

高解像度大気汚染モデルによる道路交通政策評価システムの構築

東京大学生産技術研究所	教授	桑原雅夫，助手	田中伸治
東京大学生産技術研究所	教授	加藤信介，助教授	大岡龍三
東京大学生産技術研究所	教授	池内克史，助手	影沢政隆

1. はじめに

本研究は、交通シミュレーション、3次元都市モデル、および大気拡散モデルを融合して、時間的・空間的に変化する道路周辺の大気環境を推定する高解像度大気汚染モデルを構築し、道路政策評価に資するものである。本システムは、大気汚染物質排出量と濃度に関する時間解像度を10~30分、空間解像度を10~100m程度の達成を目標として、劣悪な汚染状況下にある地点を特定して、そこを救うことができる対策立案・評価に有力な手法となる。

本システムの構成、研究手順は次の通りである。

交通シミュレーション適用および排ガス量の推計

対象地域の道路インフラおよび交通関連データを収集し、交通シミュレーションを実施する。その際、モデルパラメータを調整して交通状況の現況再現性を確認する。シミュレーションモデルの出力から自動車排ガス量を推計する。

3次元都市モデル

3次元デジタルデータ、道路図面、航空写真等から3次元都市モデルを構築する。

汚染濃度関連の実観測

道路からの汚染物の発生による大気汚染濃度の分布を対象地域における実測により収集する。

汚染濃度の模型実験

3次元市街地模型を用いて風洞実験を行い、沿道大気汚染の特徴を明らかにし、更に汚染の拡散構造を詳しく検討する。

汚染物拡散のCFDシミュレーション

3次元の実市街地モデルを入力し、大気安定度、風向変動を考慮したCFD（数値流体解析）シミュレーションを行い実測、風洞実験結果と比較・検討するとともに様々な条件の下で汚染物拡散の性状を予測可能な予測モデルを作成する。

2. 対象地域

京浜地区を縦貫する大型車混入率の高い道路上のA交差点を中心とする半径500メートル地域を対象地区とする（図2.1参照）。

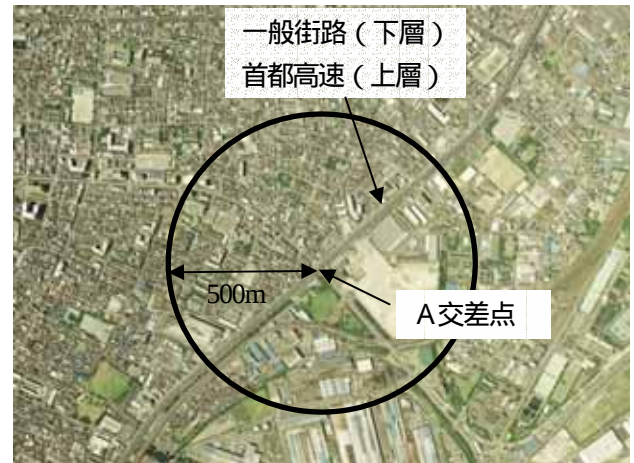


図 2.1 A 交差点周辺

3. 交通シミュレーションと排ガスモデル

3.1. 交通シミュレーション

交通解析の対象地域は、上記の半径500m地域よりもやや広範囲を対象とした。この広範囲の地域において、道路幾何構造、交通制御データを収集するとともに、平成15年9月3日の朝・夕ピーク時に各3時間ずつ対象地域及びその周辺の14交差点において交通量調査を実施した。調査項目は、10分ごとの交差点各流入路別の方向別・車種別交通量である。

交差点の車種別・方向別交通量に基づいて、OD交通量を推計し、シミュレーションモデルに AVENUE（図3.1）の入力データとした。また、ネットワークデータについては、デジタル道路地図データを用いた。AVENUE に内在するパラメータは、出力される方向別交通量が観測結果と一致するようにキャリブレーション



