を使用して計測を行った。ドップラー粒子には煙発生装置で生成した煙粒子を用いた。計測の概要を図 15 に示す。光源から照射した 3 本のレーザー光が焦点を結ぶように調整する。この焦点が計測点となる。計測点を通過する煙粒子の散乱光を受光系に取り込む。光源におけるレーザー光の周波数と散乱光の周波数の差から粒子速度を求める。

結果的に、本手法は有効となるデータの取得率が 10%程度で、適切な計測ができなかった。その原因として次の 2 点が考えられる。

1. モデルがアクリル製であるため、レーザー光の屈折が生じ、うまく焦点が結べない
2. 煙突内の流れ場が複雑な部分では、煙粒子が計測点を外れることが多い



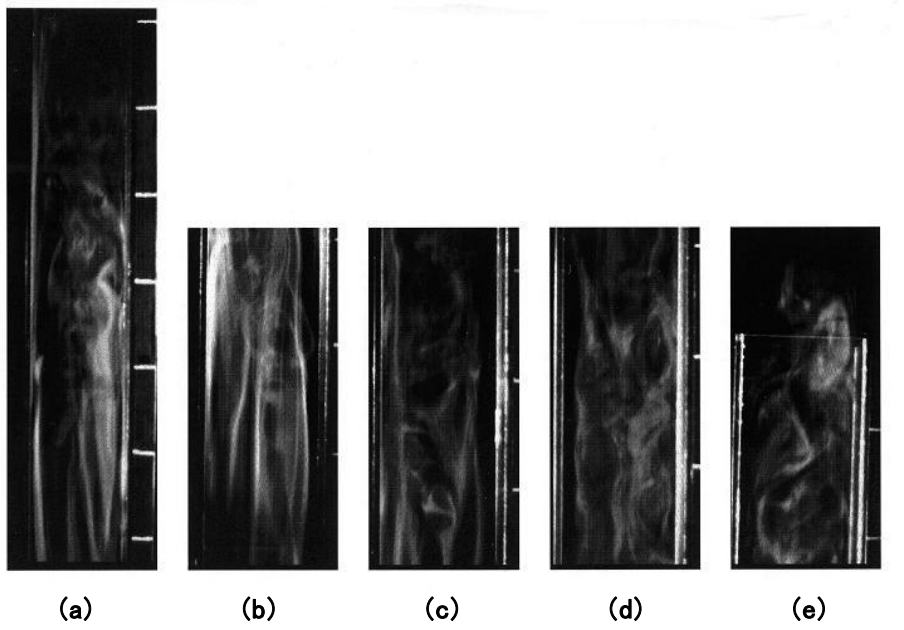


図 11 CCD カメラによる撮影画像

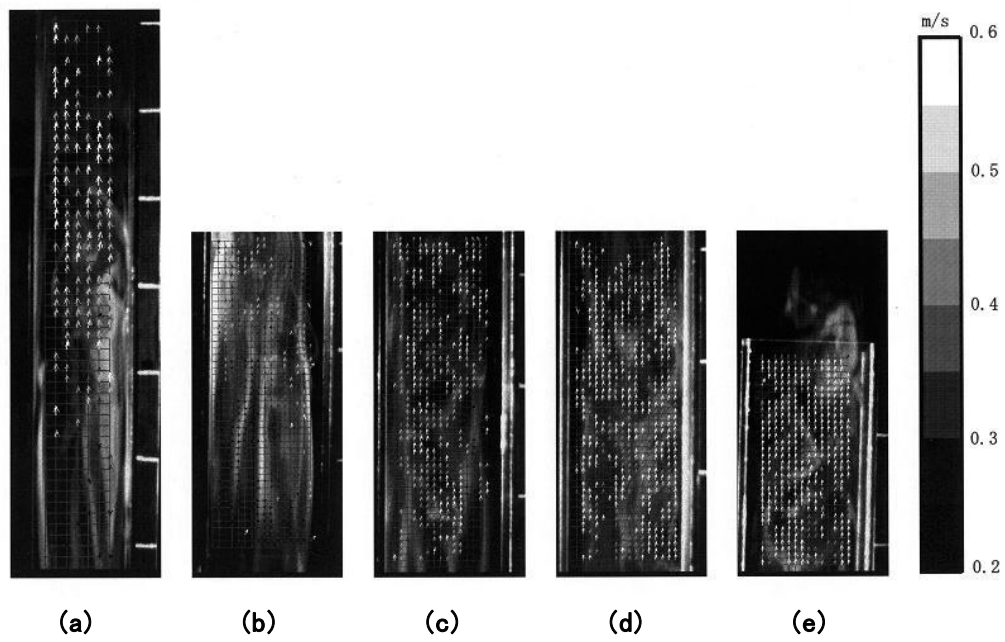


図 12 解析したベクトル図

