### 10-NA20

## 市街地における風・温熱・光・音環境総合数値予測データベースの開発

### 坂本雄三(東京大学)

概要 本研究の目的は、オープンソースソフトウエアを活用した都市街区レベル総合環 境予測コードの開発、および当該コードを使用した実市街地解析技術の開発、解析結果 のデータベースの整備である。予測項目としては熱・空気環境、音環境などが挙げられ る。現在までの達成状況は以下である:(1)実際的事例として、新潟県長岡市を対象とし て、実市街地数値地形データからの数値解析用形状生成、CFD 解析用および音響解析用 格子生成技術開発を行った。(2)当該格子を使用して風環境評価を行い、街区建物の屋 根形状再現が重要であることを示した。(3)気流による音響伝搬の影響を考慮可能な音 響解析コードを開発し、(2)で行った風環境評価のための CFD データを入力として音環 境解析を行い、風の影響を考慮する意義を示した。(4)実市街地における住宅の通風解析 のために、地形や建物形状を再現した風環境解析を行なった。今後の課題は、風環境予 測に関しては計算領域周辺の地形や建物を考慮した流入・流出面の境界条件の設定と斜 め屋根形状の再現であり、音環境予測にあっては解析周波数の向上と実験データとの照 合による解析コードの検証である。

### 1. 研究の目的と意義

ヒートアイランド対策、都市道路交通騒音問題、 日照権問題など、現在の我が国市街地においては 解決すべき建築・都市環境工学的課題が山積して いる。それら課題の解決には、現状把握としての 環境要素マッピング技術、および将来の変化シナ リオに対する予測技術が必要である。そのため、 都市環境を構成する個々の環境要素に対しては、 従来から精力的に多くの研究が行われてきた。例 えば、ヒートアイランド対策という最も具体的か つ喫緊の都市スケール問題解決に迫られてきた温 熱環境分野では、通風性能指標の全国マップ作成 など、本問題に係る研究実績が豊富であり、我が 国の研究レベルは欧米の 10 年先を行くと言われ る。また音響分野においては、都市における主要 騒音源たる道路交通騒音源からの音響伝搬モデル が実街区へ汎用的に適用可能との立場から、日本 音響学会による ASJ RTN-Model 2003 といった、モ デル式による街区レベルの道路交通騒音予測手法 の実用化、大規模数値予測手法の活用による道路 際遮音壁の遮音効果予測高精度化などが模索され ている。しかしながら、総合的な環境評価には不 可欠と考えられる、それら個々の環境要素を統合 した統一的なマッピング、予測、データベース化 にかかわる手法の研究開発は行われていない。そ

れには、現在に至るまでそれらの研究開発が個々 の環境要素ごとに行われており、各環境要素の予 測研究に従事する研究者間の交流がほとんど行わ れてこなかった事が挙げられる。

一方で、国内外における精力的な数値解析技術 研究開発の結果、数値流体解析(CFD)、数値音響、 ライティングシミュレーションといった個々の環 境要素予測手法がいずれも完成の域に達しつつあ る。このことを背景に、概ね2006 年頃から現在ま での僅か 2~3 年で、以下の 2 点に代表される状 況変化が急速に起こりつつある。

- 総合的環境予測へ関心を拡大する研究者の発生。 これらの研究者に共通する特徴は、各環境要素の 予測手法研究開発において先端的な研究能力及び 実績を有しながら、総合的な環境予測手法への研 究開発の進展を、それら研究実績からの然るべき 延長線として捉えている事である。すなわち、出 自たる研究分野にかかわらず、目指すべきと考え る方向性が驚く程一致している。
- 数値予測技術を実装したオープンソースソフトウェア(以下 0SS)の急速な発達。とりわけ、欧州を中心に急速に開発が進む最新の 0SS に共通する特徴として、最先端の研究レベル実装が論文発表と同時にそのままオープンソース化されており、商用コードをもしのぐ非常に高度な数理および物

理モデルを実装していること、CFD、音響、熱放射 など多種の物理現象を統合的に連成可能なマルチ フィジックス機能を実装していることが挙げられ る。

以上のごく近年における状況変化を踏まえ、本 研究課題では、OSS を活用した都市街区レベル総 合環境予測データベースの整備および Web インタ ーフェイスを通した公開を行う。

### 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

東京大学

(2) 共同研究分野

超大規数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではという事項など 異分野の研究者が共同研究を通して協働するこ とで、後述の 3.2.1 節で見るようにあらたな問題 解決手法を開拓できる。

