特集2・大気拡散モデル、風洞実験と環境アセスメント

風洞実験からみた自動車排ガス対策

上原 清*

キーワード：都市の高層化、通風阻害、沿道大気汚染、ストリートキャニオン、高架道路

1. はじめに

我が国で沿道大気汚染が社会的に注目されるようになったのは、1970年に新宿区牛込柳町交差点付近に発生した鉛公害事件以後のことである。

このとき、集団健康診断によって交差点付近の住民の多くに鉛中毒が発見された。原因はガソリンに添加された鉛によるものと推定された¹⁾。実際、その後に行われた観測で牛込柳町交差点における鉛や一酸化炭素濃度が他の交差点よりも高いことが確認されている²⁾。

この事件で興味深いのは、日交通量が他と比べて特に多いともいえない交差点（調査³⁾を行った139地点のうち122位）で高濃度の大气汚染が生じていたことである。この原因は交差点一帯が風通しの悪い谷間にあるためと推定された。たしかに、片側2車線の大久保通りは外苑東通りと交差するあたりで最も低くなる。谷筋を走る外苑東通りは片側一車線とはいえ常に渋滞が激しく、商店街は道路を隙間なく取り囲んでいる。こうした状況からは、付近一帯の通風が悪く大気汚染物質が滞留しやすい地形であることが容易に想像できた。

これは、沿道の通風阻害が高濃度の大気汚染の発生に深く関与していることを示唆する最初の事例であったともいえる。

2. 都市の高層化と通風阻害

牛込柳町の出来事から30年あまりが経過した。今、都市域の通風阻害拡大が懸念されている。

東京都における1965年以降の高層建物竣工件数

の推移⁴⁾（図-1）をみると、1990年以降に竣工した高層建物の数が全体の70%近くを占めている。こうした市街地の高層化が都市の風速低下の原因のひとつであることが指摘されている⁵⁾。

特に、市街地の中高層建築は用途地域制などの建築制限によって幹線沿道に偏在する傾向が強い。風速の低下は幹線沿道を中心に進行している。自動車技術が向上し排ガスに含まれる大気汚染物質の量が大幅に減少しているにもかかわらず、沿道の高濃度大気汚染問題がいつこうに解決されない背景には沿道の通風環境悪化があるものと考えられる。

一方こうした現状と逆行するように、最近よく風の道という言葉を目にする。もともとは、夜間の放射冷却によって生じる斜面の冷気流を市街地に積極的に導入して、ヒートアイランドや大気汚

図-1 東京都における高層建物竣工件数の推移
(東京都建築統計年報⁴⁾より作成)

A discussion on the roadside air pollution from the viewpoint of wind-tunnel experiments

* (独) 国立環境研究所 PM2.5 DEP 研究プロジェクト都市大気保全研究チーム Kiyoshi UEHARA

染などを緩和しようとするドイツ発の都市計画技術のひとつである。我が国でもまちづくりの基本計画に風の道をうたう自治体があり、都市環境の改善にもっと積極的に風を利用しようとする傾向がうかがえる。

たしかに、大気汚染濃度は風速に反比例して増減するので、市街地に積極的に風を導き入れて通風を良好に保つことができれば沿道大気汚染濃度の低減が期待できる。実現すれば、きわめて合理的な環境改善手法となる。しかし、斜面に沿って吹き下ろす重たい冷気流を制御しようとするドイツ式の風の道に比べると、平坦な市街地の流れを建物や道路の配置によって制御するのはそれほど容易でない。

本稿では、従来、国立環境研究所で行ってきた風洞実験の結果を中心に市街地の建築状況と通風・沿道大気汚染の関連について概説し最後に、風洞実験を行っている立場から通風を積極的に利用した自動車排ガス対策の可能性について述べる。

