

# レーザー光を用いた気流の可視化システムの開発研究

乱流の微細構造および浮遊粉塵の拡散過程を中心として

正会員 村 上 周 三\*

正会員 加 藤 信 介\*\*

正会員 赤 林 伸 一\*\*\*

## 1. 序一本可視化システムの特徴

本研究は、建築や都市の環境工学の分野で扱う流れを対象とし、流れ場の全体的な把握とともに微細な乱流構造の把握を同時に可能とする新たな可視化手法の開発に係わるものである。

流れの可視化には各種の手法があるが一般に気流の可視化にはトレーサー法が用いられることが多い<sup>4)</sup>。これには、①煙トレーサーを用いる方法<sup>5)</sup>、②メタルデヒド等の粒子を用いる方法<sup>6)</sup>、③バブルを用いる方法<sup>6)</sup>、④スモークワイヤー法<sup>7)</sup>等がある。①②③は乱れに関する分解能が悪く、平均的な流れの様相の可視化に留まっているのが現状である。また④も局所的には詳細な流れの可視化が可能であるが乱流拡散によりすぐ消滅してしま

う短所がある。

流れの可視化にはトレーサーの要素とともに光源に対する配慮が必要となる。通常のランプやスリット光源等に対し大森ら<sup>8)</sup>や Balint ら<sup>12)</sup>は可視化面内を簡便に高照度に照明できることからレーザー光を用いて水の中の流れや、吹出噴流の可視化を行っている。この他レーザー光を用いて轉法輪<sup>9)</sup>は風洞内層流中において建物周辺気流の可視化を行っている。また、Maille ら<sup>10), 11)</sup>は、早くから風洞内乱流境界層中において建物周辺の流れをレーザー光を用いて可視化している。

本研究では、特に建築や都市の環境工学の分野で取り扱われる流れを対象として微細な乱流構造を可視化するため気流中の浮遊微粒子そのものを可視化トレーサーと

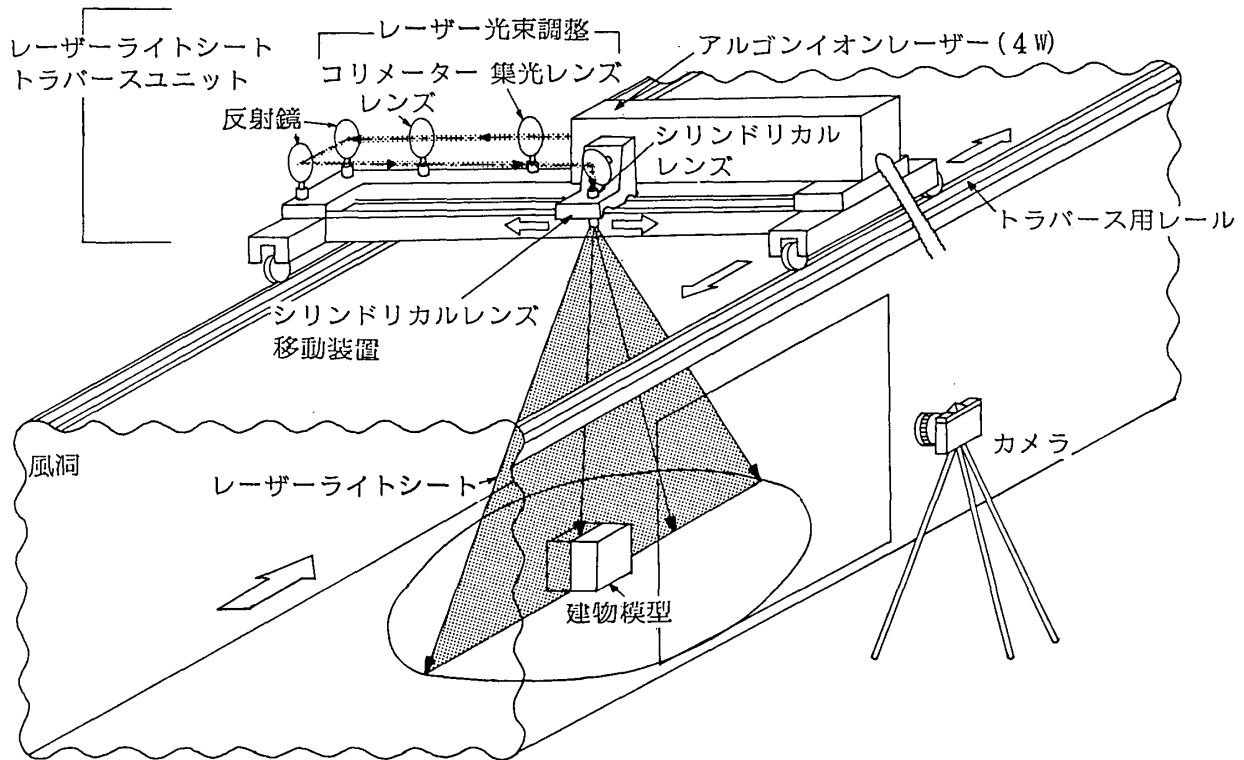


図-1 可視化装置の全体図

\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博

\*\* 東京大学生産技術研究所 講師・工博

\*\*\* 東京大学 大学院生

(昭和 60 年 2 月 21 日原稿受理)