図 3.1 AVENUE の対象地域計算画面

した．AVENUE の出力から対象地域の各リンクの交通量が出力されるので、それを 1 時間単位に集計した．

図 3.2 には、キャリブレーションとされたパラメータを用いた AVENUE を用いて出力されたリンク交通量と観測交通量との関係を示す．

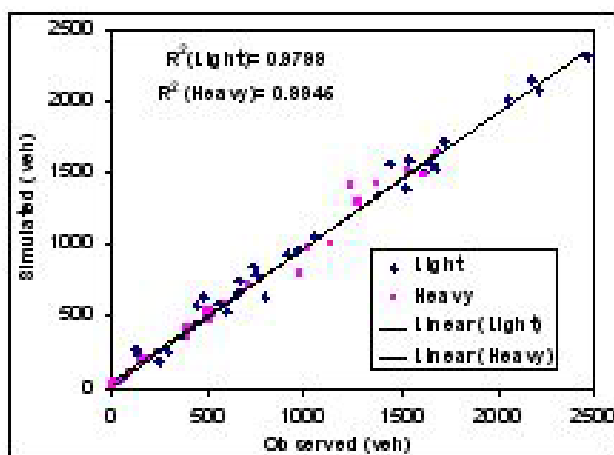


図 3.2 AVENUE 計算リンク交通量と観測交通量

3.2. 排ガス推計モデル

いくつかの交通シミュレーションの中には、個々の車両の運動挙動（速度・車頭距離・加速度など）を直接的にモデル化し、その動的な変動を出力可能なものも存在するため、こうした「車両の運動挙動」から直接的に排出ガスを推計しようとする手法も考えられている．しかしながら、これらの交通シミュレーションが表現しようとしている交通流現象は、あくまでも渋滞・旅行時間・経路交通量などの動的変動現象であり、個々の車両の加減速などを、排出ガス量が適切に評価できるまで詳細に再現できるかどうか、大いに疑問が残るところである．

小根山¹⁾は以上のような背景から、交通シミュレーションで得られる信頼できる情報として、直線近似された走行軌跡図を入力として、NOx 排出量モデルを提案している．一般モデルでは、車両の加減速挙動を詳細に求めようとしているのに対し、本モデルは排ガスを説明する 4 つの変量を車両ダイナミクスから定義し、この 4 変量を走行軌跡図から求める方法であって、より排ガスを推計するのにふさわしい方法と考えられる．

シャシダイナモ台上試験で記録された車両の走行パターンから直線近似された車両軌跡を生成し、この軌跡を提案モデルのインプットデータとして NOx 排出量を 10m 単位で推計した結果を図 3.3 に示す．停止

位置周辺の排出強度及びその空間分布についても平均的に見ると比較的よく再現しているといえる．

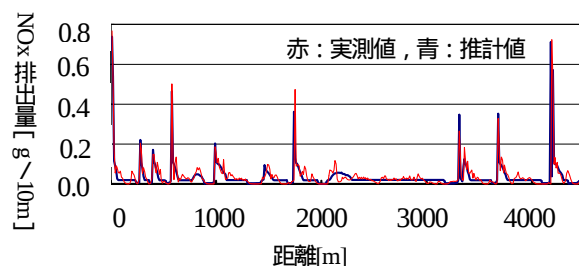
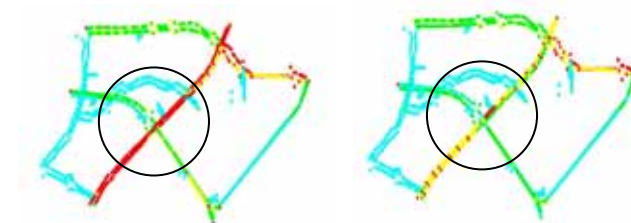


図 3.3 NOx 排出量の実測値と推計値

本モデルを A 交差点周辺に適用し、シミュレーションモデルの出力から、20m 区間ごとに 1 時間単位で NOx 排出量と CO 排出量を、一般街路と首都高速道路 1 号線について推計した．



NOx 排出量		CO 排出量	
水色	0.0 ~ 2.0 [g/m/hr]	水色	0.0 ~ 0.5 [g/m/hr]
黄緑	2.0 ~ 4.0 [g/m/hr]	黄緑	0.5 ~ 1.0 [g/m/hr]
黄色	4.0 ~ 6.0 [g/m/hr]	黄色	1.0 ~ 1.5 [g/m/hr]
赤	6.0 ~ [g/m/hr]	赤	1.5 ~ [g/m/hr]

図 3.4 NOx, CO 排出量（午前 9 から 10 時）

4. 3 次元都市モデル

3 次元都市モデルは、後に利用する大気汚染シミュレーションで利用されるため、比較的単純な形状で作成し、また、必要なフォーマットで出力できる必要がある．今回は、3D モデリングには既製品である 3D studio Max を利用した．それは、このソフトウェアが以下で我々が必要とするフォーマットの入出力が可能だからである．