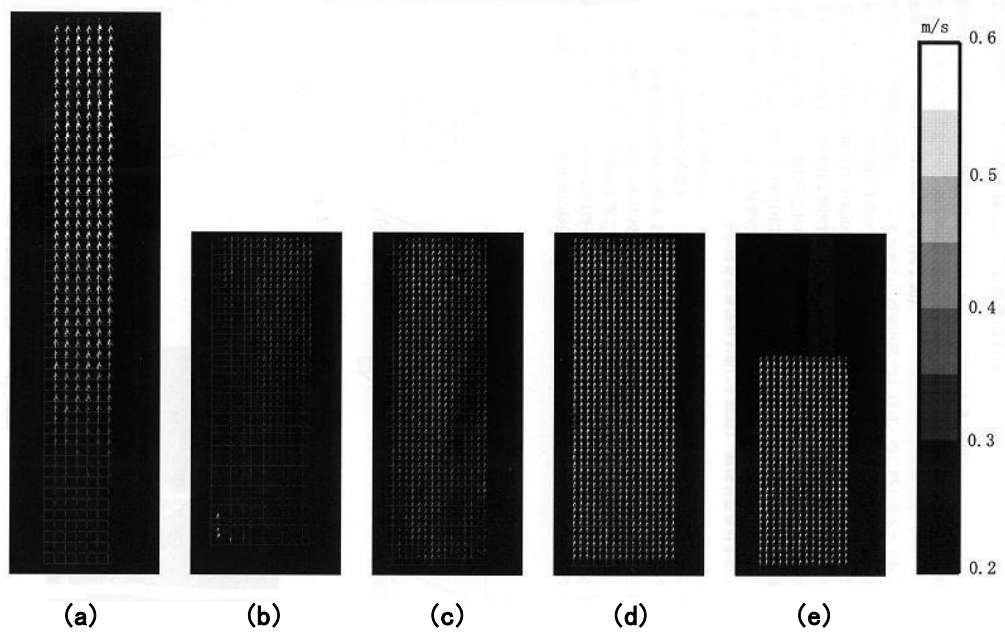


図 13 平均化したベクトル図

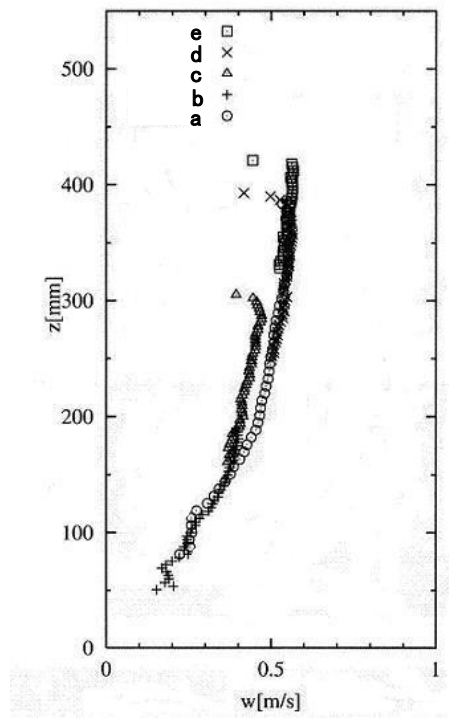


図 14 平均上昇速度

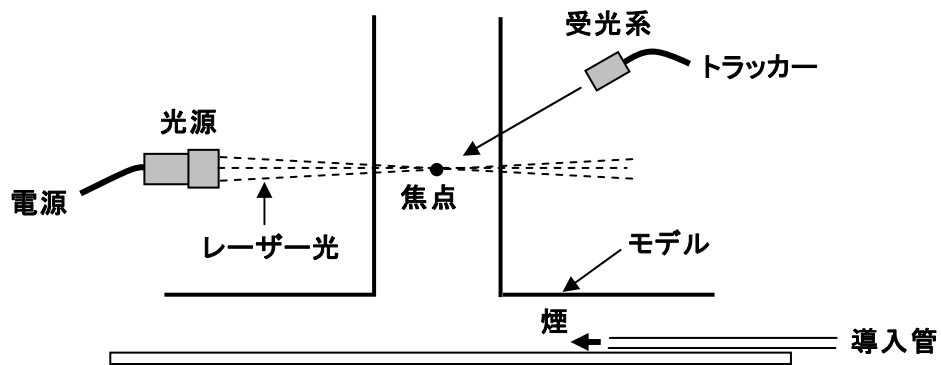
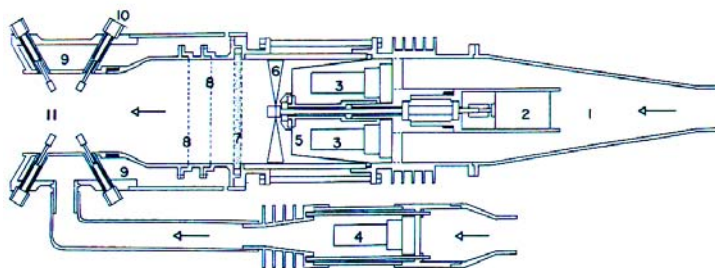
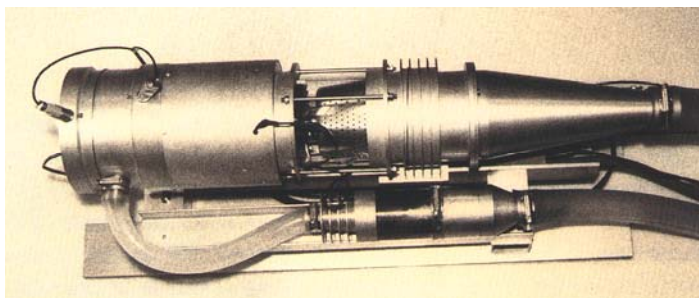


図 15 LDV 計測の概要

#### 4-3. 熱線流速計による計測

熱線流速計による手法を試みた。本計測の速度センサにはワイヤー式の I 型熱線プローブを用いた。ワイヤー式プローブの出力は流速だけでなく、気流温度によって変化する。そのため、出力を速度変化によるものと温度変化によるものとに分離する必要がある。この作業として熱線出力の校正を行う。様々な気流温度のもとで流速と熱線の出力変化との校正を行い、その評価式を求める。温度センサには熱電対を使用し、校正は当研究室で開発された校正装置(図 16)を用いて行った。