し、明瞭な可視化画像を得るシステムの開発<sup>注)</sup>を目的としている。これは煙等小粒径であるが粒子濃度を高くしたトレーサーを用いて流れを可視化する方法と異なり、浮遊微粒子としては比較的大粒径で粒子濃度も相対的に低い浮遊微粒子をトレーサーとして流れを可視化する点に、在来の可視化手法とは大きく異なる本システムの特徴がある。本システムはトレーサーとして炭酸マグネシウムの微粉末を用い、高い照度のレーザーライトシート (LLS：レーザービームを円筒状レンズで薄膜状に拡散させたもの) を光源としてトレーサー微粒子1つ1つの散乱光により流れを可視化する。これらは従来の可視化手法には見られないものであり、以下に挙げる創意工夫、技術開発が必要である。

- ① レーザ光源の出力を適切に選定する技術
- ② シリンドリカルレンズのトラバース装置の設計方法
- ③ レーザー光に特有な撮影技術 (シャッター速度、絞り、フィルム感度等の選定)
- ④ LLS のアングル、トレーサーの選定に関する技術

また、原理的にレーザーを用いて同様の可視化装置が作成されている例が他分野に見られるが、上記の創意工夫、技術開発があまりなされていないことや、建築環境工学への適用が十分考慮されていない点等を鑑みれば本研究の意図や創意工夫は十分に理解される物と考える。本可視化システムは気流中の浮遊微粒子を直接可視化するため、浮遊微粒子自身の拡散現象をラグランジェ的に可視化解析できる特徴もあわせ持つ。本報では、可視化システムの概要および本システムを用いて従来より、より鮮明で詳細な流れの様相をとらえた可視化写真の例について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 可視化装置

図-1に可視化装置の全体図を示す。光源には出力4Wのアルゴンイオンレーザーを使用し、光学系をトラバース装置に組み込み可動のLLSを作成する。光源にレーザー光を用いたのは

- ① 微粒子の散乱光強度を確保するための高い照度を容易に確保できる。
- ② レーザー光をシリンドリカルレンズ (円筒状レンズ) で拡散させるだけの簡単な光学系によりLLSを作成できる。また、容易にLLSの厚みを変えることができる。
- ③ 得られる可視化画像のコントラストが良い。
- ④ LLSのトラバースを容易に行い得る。

等の理由による。

注) 本可視化システムの設計については、すべて筆者等が行い、設計資料とおりの製作を理化精機工業(株)に依頼した。

### 2.2 トレーサー

可視化トレーサーとしては炭酸マグネシウムの微粉末を使用する。粒径分布のピークは約5 $\mu\text{m}$ で1~10 $\mu\text{m}$ の範囲に分布している。トレーサー注入法ではトレーサー粒子の沈降速度が問題となるがこのトレーサーの場合は1cm/s以下であると考えられる。トレーサーの注入方法は各種あるが、吹出気流に直接注入する場合や、室内に設置した模型の表面から発生させる場合にはトレーサーを一定量継続的に発生させることが最も大切な条件である。

### 2.3 室内気流および粉塵拡散の可視化

#### 2.3.1 対象室内模型

図-2に示すアクリル製模型を対象とする。本模型の室内気流性状は文献(13)で詳細に検討されており、吹出Re数4900(換気回数48回/h)以上では室内気流性状

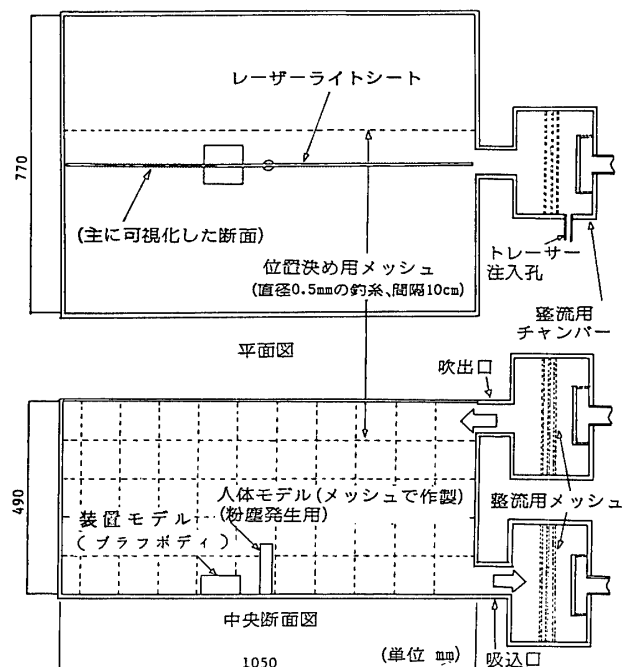


図-2 対象室内模型の概要

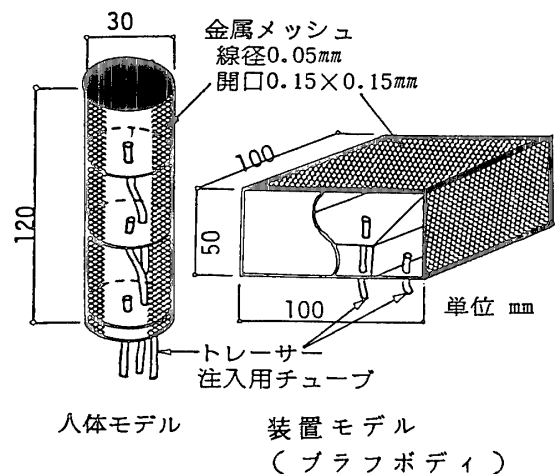


図-3 人体モデルおよび装置モデル (ブラフボディ)

