展望・解説

都市と建物の環境問題における

流れ場・拡散場の可視化*

村上周三** 赤林伸一***

Flow Visualization in the Field of Urban and
Building Environmental Engineering

Shuzo MURAKAMI and Shin-ichi AKABAYASHI

1. はじめに

一般に都市や建築の分野の流れ場を定性的に観察、解析したい場合、可視化手法は極めて有効であり、これは都市や建築分野の流れの問題にもそのままあてはまる。したがって、この手法は研究者以外の素人に流れのイメージを示す時や、工学教育の分野等でも有効に活用されている。可視化技術の歴史は古いが、都市や建築の分野では従来、煙やバブルを用いた可視化が行われ、主に全体の流れ場を把握することが目的であった。しかしながら、近年の可視化技術の発展は著しく、レーザ光と微粒子トレーサを用いた乱流現象の詳細まで可視化できるLLS(レーザライトシート)や流体の数値シミュレーション結果をコンピュータグラフィックスにより可視化する手法などが開発されており、これらを用いた流れ場の定量的な解析は、都市や建築の分野でも盛んである。特に、数値シミュレーションは、近年のスーパーコンピュータの著しい発達に伴い実用化されつつあり、画像処理用エンジニアリングワークステーションと組み合わせることにより複雑な乱流の様相が直感的に把握できる利点がある。本稿では従来からの方法を含めた都市・建築環境工学の分野で行われている可視化技術について紹介する。

2. 都市と建築の環境を構成する流れ場・拡散場

都市・建築環境の分野では、表1に示すような大小さまざまなスケールの流れ場・拡散場の問題が存在する。これらの中には比較的単純な流れも含まれているが、その多くは複雑な流れであり、主流の方向さえ把握し難いような場合も少なくな

表1 都市・建築の分野で対象とする流れ場の主要例

空間の スケール	具 体 例
ダクト	空調用ダクト内の流れ (直管, エルボ, 拡大縮小等) 煙突内の流れ 共用排気ダクト内の燃焼廃ガスの流れ
閉鎖的な 空間	室内気流(暖冷房時, 換気通風時等) 浮遊微粒子の拡散(クリーンルーム等) フード周辺の流れ(厨房, 高温工場等)
半閉鎖的 な空間	アトリウム内の気流 (排煙時, 換気時等) バルコニーにおける気流 (強風時, 火災時等)
建物周辺	建物周辺で発生する強風 換気用モニター周囲の気流 煙突, 排気口等からの建物 周辺への熱や汚染質の拡散
市街地, 都市	市街地の風環境計画 工場等からの排気ガスの拡散 自動車排ガスの拡散 逆転層の形成に伴う汚染質の滞留

* 原稿受付 1989年10月23日

** 正会員 東京大学生産技術研究所

*** 正会員 新潟大学工学部

表2 都市・建築の分野で用いられる主な可視化手法

方 法	内 容
油膜法, 風砂法, 変色法	表面流の可視化
タフト法 (タンポポ冠毛小旗, 絹糸等)	流線の可視化
トレーサ法Ⅰ (線香の煙, 四塩化チタン, 流動パラフィン)	流跡線の可視化
トレーサ法Ⅱ ①バブル, メタアルデヒド+一般の光源 ②金属等の微粉末+LLS	経路線の可視化
コンピュータグラフィックス	上記のすべてが可能

い。流れの可視化はこのような複雑な流れ場や拡散場の様子を直観的に理解する上で極めて有効である。表2に都市・建築環境工学の分野で用いられる可視化手法の代表例を示す。気流の可視化にはさまざまな手法が用いられるが、最も多く用いられるのはトレーサ法である。対象とする気流の性状あるいは可視化の目的によりトレーサを選択する必要がある。それぞれの手法に関する詳細は文献1), 2) に詳しいのでここでは割愛する。

3. 屋外の流れ場, 拡散場の可視化

高層ビルの周辺では、いわゆるビル風と呼ばれる強風が吹く場合が多い。これは、高層ビルが建

設されることによって地上付近の局所的な風速が速くなる現象である。建物周囲の強風の問題とは逆に、煙突からの汚染質の拡散や道路上での自動車からの排気ガスの拡散等はビルに囲まれた弱風領域で問題となる。本章ではこれらの問題に対して各種の可視化手法を適応した例を紹介する。

(1) 風砂法, 小旗法による地表面の流れの可視化 (文献1), 3))

風砂法では使用する砂の粒径により飛散状況が異なりその選択が重要なポイントとなる。本郷, 石川³⁾ は、各種の粒径を持つケイ砂を用いて比較的単純な建物周囲の地表面の流れの可視化を行っている。写真1 (文献3)) に立方体モデルを対象