3. 沿道大気汚染と市街地の建築状況

3.1 ブロック模型を用いた風洞実験の結果

どんな街並みのときに沿道大気汚染が高くなるのかを調べるために、市街地を単純な形状のブロック模型で置き換えて拡散実験を行った⁶⁾。同じ大きさのブロックを建物に見立てて基盤の目状に配置し、建物の高さや風向を変化させながら市街地全体の大気汚染濃度を調べた。実験では、模型市街地の道路においた特殊なパイプから自動車排ガスの代わりにトレーサガス(エタンガスを窒素で20%に希釈)を排出して濃度分布を測定した。

ある物質の濃度は発生量とそれを希釈する空気の流れで決まる。風洞実験の相似則が満たされていれば、ガスを希釈する気流は実物と模型で相似になる。トレーサガスの濃度分布を実験によって明らかにすれば、実際の大気汚染物質についてはその発生量から濃度を予測することができる。

3.1.1 交差点の濃度分布

図-2に交差点の濃度分布をしめす。左は交差点周囲の建物高さ(H)がすべて同じ場合($H=L$:道路幅Lは一定)、右は道路幅の3倍高さの建物が風下に建つ場合である。測定高さは $1/10L$ である。実験風向はいずれも矢印(左から右)の

(左図：すべて同じ高さの建物、右図：風下に高層建物＝道路幅Lの3倍高さ、がある場合)

図-2 交差点内部の濃度分布⁶⁾

向きである。点線はトレーサガス排出用のパイプの位置を示している。塗りが濃いほど濃度が高いことを示している。

すべての建物高さが同じ場合(左図)には、両方の道路からの寄与が重なり合う交差点中央で濃度が高くなる。風上と風下の建物に挟まれた道路(ストリートキャニオン)では、前後の建物間に生じる渦(キャビティ渦)によって道路の汚染物質が風上に運ばれ、風上側建物に近い位置に高濃度が生じている。

交差点の一角に周囲よりも高い建物がある場合(右図)には、建物によって上空の風がせき止められ地上に流れ込むので居住域の風速が増加する(ビル風)。このために建物近傍の濃度が低下する。

3.1.2 交差点周辺市街地の濃度分布

単独高層建物の影響によって風速が増加して沿道濃度が低下するのは、せいぜいその建物高さと同程度の距離までである。しかし、濃度分布に与える影響はもっと遠くまで及ぶ。図-3では周辺市街地の建物がすべて同じ高さ(H_s)の場合(左上の図、 $H_s=1/2L$:道路幅Lは一定)と、交差点一角の建物(H)が周辺の2, 4, 8倍高さになったときの交差点周辺市街地の濃度分布を比較している。

図より、交差点建物が高いほど周辺市街地の高濃度域が広がることがわかる。建物近傍の汚染物質がビル風によって押しのけられて周辺に拡がるためである。

最近数を増している大規模な高層建築が周辺市街地の沿道大気汚染に対してどの程度影響を及ぼしているかは今のところ不明であるが、少なくともその影響はビル風が生じるような狭い範囲にはとどまらないはずである。

(左上：すべての建物が同じ高さ $H = H_s$ の場合，右上： $H_s \times 2$ 高さの建物がある場合，左下： $H_s \times 4$ ，右下： $H_s \times 8$)
図-3 交差点一角の高層建物が周辺市街地の濃度分布に及ぼす影響⁶⁾

3.1.3 市街地全体の高さによる濃度の変化

もちろん，沿道大気汚染濃度は単独の大きな建物だけではなく，市街地全体としての建築高さや風向によっても変化する．実験結果を図-4に示す．縦軸は交差点周辺市街地の平均濃度 (C_n)，横軸は建物の高さ (H) と道路幅 (L ：一定) の比率である．実験は道路と風向が一致（もう一方とは直交）する場合を0度とし，1/32方位（11.25度）ごとに45度まで5段階に変化させている．

図より，建物の高さが道路幅よりも大きくなる ($1 < H/L$) と大気汚染濃度の増加が急になる．逆に，建物が低く ($H/L < 1/2$) になると濃度は低下する．市街地の建物高さにばらつきがある場合には，