状が変わらないことが確認されている。図-3に粉塵発生用の人体モデルおよび室内模型内部に設置する装置モデル（ブラフボディ）を示す。装置モデル（ブラフボディ）の壁面および上部天井面は金属メッシュで作成されており、それぞれ別々に粉塵トレーサーを発生させることができる。また、人体モデルも上、中、下の3層に別れておりそれぞれ別々にトレーサーを発生させることができる。

### 2.3.2 室内気流および粉塵拡散の実験条件

表-1に示す。実験1～実験2は室内気流性状の可視化に関する実験である。実験1は室内になにも設置しない場合、実験2-1は室内床中央に装置モデルを1個設置した場合、実験2-2は室内床に装置モデルを5cm間隔で4個設置した場合の実験である。実験3および実験4は室内で発生した粉塵の拡散過程を可視化する実験である。実験3-1は、人体モデルの全面からトレーサーを発生させた場合、実験3-2は人体モデルの上部からトレーサーを発生させた場合、実験3-3は下部から発生させた場合の実験である。両実験とも人体モデルから5cm左側に装置モデルが設置されている。実験4-1は室内に設置した装置モデルの風上側壁面より発塵した場合、実験4-2は装置モデルの上部天井面より発塵した場合の実験である。すべての実験で室内吹出口での風速は1.0 m/s、吹出 Re 数は4900である。LLSの厚みは床面で約1cmである。

## 2.4 建物周辺気流および屋外拡散の可視化

### 2.4.1 対象建物模型

図-4に示す4種類の建物模型を対象とする。単独建物の場合とこれらの建物を組み合わせた複合建物の場合について実験を行う。使用した風洞は境界層型であり、風洞内気流はスパイヤー、ラフネス等により境界層を発達させ  $U \propto Z^{1/4}$  に比例するアプローチフローを作成する。風洞内自由風速は1.0 m/s、建物高さを代表長さとしたレイノルズ数は3500～14000である。

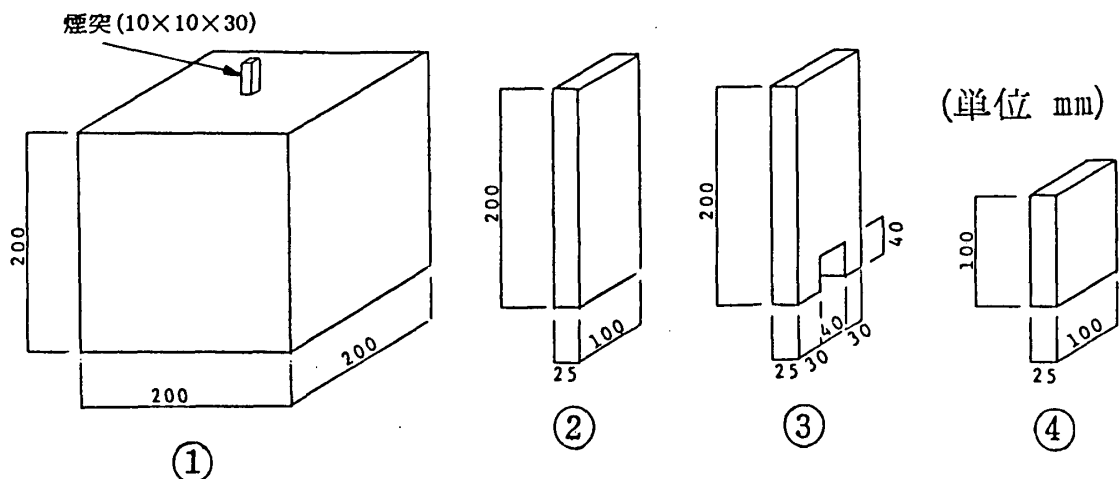


図-4 対象建物模型の概要

### 2.4.2 建物周辺気流および屋外拡散の実験条件

表-2に示す。実験5は単独建物の場合、実験6は複

表-1 室内気流および粉塵拡散の実験条件

実験番号	装置モデル	吹出気流にトレーサー注入	室内でトレーサー発塵	写真番号
1	無	有 (整流器内)	無	1, 2
2	1 有 (1)	有 (整流器内)	無	3
	2 有 (4)	有 (整流器内)	無	4
3	1 有 (1)	無	有 (人体モデル全体)	5
	2 有 (1)	無	有 (人体モデル上部)	6
	3 有 (1)	無	有 (人体モデル下部)	7
4	1 有 (1)	無	有 (装置モデル風上側)	8
	2 有 (1)	無	有 (装置モデル天井面)	9