風洞床面に粒径をそろえた砂を1mm程度の厚さに均一にまき、砂の飛散風速と風洞内風速の比を変化させて表面流を可視化した例。風速の速い部分は $V_s/V_R=1.2$ で砂が飛散し、風速の遅い部分は $V_s/V_R=0.7$ で砂が飛散しており表面流の風速分布が可視化される

写真1 風砂法による立方体モデル周辺の地表面流の可視化 (V_s : 砂の飛散風速, V_R : 風洞内風速)

サーミスタ風速計により、砂をまいた状態で地表面上1mmの風速分布を測定した例。写真1で可視化された風速分布とほぼ同様のコンタが得られる

図1 立方体モデル周辺の風速分布
(地盤面上1mmで測定)

とした可視化結果を、図1にサーミスタ風速計で測定した風速分布を示す。風洞内風速と砂の飛散風速の比を変化させることにより風速計で測定した風速分布とほぼ同様の地表面流の可視化を行うことができる。写真2(文献1))は筆者らが小旗法により複合建物周辺の地表面気流を可視化したものである。小旗法では風向分布のみ可視化されるが、全体の流れのパターンは極めて明確に表現される。

(2) 煙を用いた可視化(文献1)、谷地、奥田(京大防災研)

煙を用いた可視化は、比較的簡単な可視化装置で流れの全体の様相を把握することが可能であり、建築の分野でも極めて数多くの実験、実施例がある。写真3は谷地、奥田がドライアイスミストを用いて連立した角柱回りの気流を可視化した例である。風上側の角柱から放出されたカルマン渦が下流の角柱と連成する流れ場の様子が観察される。写真4(文献1))は筆者らが高層建物周辺の流れを四塩化チタンの煙により可視化した例で

H型配列の複合建物周辺の地表面流の風向を発泡スチロールの小旗を用いて観察した例。建物が近接して複数建設されると流れ場は極めて複雑になる。建物と建物の間や建物後流では激しい風向変動が生じ小旗が振動している

写真2 小旗法による複合建物周辺の流れ場 (Re 数 $= 4.2 \times 10^4$)

ドライアイスミスト法により角柱周辺の流れ場を可視化した例。風上側の角柱より放出されたカルマン形の渦が風下側の角柱の正面の両端付近に交互に当たり、その角で渦がさらに同方向に回転を得て、外側の流れによって押し出される。この時、風下側角柱周辺の流れ場は角柱からの渦放出に伴う蛇行した流れに支配され、風下側角柱自体からの渦放出は観察されない

写真3 角柱周辺の気流の可視化 (Re 数 $= 2.4 \times 10^3$)

ある。さらに、写真5(文献1))は市街地のビルの煙突から排出された煙の拡散の様子を可視化したものである。

四塩化チタンを風上壁面と屋根面に塗布し発煙法によって超高層建物周辺の流れ場を可視化した例。建物上部で発生する剝離流が観察される

写真4 高層建物周辺の流れ場の可視化
(Re 数 $=3.4 \times 10^3$)

地域暖房プラントの煙突から放出される高温排ガスの熱汚染を煙により可視化した例。煙突から排出された煙が蛇行しながら上昇していく様子が観察される

写真5 地域暖房プラントからの高温排ガスの拡散状況の可視化 (Re 数 $=2.0 \times 10^3$)

(3) LLS を用いた可視化 (文献6))

レーザ光を用いた可視化技術はこの分野でここ数年間に急速に発展し、多くの利用例がみられる。写真6は筆者らが単独の高層建物周辺気流をLLSにより可視化した例であり、この分野のLLS利用の先駆けとなったものである。写真7はピロティーを持つ高層建物の周辺気流を可視化した例である。ピロティー部分を吹き抜ける極めて強い風が吹いていることが可視化されている。写真8、9は高層建物が複合されて建設された場合の可視化結果である。高層建物が風下にある場合、高層建物と低層建物の間に生じる時計回りの

高層の建物周辺気流を LLS（レーザーライトシート）で可視化した例。屋上面での剝離流や建物後流の循環流などが明確に観察される

写真6 単独の高層建物周辺気流
(LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

ピロティー部分を強風が吹抜け建物後流に反時計回りの渦が形成されている様子が観察される

写真7 ピロティーを持つ高層建物周辺気流の可視化
(LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

風上側に高層建物がある場合には建物間の流れ場は比較的静穏であり、明確な循環流は観察されない

写真8 複合建物周辺気流① (LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

渦が明確に観察されている。写真10は立方体建物の屋上に設置された煙突から排出された汚染質の

風下側に高層建物がある場合には、建物間に明確な循環流が生じ、この部分の風速が極めて速いことが観察される
写真9 複合建物周辺気流② (LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