図-4 市街地全体の建物高さおよび風向と交差点周辺市街地の平均濃度 C_n との関係⁶⁾

建築高さが一様なときよりも風通しが良くなるという報告⁷⁾がある．しかし一般には道路幅が広いほど風通しはよく，建物が高くなれば悪くなる．

この実験結果で興味深いのは，道路と平行に風が吹く風向0度のときのほうが，斜めからあたる風向45度や，37.5度のときより大気汚染濃度が高いことである．道路と平行に風が吹くとき，必ずしも市街地の風通しがよくなるとはいえない．

3.2 実在市街地（東京都世田谷区上馬交差点）の模型を使った風洞実験^{8~10)}の結果

3.2.1 幹線道路沿道の濃度分布

実市街地では風向・風速や大気安定度が変動するばかりでなく，交通量，車種構成，渋滞の度合いなど様々な条件が変化する．風洞実験ではこれらを現実のとおり再現することはできない．逆に，風洞実験は不規則に変化するこれらの量を適切な値に固定し，現象をより単純に模擬する．種々の要因の影響を切り分けて詳しく調べることによって，現象を深く理解することができる．

この実験では，道路各車線のトレーサーガス総排出量を道路交通センサスに基づく NO_x 総排出量から，また，交差点前後での排出強度分布を交通流シミュレーションによって推定したものにあわせている．

幹線道路に風が直交する時（風向SE）の濃度分布を図-5に示す．等高線と建物の塗りが濃いほど高濃度であり，建物が高いことを表している．沿道濃度は周囲の建築状況によって大きく変化する．概して道路両側（特に風上側）の建物が高ければ濃度は高く，周囲が開けている場合に低くなる．結果は省略するが，この傾向はどの実験風向の時にも同じである．

この事例の場合には紙面の横方向に走る国道246号上を高架の首都高速3号線が覆蓋している．高架道路が地上道路幅の約半分を覆っている．当初は高架道路の存在が幹線沿道の濃度分布に与える影響は少なくないものと考えたが，意外にも高架道路の有無による濃度の差は小さかった（図は省略する）．この理由は高架道路断面が扁平であることに加えて，その位置が道路両側の建物によって囲まれたストリートキャニオン流れの障害になりにくい場所であるためと考えた．

風向 SE：道路と直交，国道246号線の上を高架の首都高速3号が覆蓋し，二重構造になっている

図-5 実在幹線道路周辺の濃度分布（測定高さ1.5m：実スケール）⁹⁾

3.2.2 ストリートキャニオン内部の流れと濃度分布

図-5の中に一点鎖線aで示した場所の鉛直断面(ストリートキャニオン)濃度分布は図-6(I~III)のようになる。Iはトレーサガスを地上道路だけから出した場合，IIは高架道路だけから出した場合，IIIは高架道路がないときに地上道路から出した場合である。図に書き入れた曲線の矢印はストリートキャニオン内部の流れを模式的に表

している。実市街地の排出強度に合わせるために，高架道路と地上道路からの排出量の比を2.7：1としている。IIで高架道路上の濃度が高いのはこのためである。IとIIの濃度を加えあわせると現況の濃度分布になる。IとIIIを比べると高架道路の存在による濃度のちがいがわかる。

高架道路がないとき(III)地上の汚染物質はキャビティ渦に巻き上げられてストリートキャニオン全面に広がるが，高架道路がある場合(I)

I：地上道路だけから排出

II：高架道路だけから排出

III：高架道路がないとき

図-6 ストリートキャニオン内(図-5で一点鎖線aで示した断面)の流れと濃度分布⁹⁾

には高濃度が高架道路下の部分に限定され、むしろ測定断面全体の濃度は(Ⅲ)よりも低い。これは地上の大気汚染物質が高架道路によって上昇を阻まれ、拡散せずに建物の横から下流に流れ出てしまうためと考える。このとき、ストリートキャニオンの外に出た汚染物質は、建物側面を吹き抜ける強い風によって急速に希釈されるので高濃度にはならない。