1. 拡散部
2. 拡販モーター
3. 加熱ランプ
4. 予熱ランプ
5. 味噌こし
6. 拡販ファン
7. 整流マット
8. 整流金網
9. 二重構造部
10. 超音波センサー
11. 気流吹き出し口  
(計測部)

図 16 計測用冷線・熱線校正装置

熱線プローブ、および熱電対の配置を図 17 に示す。熱電対は熱線の熱を受けないように 2mm 程度前方に配置する。この配置はセンサ部として大きくなるのが欠点で、狭い流路の計測においては流れに影響を与える可能性がある。

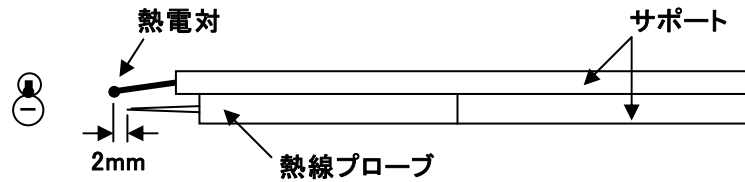


図 17 熱電対・熱線プローブの配置

計測システムを図 18 に示す。三次元トラバーサを製作し、センサ部が煙突内を移動できるようにした。センサ部は 90° 回転可能で、側方に設置した校正装置に挿入して熱線の校正を行なう。