煙突から放出された煙が屋上面の剝離流によってなぎ倒され建物後流の渦に巻き込まれる様子が観察される
写真10 立方体モデル屋上の煙突から煙の拡散状況 (LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

道路で発生した排気ガスはいったん風上側の建物壁面にぶつかりながら上昇し、上空に拡散していく様子が観察される
写真11 市街地の道路で発生したガスの拡散状況 (LLS, Re 数 $=1.4 \times 10^4$)

拡散を LLS により可視化した例である。さらに、写真11は市街地の道路で発生したガスの拡散を可視化したものである。どの可視化例もレーザ光を光源とし、金属の微粉末をトレーサとすることに

より微細な乱流構造を含めた極めて明瞭な可視化画像が得られており、従来の煙や光源を用いる方法に比較してレーザ光を光源とする可視化手法が有効であることを示している。

(4) コンピュータグラフィックを用いた可視化 (文献11), 12))

都市・建築の分野でも、流体の数値シミュレーションを利用した周辺気流や室内気流の解析が活発に行われている。数値シミュレーション結果は単なる数値の羅列にすぎないのでこれをコンピュータグラフィックスを利用して画像表示する方法の研究がなされている。図2 (文献11)) は河井が渦点法により計算を行った円柱周りの気流分布を図示したものである。円柱の背後に平板を設置した場合と設置しない場合の気流分布の相違が明確である。また、写真12 (文献12)) は筆者らが立方体モデル周囲の気流を数値シミュレーション (Large Eddy Simulation) により計算し、そ

円柱の後ろに平板を設置するとカルマン渦の形成領域が下流に後退する。平板が長くなるにつれて円柱近くでの流れが妨げられ渦形成領域が後退するが、平板の長さが円柱の直径の $1/2$ 以上になると渦形成領域の後退は止まる

図2 数値シミュレーション (渦点法) による円柱周辺のカルマン渦 (D : 円柱の直径 L : 円柱の後ろに設置した平板の長さ)

(1) 鉛直面でトレーサを発生させた場合

(2) 水平面でトレーサを発生させた場合

建物前方で各時刻毎に粒子を連続的に発生させた場合の粒子の位置を示した例。建物側面や後方の渦の巻き込みの様子が再現されている

写真12 数値シミュレーション (LES) とコンピュータグラフィックスによる立方体モデル周辺の流れ場

の結果をコンピュータグラフィックで可視化した例である。このような可視化手法を用いることにより、マーカの個々の動きに着目した観察をすることができただけでなく流れ全体のマクロな動きを観察することも可能となる。

4. 室内の流れ場を同時に可視化する手法 (文献4)、5))

通風は夏季の室内の環境を評価する上できわめて重要な要素である。しかしながら通風性状は建物形状、開口条件、建物周囲の条件等により大幅に異なり、これらを定性的に把握するために可視化手法により検討することは有効である。写真13 (文献4))は煙風洞を用いて集合住宅の通風性状を可視化したものである。ここでは、煙の流線の数から通風量を定量的に調べる試みを行っている。写真14、15 (文献5))は通風時の独立住宅の室内外気流をLLSにより可視化したものである。室内に生じる通気輪道が明確に観察されている。

5. 室内の流れ場の可視化

室内気流の可視化は極めて数多く行われている

写真13 通風時の集合住宅における室内外的流れ場
(煙風洞)

天窓を持つ独立住宅の通風時の室内外気流を LLS で可視化した例。屋根面での剥離流や後流の渦が明確に観察される

写真14 通風時の独立住宅における室内外的流れ場
(LLS, 鉛直断面, Re 数=10⁴)

室内で形成されている通気輪道(風速の速い部分)や循環流とともに側面での剥離流が観察される

写真15 通風時の独立住宅における室内外的流れ場
(LLS, 水平断面, Re 数=10⁴)

が(文献7)~10)等)、本章では筆者らが行ったクリーンルーム内の流れ場をLLSを用いて可視化した例(文献8)、9))と厨房用レンジ上の熱対流を可視化した例(文献10))を紹介する。写真16、17は層流型クリーンルーム内に設置された装置近