一方、高架道路上から排出された汚染物質は高架道路の上部で形成されるキャビティ渦によってストリートキャニオン上部に運ばれ(図Ⅱのiで示した矢印)、上空風と混合希釈(ii)された後にキャニオン内部に再循環(iii)する。高架道路下に降下するときには(iv)濃度はかなり低下している。

こうした高架道路の存在影響は道路周囲の建築状況によって変化するものと考えるが、この実験の範囲内では高架道路による地上濃度の増加はほとんどみられなかった。また、別途行ったブロック模型を用いた実験によって、種々の条件下(高架道路が2重、3重になった実験は行っていない)でストリートキャニオン内部の高架道路の影響を調べたが、一部の特殊な条件をのぞけば、ほぼ同様の結果を得た。これらについては別の機会に報告する。

4. 地上交通を高架道路にバイパスすることによる地上濃度の低減

高架道路上からの汚染排出はストリートキャニオン断面内においても地上濃度をそれほど増加させない。高架道路が地上の道路を覆蓋することによる濃度の増加も大きくない。また、ここでは述べていないが幹線沿道における高濃度のほとんどは地上の道路からの排出寄与によるものである⁸⁾。以上のことから、地上高濃度の主たる発生源である地上の交通を高架道路にバイパスさせることによって、地上の高濃度を低減できると考える。有効煙突高さを増せば地上濃度が低下するのと同じことである。

高架道路に用いたのと同じ排出量の線源(トレーサーガス排出用のパイプ)を高架道路のない地上に置いたときの図-5、a断面における地上濃度と、現況の高架道路、その1.5倍高さ、2倍高さの高架道路においたときの地上濃度を比較して図

図-7 高架道路の有無および高架道路の高さによる地上濃度の変化⁹⁾

ー7 (□) に示す。図より、排出源が高架道路上にあるとき (He = 1) の地上濃度は、地上から同じ量を排出した時 (He = 0) の約1/10である。高架道路の高さが1.5倍、2倍と増すほど地上濃度は低下する。

ただし、高架道路上に排出源がある場合には風上側の建物壁面に高濃度を生じる可能性がある。図-7 (○) には、同じ実験条件のときの風上側建物壁面の平均濃度の変化を示している。図より、高架道路上に排出源があるときの建物壁面の濃度は、地上排出時におけるその1/2程度である。これは、高架道路下部から上昇する低濃度(図-6Ⅱのviで示した矢印)が高架道路上の高濃度との間にエアーカーテンのように流れ込み、混合するためと考えられる。

5. む す び

沿道高濃度は大気汚染物質の強い発生と風通しの悪さ、その両方が重なり合ったときに発生する。どちらかの要因を改善することによって濃度の低減を図ることができる。

前項4.で述べた方法は、地上の強い排出源を高架道路上に待避するという意味では発生源の除去にあたる。地上よりも強い高所の風によって、高架道路からの大気汚染物質を早く拡散させるという点では通風を積極的に利用する手法ともいえる。

現在提案されている排ガス対策手法には、土壤によるもの、光触媒を利用したものなどがある¹¹⁾。いずれも大気中の汚染物質を除去することによって沿道の高濃度を低減しようとするものである。

これらを効率よく稼働させるためには適所に配置して、拡散が進む前のできるだけ高い濃度の大气汚染物質を捕集しなければならない。このためには、事前に沿道の通風と大气汚染濃度分布の関連を知っておく必要がある。

これらの情報を提供するものが風洞実験の役割であるが、まだ個別の問題に対応するのに十分な蓄積はない。今後とも風と沿道大气汚染の関連について検討を続けたいと考えている。