4.1 詳細 2 次元地図の利用

通常の建物は、垂直方向に立っているのので、建物の上空からみた形状がわかれば、これに垂直な多面体としての実装が可能である．こうした詳細都市モデルは多数あるが、ここでは、次節で必要となる階高情報が記載されているゼンリンの Zmap town を利用することにした．

また、こうした地図には、高さ情報が記載されてい

ないので、道路勾配等の情報が不足している。しかしながら、現地調査の結果、今回対象となる地区に限って言えば高さの違いは無視できる程度であることがわかったので、地表の高さは一定であると仮定した。

さて、Zmap town のデータを GIS ソフトウェアで読み込み、これを SED フォーマットで書き出す。SED フォーマットは GIS を基礎としたテキストファイルであり、建物ごとにその位置、輪郭形状、階高情報が記載されている。

4.2 階高情報を利用したモデル作成

そこで、階高情報がある地図を用いて、2次元の形状に対して、例えば、1階あたり5mとして建物を構築する。すなわち、建物は、高さを付加した多面体（各パッチは三角形）としてポリゴンモデルを作成した。この際建物の接地点は高さ0mであると仮定した。

4.3 詳細地図にない部分の付加

こうした地図は住宅地図の拡張であるので、道路の形状や高架道路、およびその橋脚というようなデータは含まれていない。また、道路の周囲にある、標識や看板、樹木、ガードレール等のデータもない。ただし、今回の研究目的には、これらの詳細なデータは、樹木を除いては必要なかったため省略した。樹木については、常緑樹であれば作成する必要があったが、現地調査の結果、落葉樹であることが確認された。大気汚染のシミュレーションには、落葉樹は考慮する必要がないため、今回のモデル構築からは除いた。

首都高速道路については、首都高速道路公団より図面を入手し、橋脚の形状や道路を 3D studio Max を用いて作成した。作成した3次元都市モデルの（一部の）鳥瞰図を下図に示す。図中にある、黒い部分が高速道路であり、それ以外の白い部分が2次元地図から本手法で自動生成した3次元都市モデルである。