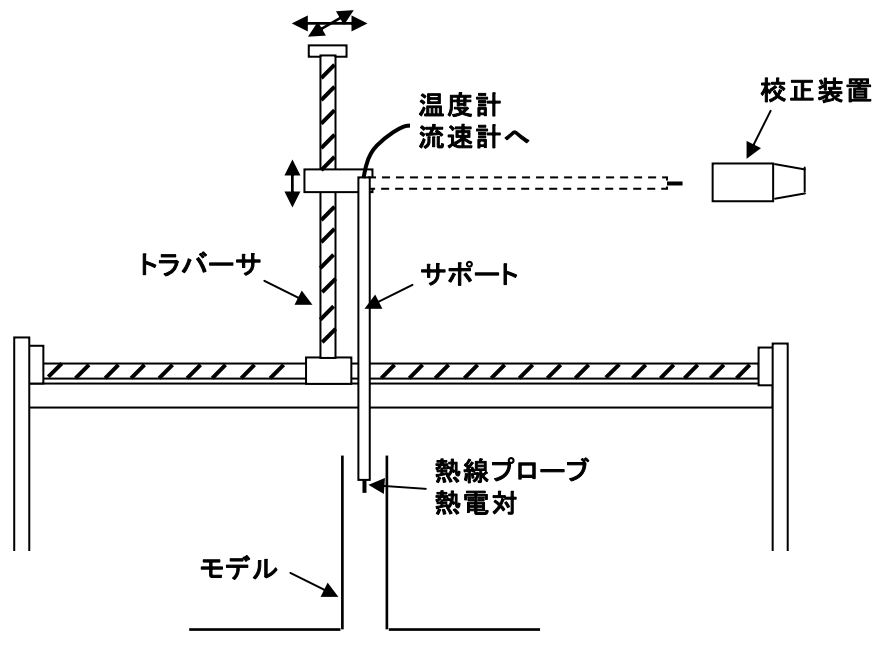


図 18 熱線流速計計測システム

校正および煙突内の流れ計測の手順を以下に述べる。

1. センサ部を垂直にし、高さ方向に数点、煙突内気流温度を測定する。
2. センサ部を水平にして校正装置に挿入し、熱線出力の校正を行う。1. で測定した結果を基に気流温度を変化させ、それぞれの温度において流速を変えて出力を測定する。校正結果の一例を図 19 に示す。これにより熱線出力の評価式

$$E^2 = (a + bU^m)(T_w - T_a) \quad (1)$$

U : 流速

E : 熱線の出力電圧

m : 熱線指数, 0.5 としている

T<sub>w</sub>: 熱線温度

T<sub>a</sub>: 気流温度

a, b : 定数

における定数 a, b が求まる。

3. センサ部を垂直にして煙突内部の計測を行い、熱線出力 E と気流温度 T<sub>a</sub> から(1)式を逆算して、上昇流の速度 U を求める。

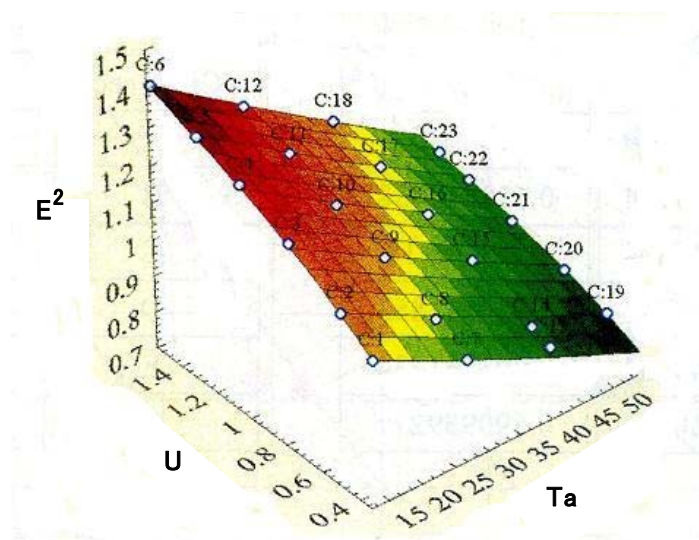


図 19 校正結果の例

図 20(a)に熱線計測によるモデル中心軸上の上昇速度を示す。煙突入口部の速度は 0.47m/s であり、煙突上部、および出口部では 0.58m/s であった。乱れ強さ(b)は4~7%の範囲で分布しており、上昇するに従って大きくなる。

熱線計測による結果を4-2節の煙を用いた PIV 計測と比較すると、下部から中部までは上昇速度に差があるが、中部から出口部まではよく一致している。特に、中部では PIV 計測で欠落ベクトルが点在したにもかかわらずよく一致し、計測が適切であると考えられる上部や出口部でも良好な一致を示した。