作業者が直立している場合には装置上面の気流がスムーズに流れている様子が観察される

写真16 層流型クリーンルーム内の流れ場（装置近傍で作業者が直立した場合、LLS, Re 数 $=7 \times 10^3$ ）

作業者が前かがみになると、装置上面での気流が大きく乱れ、作業者の頭部で渦が発生する。この渦は、装置上面の汚染質の滞留を招くことになる

写真17 層流型クリーンルーム内の流れ場（装置近傍で作業者が前かがみになっている場合、LLS, Re 数 $=7 \times 10^3$ ）

傍に作業者がいる場合の可視化結果である。作業者の姿勢が装置上部の流れに大きな影響を与えている。写真18は、乱流型クリーンルーム内に机を設置した場合である。机の下部では気流が激しく乱れており、この中で汚染質が発生すると室内に滞留し排出され難いことがわかる。写真19は電気レンジ上に形成される熱対流を煙をトレーサとして可視化したものである。レンジとフードの相対的な位置がずれると廃気の捕集率が極端に低下する様子が観察される。

6. まとめ

都市・建築の分野で比較よく使用される可視化手法とその可視化例について紹介した。本稿で紹介した以外にも各分野で各種の可視化手法が開発されており、これらを都市・建築の分野に応用

机の下部では極めて強い乱れが生じ、この部分に滞留した汚染質が排出されにくいことが分かる

写真18 乱流型クリーンルーム内に机を設置した場合の流れ場（LLS, Re 数 $=7 \times 10^3$ ）

(1) フード中心 (2) フード中心より10cm (3) フード中心より20cm (4) フード中心より30cm

フード中心に電気レンジが設置されている場合には煙はスムーズに排出されるが、電気レンジ位置がフード中心よりずれてくると捕集されずにフード外にもれる煙が多くなってくる

写真19 電気レンジ上の熱対流の気流性状

していくことが今後の大きな課題の一つである。特に、コンピュータを利用した可視化画像処理技術(CAFV)は得られた可視化画像を定量的に解析することが可能であり、今後の発展が期待できる分野である。

可視化は、その分かりやすさ、美しさゆえ専門家以外を対象とする各種のジャーナリズムに取り上げられる機会が多くなっている。都市・建築の分野でもこの利点を活かし、可視化技術の発展を促進していく必要があると考える次第である。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、筆者以外に河井宏允(東京電機大)、谷地義人、奥田泰雄(京大防災研)、山下 浩、西岡利晃、斉藤孝雄(大林組技研)、本郷 剛、石川友久(鹿島建設技研)の各位から写真をご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 小峰裕己: 流れの可視化で何がわかるか (5. 土木・建築), 流れの可視化 Vol. 1, No. 1 (1981. 4)
- 2) 村上周三, 持田 灯: 都市・建築の分野における最近の流れの可視化技術の動向, 流れの可視化 Vol. 6, No. 23 (1986. 10)
- 3) 本郷 剛, 石川友久: 砂の飛散から何がわかるか (建築における砂の飛散実験), 流れの可視化 Vol. 3, No. 11 (1983. 10)
- 4) 山下 浩, 西岡利晃, 斉藤隆雄: 煙風洞での気流の可視化による建物の通風の研究, 流れの可視化 Vol. 6, No. 22 (1986. 7)
- 5) 村上周三, 赤林伸一: LLS を用いた乱流の微細構造の可視化 (通風時の建物における室内外気流の可視化), 流れの可視化 Vol. 6, No. 22 (1986. 7)
- 6) 村上周三, 赤林伸一: レーザライトシート (LLS), 流れの可視化 Vol. 7, No. 25 (1987. 4)
- 7) 秋山光庸, 酒井 勇, 他: 立方体空間の換気に関する基礎実験, 流れの可視化 Vol. 3, No. 10 (1983. 7)
- 8) 村上周三, 加藤信介, 他: 層流型クリーンルーム内気流のレーザライトシートによる可視化, 流れの可視化 Vol. 5, No. 17 (1985. 7)
- 9) 村上周三, 加藤信介, 他: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内気流のレーザライトシートによる可視化, 流れの可視化 Vol. 6, No. 22 (1986. 7)
- 10) 村上周三, 赤林伸一: 住宅用厨房レンジ上の廃気上昇流の可視化とフードの捕集率, 流れの可視化 Vol. 9, No. 34 (1989. 7)
- 11) 河井宏允: 円柱からの渦放出とその制御について, 流れの可視化 Vol. 8, No. 30 (1988. 7)
- 12) 村上周三, 日比一喜, 持田 灯: Large Eddy Simulation による建物周辺気流の3次元数値解析, 日本建築学会計画系論文報告集 No. 360 (1986. 2)