3. 研究成果の詳細

3.1 CFD を用いた実市街地における風環境評価

## 3.1.1 概要

平成24年1月に完成予定の新潟県長岡市の新市 役所シティホールプラザ「アオーレ長岡」は、図 1に示す通り、東棟と西棟やアリーナ棟といった 大規模建物と大屋根に囲まれた屋外広場を有する。 本研究では、設計段階において市役所近傍の風環 境を数値流体解析(CFD)を用いて予測し、屋外広場 等において強風被害の懸念がないかを事前に予測 することを目的とし、長岡市新市役所の建設予定 地を中心に1km四方の範囲におけるCFD解析を行 ない、屋外広場内付近の風環境評価を行なった。 また、周辺建物の屋根形状を平坦に近似したケー スと、屋根形状を概ね再現したケースでの風環境 解析結果を比較することで、周辺建物の屋根形状 の再現が、長岡市新市役所の屋外広場内や市役所 近傍での風環境予測に及ぼす影響を調べた。

### 3.1.2 周辺建物の格子生成

周辺建物の形状は、建物の外形線ポリゴンの情図2 抽出した周辺
報を有する2次元の数値地図データ(ゼンリン社のSPは3.2節に述製 ZMapTown-IIをShape 形式に変換したもの。以 RP1、RP2 は受音点。

下 GIS データと呼ぶ) と航空機からのレーザ計測 により計測された表層高さデータ(国際航業社製、 RAMS-e Surfaceレベル1。以下 DSM データと呼ぶ) を組み合わせて自動生成した。なお、DSM データ の解像度は水平方向2m程度、測定誤差(標準偏差) は高さ方向15 cm、水平方向30 cm程度である。

周辺建物形状の自動生成は以下のように行なった。



図 2 抽出した周辺建物の外形線ポリゴン。図中の SP は 3.2 節に述べる音響解析のための音源点、RP1、RP2 は受音点。

- 新市役所建設予定地を中心に1km四方の領域内に ある建物外形線の2次元ポリゴン情報をGISデー タから抽出した。
- 2. 個々の建物の外形線ポリゴン内にある DSM データ を抽出した。
- 抽出した DSM データの高さの最高値が 2m 以下の 建物は取り除いた。
- 4.1 km四方領域を1m四方のグリッドに区切り、1m 間隔の階段状に建物の側面を再現した。
- 5. 屋根形状を平坦に近似した場合:個々の建物の 外形線ポリゴン内にある DSM データの高さを平 均して、建物の屋根の高さとした。
- 6. 屋根形状を再現した場合: 3×3 グリッド内の DSM データの高さを平均して中心のグリッドの高さ とし、それを元に建物屋根形状を 1m 間隔の階段 状近似で再現した。



(a) 屋根形状を再現した周辺建物の形状



(b) 屋根形状を平坦に近似した周辺建物の形状図3周辺建物の形状

1. で抽出した周辺建物の外形線ポリゴンを

図2に示す。なお、DSM データの間隔は約2mで あるが、屋根形状を再現する場合には2m間隔の 階段状近似では少々粗いので、1m間隔で高さデ ータを得るために 3×3 グリッドの範囲で高さを 移動平均した。DSM データから不整三角網(TIN)を 生成し、建物の外形線ポリゴンの高さを立ち上げ て、それらと結合処理をすることで、階段状近似 ではない建物形状も生成可能であるが、周辺建物 近傍の格子は境界適合にせず階段状近似する予定 であったので、元となる形状も階段状に生成した。 周辺建物近傍の格子を境界適合させること今後の 課題としたい。

こうして得られた周辺建物の形状を図3に示す が、屋根形状を平坦に近似した場合は、屋根形状 を再現した場合に比べ建物上部の細かい凹凸がか なり減少しており、流体力学的な粗度も大きく変 化することが予想される。

### 3.1.3 解析条件

格子生成や CFD 解析、後処理にはオープンソー スの CFD ツールである OpenFOAM (Weller 1998) を 用いた。また、計算には、東京大学情報基盤セン ターの超並列型スーパーコンピュータである T2K オープンスーパーコンピュータ(HA8000 クラスタ システム)を用いた。格子は OpenFOAM 附属のロー ド・バランシング機能付き直交格子法六面体メッ シャーである snappyHexMesh を用いて、HA8000 の 1 ノード(16 コア)を用いて並列に生成した。格子 数は約 1,500 万であった。流体計算では 16 ノード (256 コア)を用いて領域分割型の並列計算をした。

周辺建物の壁面最近傍の格子幅は1mとし、周 辺建物の壁面や屋根は1m間隔で階段状に近似し た。なお、この対象領域では地表面の高低差はほ とんどなかったため、地表面は平坦とした。建物 建物の壁面や屋根面の最近傍は格子幅を25 cmま で細かくした。屋外広場やアリーナの屋根はなだ らかに傾斜していることから、屋根表面の格子は 屋根の境界に適合させた。なお、屋根を支持する 構造部材は細いことから、広場内の流れ場に与え る影響は小さいと考え再現しなかった。