本手法は、一般に階高情報がある2次元デジタルマップが利用できるエリアには適用可能である。高架道については、図面が必要であるが、今回利用したモ

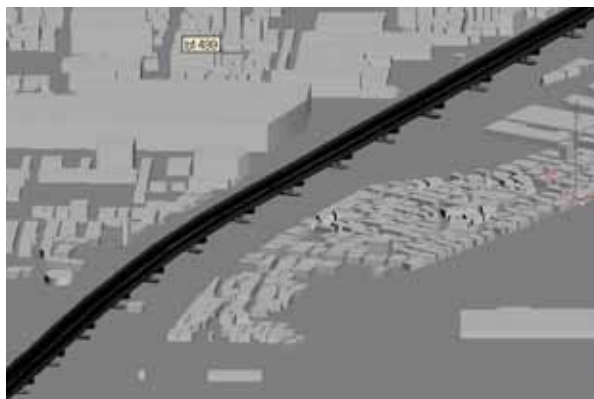


図4.1 3次元都市モデル完成図

デルを利用すれば比較的短時間で他のエリア（渋谷区、港区、中央区等）にも適用できると考えられる。

4.4 将来展望

本手法は、このままでは、建物の実際の高さや細かい形状を再現することはできない。また、2次元地図にない高架道路等の情報も取得することができない。

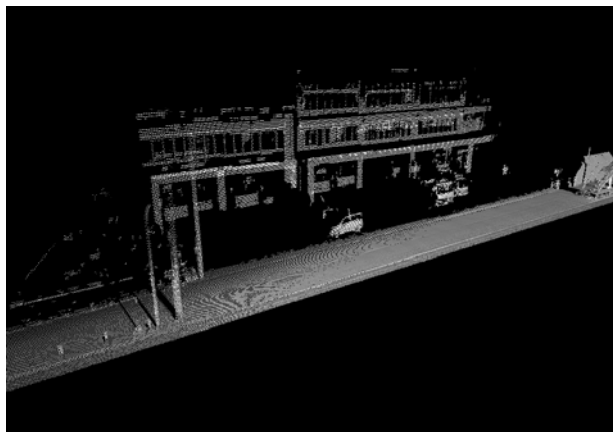


図4.2 レンジセンサによる街の計測例

そこで、現在では、高精度レーザセンサを搭載して詳細な3次元形状（高さを含む）を取得し、この結果を粗い2次元地図とマッチングさせることで大雑把な位置は2次元地図を利用し、その詳細形状や高さについては、レンジセンサから取得したデータを利用する、という手法を開発中である。本手法を用いれば、道路周囲のガードレールや歩道、標識、歩道橋といったもののモデルの作成も可能であると期待されている。図にレンジセンサを車両に積載してA交差点の消防署前を走行して得られた3次元データを示す。これからわかるとおり、消防署の輪郭データとマッチングすれば、建物の詳細形状をあたえることが可能であり、また歩道や電柱等の情報も取得可能であることが期待される。

4.5 まとめ

以上、大気汚染シミュレーションを前提とした3次元都市モデル構築手法について述べた。後で行うシミュレーションで扱いやすいように、なるべく簡易なモデルを作成することを目的とし、既存の2次元地図を利用することにした。ただし、既存データベースにないものは図面からモデルを作成した。この結果、非常に安価かつ容易に街の3次元モデルを取得することができた。今後は、この3次元モデルを仮想空間としたビジュアライゼーション手法や、あるいは、今回は取得できなかった、あるいは、手動で作成した部分を自動取得するような方法を開発していく予定である。

5. 大気汚染解析

5.1 汚染濃度予測に関する風洞実験

実験方法 (1)風洞 東大生産研の風洞。測定部の断面 1.8m×2.2m、長さ 16.5m。(2)模型 交差点を中心に半径 510m の市街地を縮尺 1/600 で再現。(図 5.1)。(3)垂直風速分布 $U \propto Z^{1/4}$ とする。(4)濃度測定 トレーサーガス(C₂H₄)を点源より排出し、各位置の濃度を全炭化水素分析計により測定する。排出位置は幹線道路の上下線、高架高速道路の上下線各 1 点を 1 組とし、5ヶ所(図 1 中の A～E)に設け、そのうちの 2ヶ所から実験風向に対応して個別に排出する。(5)風向 卓越風向である S、SW、N と、対象とした道路に直交する SE、NW の 5 風向。(6)測定点と測定高さ 地上高さ 1.8m で合計 139 点。(7)大気安定度 原則として中立とする。風向 SE については安定、不安定の場合も行う。

実験結果 測定結果は無次元濃度 $C_n = CUH^2/Q$ で表す。ここで C は測定濃度、H は高架道路高さ(=1.33cm)、U は H に相当する高さでの風速(=0.42m/s、中立時)、Q はトレーサーガス発生量(=1cc/s)である。ここでは風向 SE、大気安定度が中立時の例を示す。

無次元濃度分布 (1)風向 SE、排出口：地上幹線道路上り線(B1) (図 5.2) 排出されたガスは道路沿いの建物に遮られ、道路に沿って横方向に大きく拡がる。また、排出されたガスの一部は高架道路下のフェンスが作り出す負圧域に吹き寄せられる。高架道路上まで巻き上げられるように拡散したガスは高架道路の側壁で剥離する流れによってさらに上方に運ばれる。排出口直後の歩道では $C_n=0.35$ を示すが、約 35m 風下では 0.06 となり、風下への濃度減衰は非常に大きい。

(2)風向 SE、排出口：高架道路上り線(D2) 高架道路上で排出されたガスは大部分が上方に拡散され、地上に及ぼす影響は大変小さい。最高濃度は排出口直下ではなく、約 50m 風下側で 0.027 であった。

拡散状況の可視化 写真 1 (風向 SE、排出口 B4 (地上、下り線))：排出口風下の高架下フェンスに遮られ、ガスは高架道路を跨ぐように、上方にジャンプし、風下方向の上空へ流れていく。

トレーサーガスの点源発生による拡散実験を行い、発生源の風上、風下に建物群やフェンスがある場合には排出直後から横方向の拡がりが大きくなることがわかった。また、高架道路からの排出の影響は地上からの排出に比べ小さい。