表-2 建物周辺気流および屋外拡散の実験条件

実験番号	対象建物条件	対象模型番号	建物配置条件	写真番号
1	単独建物	①		10
	単独建物 (屋外拡散)	①		11
5	単独建物	②		12
	単独建物 (ピロティー有)	③		13
6	複合建物	② ④		14
	複合建物	② ④		15

合建物の場合の実験条件である。実験5-1(2)は建物屋上中心に設置された煙突から排出速度1.0 m/s(排出速度比1.0)でトレーサーを拡散させる屋外拡散の可視化である。また、実験5-3はピロティーがある建物の場合である。複合建物の場合、建物間の距離は、実験6-1~6-2とも100 mmである。

### 2.5 撮影条件

ニコンF2を使用 F1.4 50 mm, F2.0 35 mm, シャッター速度1s 絞り開放 フィルムはコダックTri-X(4倍増感ASA1600)およびフジHR-1600(カラー)を使用。

## 3. 実験結果

### 3.1 室内気流および粉塵拡散の可視化

#### 3.1.1 実験1について(写真-1, 2)

室内になにも設置しない場合の可視化写真を写真-1, 2に示す。写真-1は模型全体を撮影したものであり、吹出口から出た気流は左側の壁面にぶつかり下降し床面に沿って吸込口に戻ってくる様子が良くわかる。吹出口の直後は、気流速度が速いためトレーサーの個々の粒子は撮影されていない。吹出口の下部では吹込口に戻る流れの一部が上部の噴流に誘引されていく様子が観察される。写真-2は左上隅の近接写真である。小さな渦が多数可視化されており、室内の乱流状態が良く観察される。目視による観察では、小さな渦が生成され消散していく様子が一層明確に観察される。

#### 3.1.2 実験2について(写真-3, 4)

写真-3は室内床中央に装置モデルを1個設置し(実験2-1)その周辺を近接して撮影したものである。装置モデルの左側(風上側)と右側(風下側)に定在渦が形成されている様子が観察される。また装置モデルにぶつかった流れは上方に押し上げられ、装置モデルの上方で吸込口へ水平に向かう気流と上部の噴流域に誘引される気流とに別れる。写真-4は床に装置モデルを4個設置し(実験2-2)、左側の3個を近接して撮影したものである。装置モデルと装置モデルの間に定在渦が形成されているのが非常に良く観察される。また、左側から装置

モデルにぶつかった流れは装置モデルの上で大きな渦を形成している。

#### 3.1.3 実験3について(写真-5, 6, 7)

写真-5は、人体モデルの全面からトレーサーを発塵させた場合の可視化写真である。発塵する際の吹出し速度は人体モデルを構成する金属メッシュの全面から吹出しているためほとんど0 m/sと考えて良い。人体モデル全面から全方向一様に発塵されたトレーサーのうち左側の下の部分は装置モデルとの間に形成された渦に巻き込まれ、装置モデルの上面まで達する。また右側に吹出されたトレーサーは上方の噴流域への誘引流に拡散されるものと吸込口に向かう流れに拡散されるものとに別れる。写真-6は人体モデルの上部からトレーサーを発塵させた場合の可視化写真である。上部側面から全方向一様に吹き出されたトレーサーは装置モデルとの間に巻き込まれることなく拡散され、上方の噴流域に向かっていくものと、下方の吸込口に向かっていくものとに別れる。写真-7は人体モデル下部からトレーサーを発塵させた場合の可視化写真である。写真-5と同様に、下部から装置モデルの側に発塵したトレーサーは定在渦に巻き込まれ装置モデルの上面に達する。

#### 3.1.4 実験4について(写真-8, 9)

写真-8, 9はそれぞれ室内床中央において装置モデルの左側壁面、上部天井面よりトレーサーを発塵させた場合の可視化写真である。発塵させる際のメッシュ面上の吹出し速度は3.1.3と同様にほとんど0 m/sと考えて良い。左側壁面(風上側)から発塵させた場合(写真-8)には装置モデル上部の渦に拡散され、一部は上方の噴流域へ向かう流れに拡散し、一部は吸込口に向かう流れに拡散される。上部天井から発塵させた場合(写真-9)には装置モデル右側の渦に拡散されるものと上部吹出噴流への誘引流に拡散されるものとに別れる。

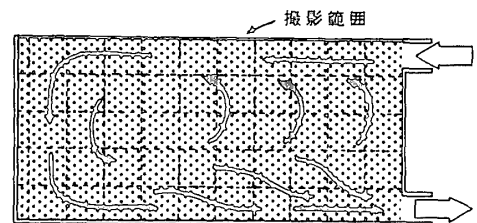
### 3.2 建物周辺気流および屋外拡散の可視化

#### 3.2.1 実験5-1について(写真-10, 11)

単独建物①を対象とした場合の建物周辺気流の可視化写真を写真-10に示す。建物の風上側(左側)と風下



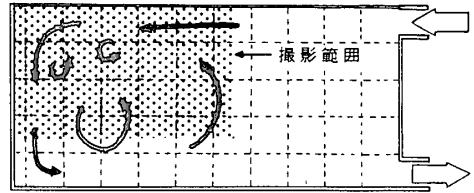
写真-1 実験1(全体)



実験条件  
吹出風速 1.0m/s 吹出Re数 4900  
ニコンF2 F1.4 50mm  
コダック Tri-X 4倍増感(ASA1600)  
シャッター速度 1s 絞り開放