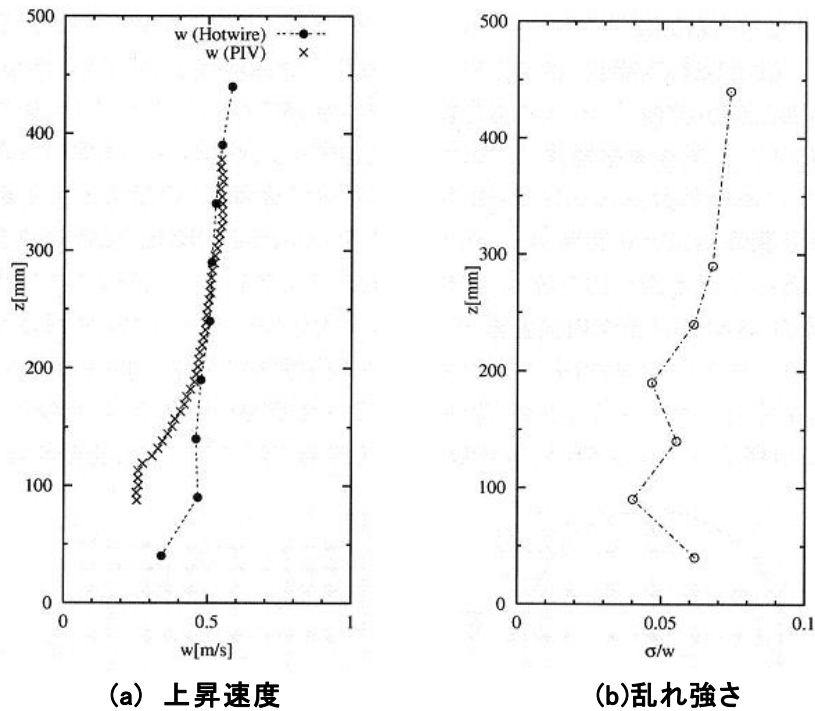


図 20 煙突内上昇速度と乱れ強さ

## 5. まとめ

煙突型集風構造体内部に誘起される熱上昇風に関して、基礎データを収集する目的で縮尺モデルを用いた室内実験を行った。本報では主として集風体モデル内部の流れの観察と上昇流の速度計測の検討について報告した。

流れの観察では煙を用いた可視化を行い、煙突内に誘起される上昇流の存在を確認した。上昇流の速度計測では PIV 計測、LDV 計測、熱線流速計による計測を試みた。それぞれの手法の特徴を考察し、管内(煙突内)の流れ計測に対する適用性について検討した。

PIV 計測は流れを直接計測できる利点はあるが、トレーサの選定が難しい。タンポポの冠毛を用いた計測は大まかな計測であり、冠毛自体の重量が流速に影響していると考えられる。煙をトレーサとした計測では解析ソフトが濃度パターンを追跡するアルゴリズムであるため、適度な濃度分布を必要とし、流れが一様な状態(乱れない状態)では適切な解析が行われない。煙突全体を対象とした流れ計測には本手法は適当でない。撮影部分を十分拡大して煙粒子自体の動きを追跡する手法があるようだが、この場合は格段に明るい照明装置が必要となる。

LDV 計測は4-2節で述べたように、集風体モデルの材質が適当でないため正確な計測を行うことができなかった。また、本手法ではトレーサとして使用した煙をさらに高濃度にしたほうがよいとの指摘があった。

熱線流速計による計測は、プローブ出力の校正が常に必要である。また、狭い流路の計測に

はセンサ部の影響が危惧される。しかしながら、本計測における煙突上部から出口部の計測結果は、正確な解析が行われていると考えられる PIV 計測の結果とよく一致している。このことは、直接プローブを挿入しても煙突内の流れを乱すことなく計測が行われたことを示唆している。本手法はプローブをトラバーサで移動させることにより、煙突内をくまなく計測できることが大きな利点である。

報告では省略したが、著者所属の研究室において集風体内の流れに関して数値解析を実施しており、実験結果との比較を行っている。

### 謝 辞

本報告の投稿にあたり、助言を頂いた大気流体力学分野大屋裕二教授、および原稿作成に協力頂いた内田孝紀助教に感謝いたします。

本研究は平成21年度科学研究補助金(奨励研究)の援助を受けた。

### 参考文献

- 1) 藤原正純,作田宏一:ソーラーチムニー発電システム,Solar Energy,Vol.9,No.1,24-28,1983.
- 2) 岡田臣右他4名:垂直型集風構造体の集風性能評価,第19回風工学シンポジウム論文集,2006,145-150.