5.2 風洞実験に基づく実際の汚染濃度予測

濃度予測方法 ここでは近似モデルとして実験結果

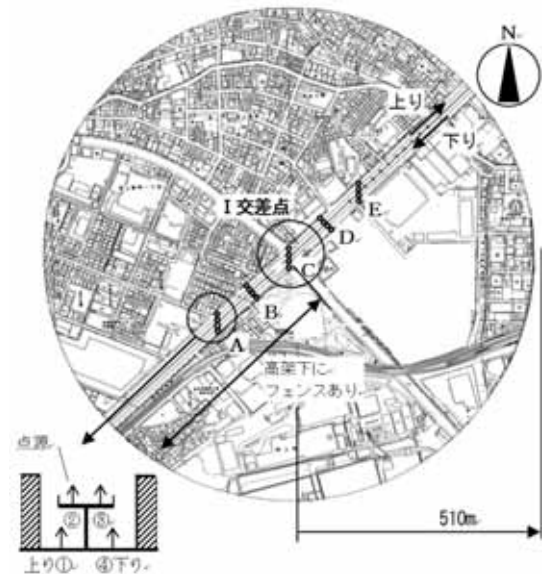


図 5.1 模型範囲とトレーサーガス発生点

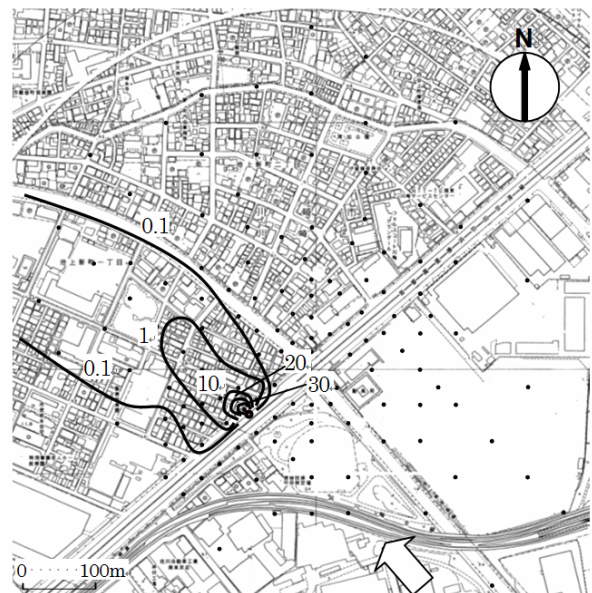


図 5.2 無次元濃度分布 ($C_n \times 100$ で表示)
(風向 SE、排出口：地上幹線道路上り線(B1))



写真 1 拡散状況の可視化
(風向 SE、排出口：幹線道路下り線(B4))

に対してガウス拡散を適用し、任意の点の濃度予測式を作成しこれを重ね合わせて線源の場合の任意の点での濃度予測を行う。

汚染濃度の予測 汚染質発生量 2003 年 9 月 3 日午前を対象として、CO、NO_x の発生強度は 2 の排気ガスモデルに基づいた。

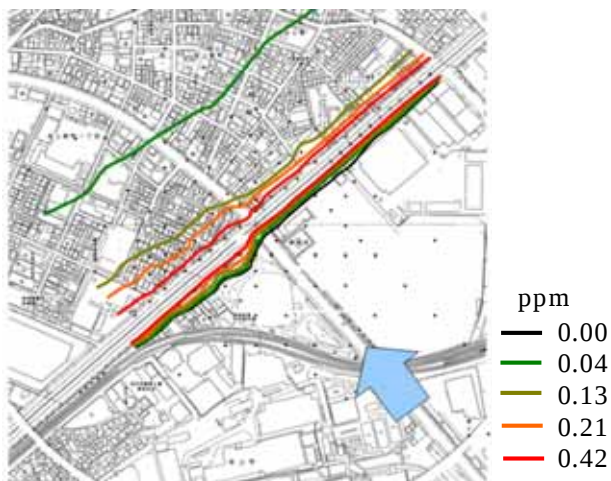


図5.3 風洞実験によるNO_xの予測例 (高さ1.8m、SE風向)

予測結果 風向 SE における NO_x の予測結果を図 5.3 示す。フェンスのある場所では、発生源の風上側でも濃度が確認でき、フェンスのない場所では風上側には濃度がたまらずに風下側へ流れていく様子がわかる。また、発生源から少し距離が離れると濃度はすぐに減衰することがわかる。