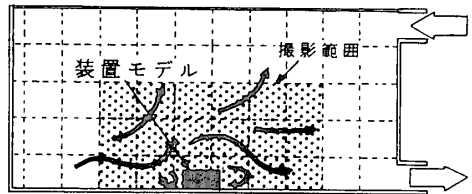
写真一2 実験1 (左上部分)



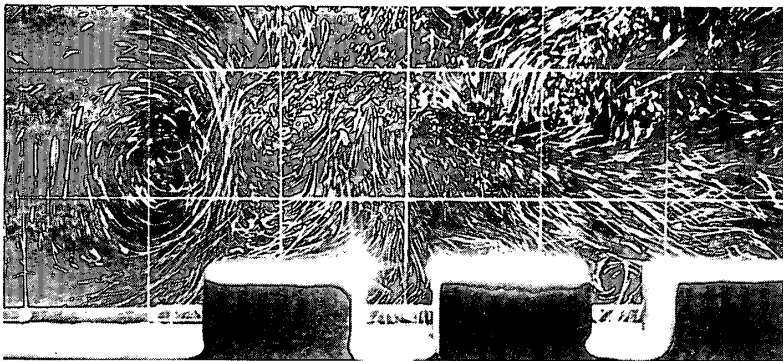
実験条件  
 実験1に同じ、フィルムのみフジHR-1600  
 吹出口から出た気流が左側の壁面にぶつかり  
 下降しながら多数の渦を形成している様子が  
 明確に観察される。



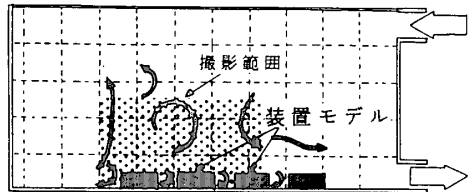
写真一3 実験2-1 (部分：装置モデル回り)



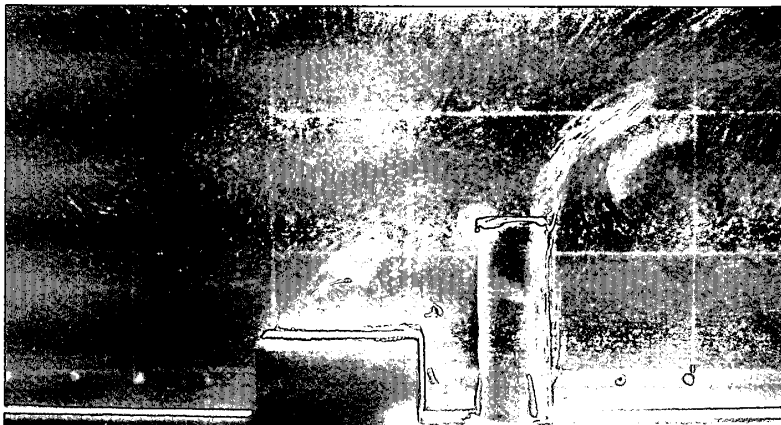
実験条件  
 実験1に同じ、フィルムのみフジHR-1600  
 装置モデル左側からの気流は装置モデル上方  
 に斜めに押し上げられる。装置モデル前面お  
 よび後方には定在渦が生じる。



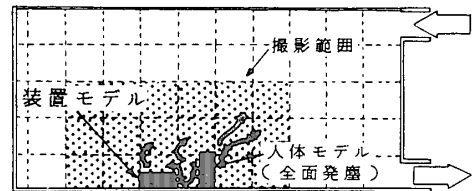
写真一4 実験2-2 (部分：装置モデル回り)



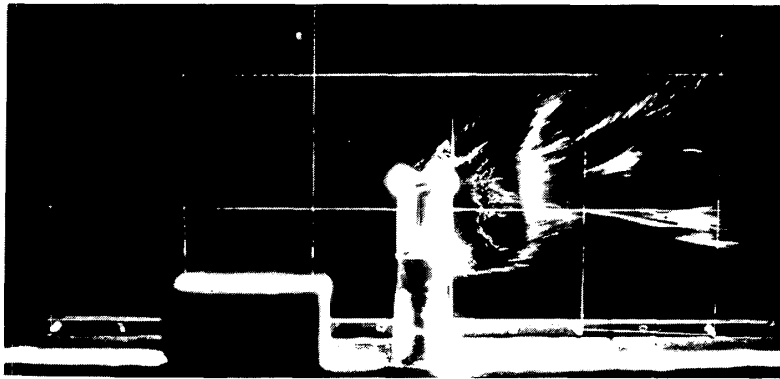
実験条件  
 実験1に同じ  
 装置モデル左側からの気流は装置モデル前面  
 でまっすぐ上方に押し上げられる。装置モデ  
 ル前面および各装置モデル間には定在渦が生  
 じている。



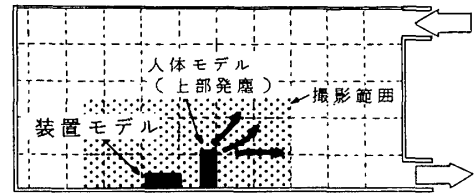
写真一5 実験3-1 (部分：人体モデル回り)