謝辞：本稿に目を通してくださった(財)石油産業活性化センターJCAP推進部・森川多津子博士、日産自動車総合研究所動力環境研究所・吉川康雄博士ならびに国立環境研究所・神田勲博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 瀬戸 博ほか：都民の血中、尿中鉛量について－1970年代における年次推移と地域差－，東京都衛生研究所年報，47，219-224 (1996)
- 2) 永田倫子ほか：都内11交差点における鉛濃度と一酸化炭素濃度，東京都公害研究所年報，2，44-61 (1971)
- 3) 警視庁交通年鑑，昭和45年度版，38-44
- 4) 建築統計年報2001年版，東京都都市計画局，128-163
- 5) 藤部文昭：アメダス地点における風速観測値の経年変化，天気，50，45-48 (2003)
- 6) 上原 清：交差点周辺の大气汚染濃度分布に関する風洞実験，日本建築学会計画系論文集，第485号，25-34 (1996)
- 7) 成田健一：街区，公園緑地を通る風を計画するには，建築技術，2002年8月，149
- 8) 上原 清ほか：実在交差点周辺の大气汚染濃度分布に関する風洞実験，大気環境学会誌，37 (6)，343-356 (2002)
- 9) 上原 清ほか：実在幹線道路沿道の大气汚染濃度分布に関する風洞実験，大気環境学会誌，38 (6)，358-376 (2003)
- 10) 上原 清ほか：交差点周辺の大气汚染濃度分布に関する風洞実験，国立環境研究所研究報告 第178号，179 (2003)
- 11) 伊藤ほか：沿道における局地的環境対策について，(財)国土技術研究センター研究報告 JICE REPORT (2002)

パラグアイの環境保護教育 (連載)

ゴミ処理計画 (8)

小 海 英 夫
(シニア海外ボランティア)

パラグアイの産業は農業と牧畜業が主で工場生産の類はほとんどなく、電力消費量もわずかで済む。だからイタイブやスレタ水力発電所で得る電力の大部分をブラジルとアルゼンチンに売って、その売上金が国庫に入る金額の大きな部分を占めている。パラグアイには工場の煙突はほとんどないが、大气汚染に関しては車の排ガス規制がないので、車の排ガスによる心配がある。ディーゼル車は年々かなりの勢いで増えているので都市部ではすでにかなり大気汚染は進行している。

勉強会では各地域の住民がどのような農薬をどれだけ使用しているのか、農薬の空容器や一般ゴミをどのように処分しているのかを知るためにアンケート調査をすることにした。質問事項を検討し、各地域のカウンターパートが学校の生徒を使ってアンケート用紙を各家庭に配布した。私はカピタンミランダのカウンターパートと一緒に学

校めぐりをして配布と回収のお手伝いをした。

カピタンミランダ市には国立高校が1つと小学校が19校ある。中学校は高校と小学校のいくつかに併設されている。通学路は舗装されていない。天気がよい日は舞い上がる土煙でほとんど前が見えなくなる。車窓の隙間から侵入してくるホコリで、呼吸困難になりそうである。雨が降ると道がぬかるんで車輪がスリップして通行不可能になる。4輪駆動の車でどうにか通れるが、当然生徒も教師も休むほうが多いようである。我々も天気のよい日ばかりを選んで出かけた。小学校は生徒数が数十人、教師数は校長と2人のケースがもっとも多い。複式学級が多く、授業は学年別に午前中か、または午後だけである。そうして2人の先生で全学年の授業をやり繰りしている。

ある先生から、授業中に農薬散布をされることがあり風向きによって教室に農薬が入ってくることがある。生徒の健康が心配だと訴えられた。我々はカピタンミランダ市の市長にその状況を伝えて、授業中の農薬散布を禁止する手立てを要求した。

まもなく市長と市議員達が協議し、学校の近傍では授業中には農薬散布を禁止するという規則ができた。その結果農民達がこの規則を守るだけでなく農薬の危険性を常時意識するようになったことは大きな成果の一つである。