5.3 CFD シミュレーションによる汚染物濃度予測

計算概要 計算領域は交差点を中心に、幅 1,550m × 1,400m、高さ 100m の範囲である。このような複雑市街地において CFD 解析を行うには、非構造格子の使用が有効である。ここでは、黄らが開発した複雑形状に対応する屋外温熱環境解析手法²⁾を利用した。国土交通省の地形データ及び別途得られる建物データを利用して形状を確定し、これより約 1,830,000 メッシュの非構造格子を作成した。乱流モデルは標準 k-ε モデルを用いた。2003 年 9 月 3 日午前を対象として、計算を行った。

結果及び考察 図 5.4 に高さ 1.8m における風速スペクトルの水平分布を示す。図 5.5 に NO_x 拡散性状の結果を示す。風速は高架道路の南東側の建物密度の低いところでは 1.4~1.6m/s 程度、北西側の建物密度の高いところでは 0.2~1.0m/s 程度である。交差点近傍では、フェンスがないため風がよく通る。また、高架道路下にフェンスのある箇所において、かなり減衰することが分った。高架道路の下、風速の弱いところに、汚染質が滞留し易く、NO_x濃度が 1ppm 以上になる場所がある。フェンスのある場所に NO_x が風上側に拡散されることが分かる。これはフェンスの風下側に渦が生じるためと考えられる。また、汚染質が風下側に拡散され、300m ぐらい離れた場所に 0.1ppm に減衰となる。図 5.3 と比べ、発生源から離れたところで

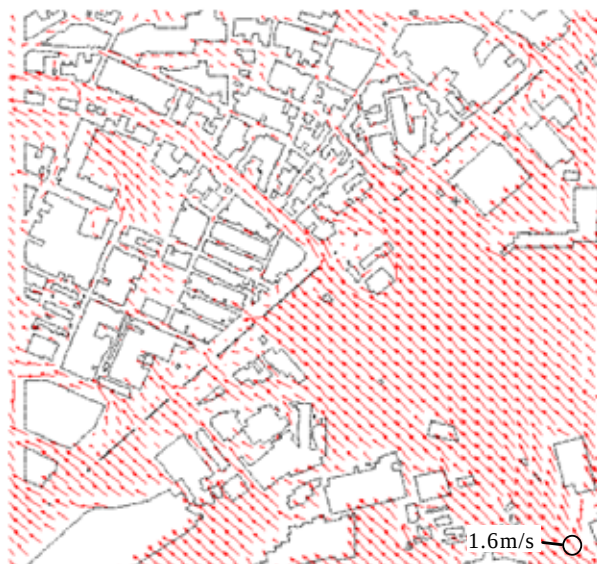


図5.4 風速スペクトル水平分布 (高さ1.8m、SE風向)

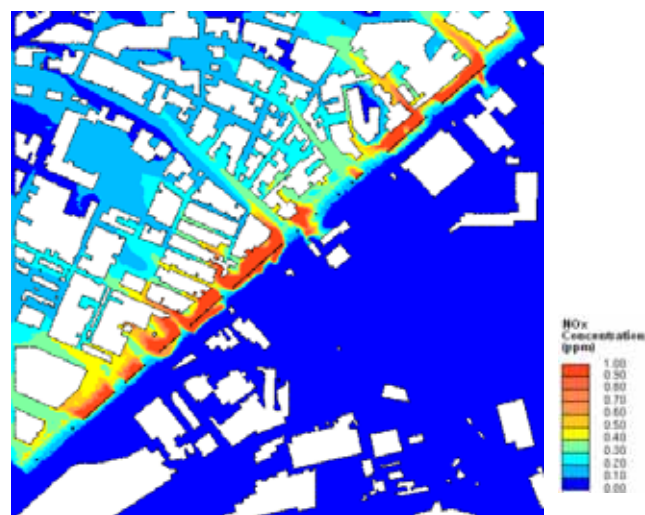


図5.5 CFD によるNO_xの予測例 (高さ1.8m、SE風向)

は概ねに一致しており、CFD 解析の精度を確認している。また、CFD 解析により発生源付近では建物やフェンスなどの影響を精度良く表現することができた。

参考文献

- 1) 小根山裕之, 大口敬, 桑原雅夫 : 交通流シミュレーションを用いた排出量推計手法に関する考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, CD-ROM, 土木学会, 2003-06
- 2) 黄, 大岡, 加藤他 : 実測とシミュレーションによる新宿地域冷暖房周辺地区の温熱環境評価(その2) 複雑形状に対応する屋外温熱環境解析手法の開発と冷却塔排熱の環境影響評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 651-652, 2004.8