実験条件  
 実験1に同じ、フィルムのみフジHR-1600  
 人体モデル全面から発生させたトレーサのうち  
 左側の部分は装置モデルとの間の定在渦に  
 巻き込まれ、右側の部分は流れの後方に拡散  
 する。



写真一六 実験 3-2 (部分: 人体モデル回り)



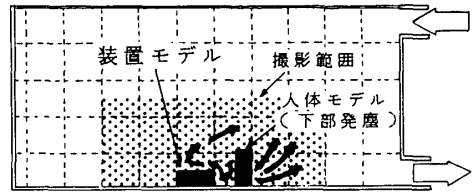
実験条件

実験 1 に同じ

人体モデル上部から全方向一様に吹き出されたトレーサーは、装置モデルとの間の定在渦に巻き込まれることなく、流れの後方に拡散していく。



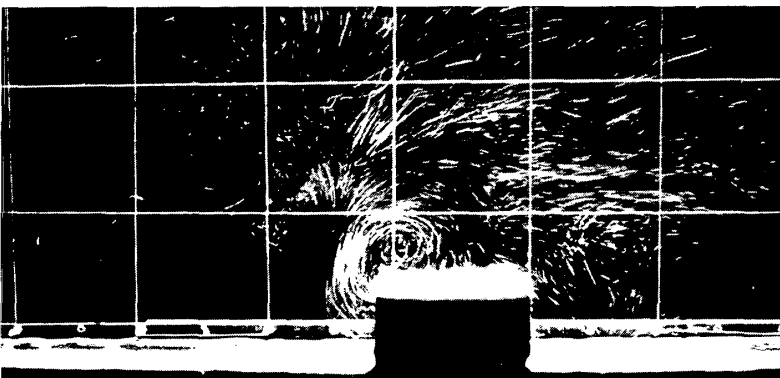
写真一七 実験 3-3 (部分: 人体モデル回り)



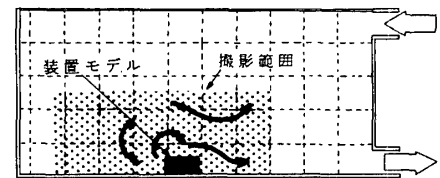
実験条件

実験 1 に同じ

人体モデル下部から全方向一様に吹き出されたトレーサーのうち左側の部分は装置モデルとの間の定在渦に巻き込まれる。



写真一八 実験 4-1 (部分: 装置モデル回り)



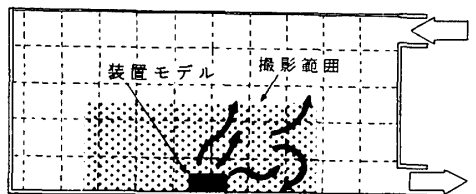
実験条件

実験 1 に同じ

左側壁面から発塵したトレーサーは、装置モデル上部の定在渦に拡散される。



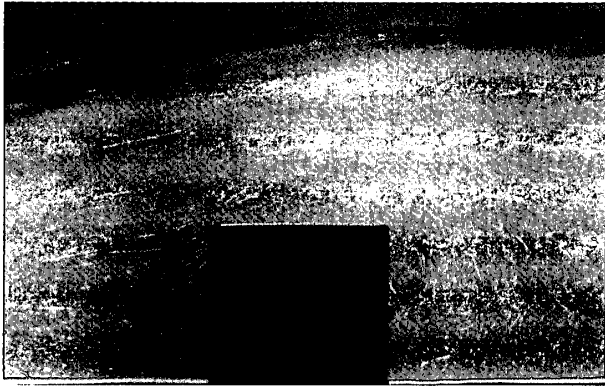
写真一九 実験 4-2 (部分: 装置モデル回り)



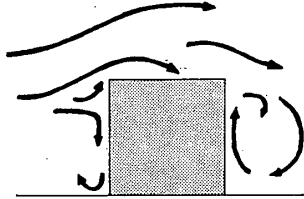
実験条件

実験 1 に同じ

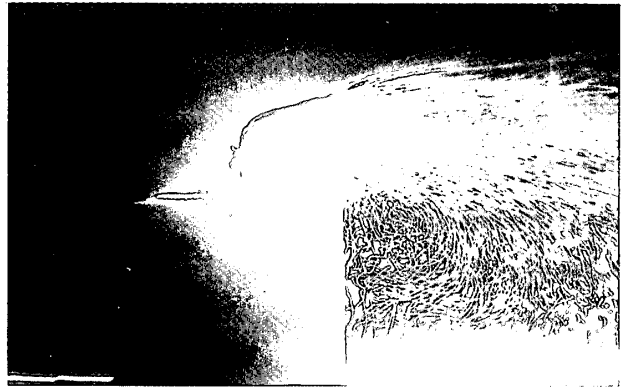
上部天井面から発塵したトレーサーは、装置モデル右側の定在渦に拡散するものと、上部吹出噴流に誘引される流れに拡散するものとに分かれる。



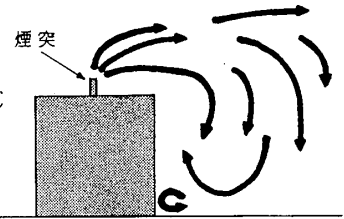
実験条件  
 風洞内自由風速 1.0m/s  
 ニコン F 2 F2.0 35mm  
 フジ HR-1600(ASA 1600)  
 シャッター速度 1s  
 絞り F2.8



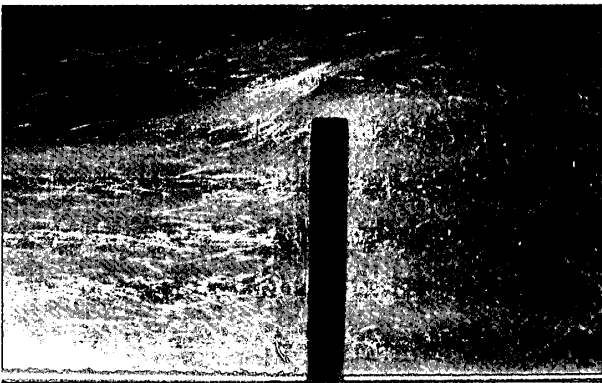
写真—10 実験 5-1(1)



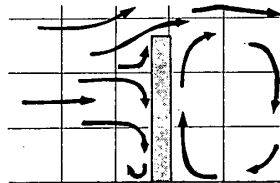
実験条件  
 排出速度 1.0m/s  
 その他は実験 5-1と同じ



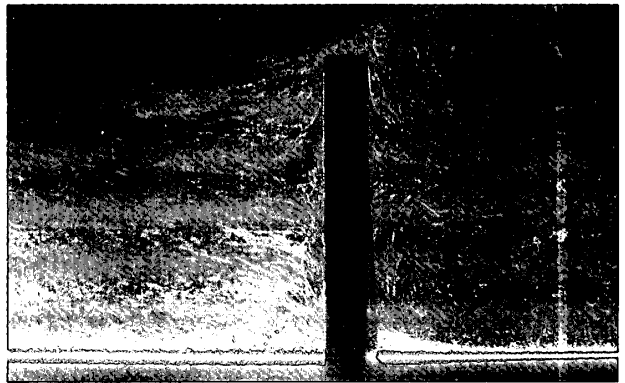
写真—11 実験 5-1(2)



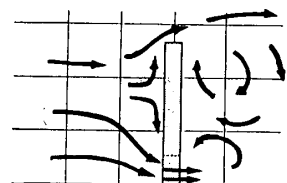
実験条件  
 実験 5-1と同じ



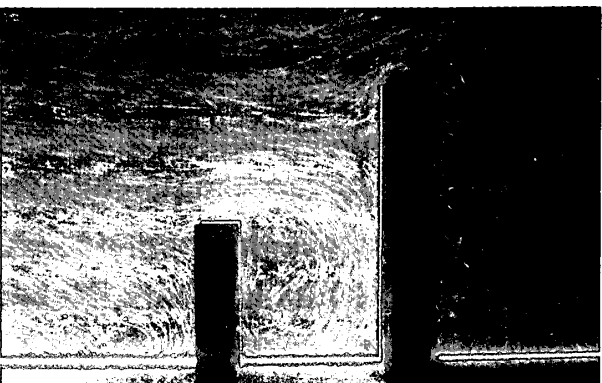
写真—12 実験 5-2



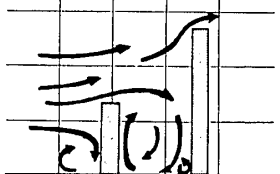
実験条件  
 実験 5-1と同じ



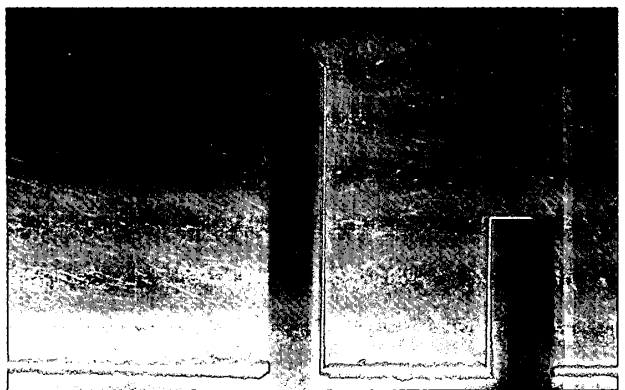
写真—13 実験 5-3



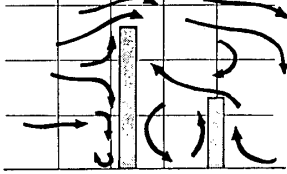
実験条件  
 実験 5-1と同じ



写真—14 実験 6-1



実験条件  
 実験 5-1と同じ



写真—15 実験 6-2

側(右側)に定在渦が形成されている様子が観察される。また、建物の屋根面で剝離した流れが再付着している様子も観察される。写真-11は、単独建物①の屋根中央に煙突を設け、そこから排出速度1.0 m/s(排出速度比1.0)でトレーサーを吹出した場合の可視化写真である。排出されたトレーサーが建物後流のウェーク内で回転流を生じている様子が明確に観察される。

### 3.2.2 実験5-2について(写真-12, 13)

単独建物②を対象とした場合と、ピロティーのある単独建物③(②の下部にピロティーを設けたもの)を対象とした場合の可視化写真をそれぞれ写真-12, 13に示す。ピロティーがない場合(写真-12)には、建物後流に時計回りの大きな渦が形成されている様子が観察される。また、ピロティーを設けた場合(写真-13)には建物風上側壁面での下降流がピロティー部分を通過して建物風下側下部に反時計回りの渦を形成し、上部には時計回りの渦が形成されている様子が観察される。

### 3.2.3 実験6-1, 6-2について(写真-14, 15)

建物模型②(高層建物)と④(低層建物)を組み合わせ写真-14に低層建物が風上側にある場合(実験6-1)写真-15に高層建物が風上側にある場合(実験6-2)の可視化写真を示す。実験6-1(写真-14)では、風上側の高層建物の壁面に沿った下降流が風上側に設置した低層建物との間に明確な定在渦を形成しており、この部分の風速が非常に速いことがわかる。実験6-2(写真-15)では明確な渦は観察されない。

## 4. 結論

LLSを光源とする乱流現象の可視化システムを開発し、何例かの可視化写真を撮影した。その結果

- ① レーザー光を利用した可視化システムにより、気流の微細な乱流構造の解析も可能な可視化写真が撮影できること
- ② 本可視化システムが、微粒子拡散現象の可視化にも応用できること

等が明らかとなった。なお、本可視化システムは室内乱流現象の可視化や建物周辺気流等の可視化に限らず、広く気体の流れ現象にかかわる可視化に応用可能である。

## 謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金の助成を受けて実施されたものである。また、実験に当っては、東京電機大学 大河洋志君、堀越敏行君の協力を得た。写真

の撮影に当っては東京大学生産技術研究所写真技術班岡宮誠一氏より撮影技術の助言を、フィルム処理については倉科満寿夫氏の協力を得た。関係各位に心から謝意を表する次第である。

## 本論文に関連する既発表論文

- 1) 村上周三, 加藤信介, 赤林伸一: レーザー光を用いた室内乱流の微細構造の可視化, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭和59年7月
- 2) 村上周三, 加藤信介, 赤林伸一: レーザー光を用いた建物周辺気流の乱流構造の可視化, 日本風工学会誌, 第21号, 昭和59年9月
- 3) 村上周三, 加藤信介, 赤林伸一: レーザー光を用いた室内乱流現象の可視化, 浮遊粉塵の拡散過程を中心として, 生産研究, 第36巻, 第10号, 昭和59年10月

## 参考文献

- 4) 浅沼 強編: 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 昭和52年3月
- 5) 勝田高司, 村上周三, ほか: 温風暖房時の室内気流の可視化, 流れの可視化シンポジウム, 昭和49年7月
- 6) 赤石光一郎, 古賀賢一: ヘリウムシャボン玉法による空気流の可視化, 流れの可視化シンポジウム, 昭和49年7月
- 7) 倉淵 隆, 加藤信介, 鎌田元康: 流入, 流出に圧力境界条件を適応した三次元乱流モデルによる数値解析及び実験, 建築環境論文集, 昭和57年1月
- 8) 大森正一, 植村知正: アルミ粉法による脈動噴流の可視化, 第8回流れの可視化シンポジウム, 東大宇宙航空研, 1980.7
- 9) 轉法論 圭: 環境実験用風洞装置の試作とその応用実験, 東海大学紀要教養学部, 1980(第11号)
- 10) Henri Maille: METHODE DE VISUALISATION QUANTITATIVE PAR CHRONOPHOTOGRAPHIE LASER, Proc. Colloque, Designing with the Wind, Nantes, 1981
- 11) Jacques Gandemer: Simulation and Measurement of the Local Wind Environment, Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications, Cambridge Univ. Press, 1983
- 12) J.L. Balint, M. Ayrault, et al.: Measurement of the Concentration of Aerosol Particles in Turbulent Flows through Laser Visualization Combined with Image Processing, 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTAMINATION CONTROL, 1982
- 13) 田中俊彦, 村上周三: 室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和57年10月



## SYNOPSIS

UDC : 551.5 : 628.85 : 624.042.4

### VISUALIZATION WITH LASER LIGHT SHEET APPLIED TO TURBULENT AIR FLOW IN BUILDING ENVIRONMENTAL ENGINEERING

by Dr. **SHUZO MURAKAMI**, Prof. of Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. **SHINSUKE KATO**, Lecturer of Institute of Industrial Science, University of Tokyo and **SHIN-ICHI AKABAYASHI**, Graduate Student, University of Tokyo, Members of A. I. J

It is hardly possible to visualize the details of turbulent air flow structure with the traditional visualization system. In order to visualize the detailed characteristics of turbulent air flow, the system with laser light sheet is designed. Air flow problems in building environmental engineering, such as turbulent air flow around buildings or dust diffusion in room model are visualized by means of this system. The source of light sheet is Argon ion laser (4 W) which is set on the traversing unit. The high power laser beam is changed into the light sheet by cylindrical lens. Powder of  $Mg_2CO_3$  is used as the particle tracer. The results are as follows.

- ( 1 ) With this system, it is possible to take photographs which clarify the fine structure of vortices in turbulent air flow.
- ( 2 ) It is also possible to visualize the details of dust diffusion process in room model or those of gas diffusion process from the building stack.