CFD 計算では乱流モデルとして、k-epsilon 系の

#### 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第2回シンポジウム 講演予稿 2011年1月

中では屋外気流の予測精度に概ね優れ、安定して 計算が行なえる RNG k-epsilon モデルを用いた (Imano 2009)。樹木の樹冠による抵抗の再現には 大橋ら(大橋 2004)による樹木キャノッピーモ デルを用いた。樹木モデルのパラメータについて は、抗力係数は一律 0.2 とし、葉面積密度はケヤ キ 0.73[1/m]、常緑樹は 1[1/m]とした。

計算領域の側面は全て周期境界条件とし計算を 行い、1 km 四方内で再現した建物の粗度に応じた 概ね自然な流入風プロファイルが自動的に生成で きるかを試した(西村 2009、野津 2007)。ただし、 領域全体の風量が保たれるよう、領域全体に対し て想定した主流の風向に圧力勾配をかけた。



(a) 屋根形状を再現した場合





図 4 高さ 1.5 m における屋外広場近傍の風速比 ベクトルと風速比

### 3.1.4 解析結果

図4に、風向が主風向の南南西時の高さ1.5 m における屋外広場近傍の風速比ベクトルと風速比 を示す。屋根形状の再現精度に関わらず、市役所 の東棟や西棟と隣接建物間の狭い路地は風速比が 多少高くなっているものの、屋外広場内やアリー ナ棟の前の通路での風速比は最高でも 0.5 程度と 大きくない。この風向では、10分間の平均風速が 4 m/sを越える確率は1%も無いことから、風害が 懸念されるような結果ではないと言える。また、 屋根形状を平坦に近似した場合には、形状を再現 した場合に比べ、市役所の東棟と隣接建物間の狭 い路地や、アリーナ前の通路における風速比が大 きくなっているが、これは隣接建物の屋根の粗度 が低くなっており、風速が減衰しにくいためであ ると思われる。一方、屋根形状を再現した場合は、 平坦に近似した場合に比べて、屋外広場の風速比 が多少高くなっている。この原因は定かではない が、屋根形状の再現が屋外広場の風環境の予測結 果に多少影響を及ぼすことがわかった。

# 3.2 風環境評価のための CFD 結果を再活用した実市街地の音環境解析

### 3.2.1 概要

近年登場している各種の新型遮音壁の効果予測、 道路騒音の到達範囲予測(藤本ほか 2006)、街路 の音環境デザイン(平栗ほか 2001) など屋外、特 に市街地音環境設計において、より正確な音響伝 搬予測が求められつつある。従来はこのような屋 外音場の予測手法として、有限差分法あるいは境 界要素法といった、線形波動方程式に基づいた離 散数値解法が用いられて来た。一方で、屋外音場 においては自然風の風速プロファイルや、遮音 壁・周辺建物等によって生じる気流の乱れによる 音響伝搬の変化、いわゆる気象効果が大きく影響 する事が知られている。特に近年、屋外道路交通 騒音低減の切り札として開発の進む先端改良型遮 音壁や排水性舗装においては、1 dB以下の改善効 果にしのぎを削る状況であり、従来は考慮不能と して無視されてきた気象効果を無視し得なくなっ ている(Forssen 2004)。

このような状況に対して、気象効果を考慮可能 な離散系解法として、大別して放物型方程式法 (Parabolic Equation 法、PE 法) (Salomons 1994)

### 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第2回シンポジウム 講演予稿 2011年1月

および線形化オイラー方程式法(Linearized Euler Equation 法、LEE 法)(Blumrich 2002)の 2 種が提案されている。前者はあらかじめ与えら れた風速鉛直プロファイルなど、単純な気流速度 場における音響伝搬を空間発展的に解く手法であ り、計算負荷が少ない(横田 2005)ものの、実際 の市街地のような複雑街区形状の取扱いや、気流 速度場の影響の精密な再現には適さない。一方 LEE 法は、気流速度場を数値流体解析(CFD)に よって与える事を前提に線形化 Euler 方程式、す なわち線形化された流体運動の基礎方程式を解く 手法である。本手法は PE 法より計算負荷的に高 コストながらも、時空間的な乱れを含む任意気流 速度場における音場の予測が可能であり、原理的 には非常に汎用性が高い。

しかしながら LEE への入力となる気流速度場 を求めるための CFD 解析は、市街地スケールと もなると概して大規模となるため、音響伝搬解析 のためだけにそのような CFD 解析を実施するの は正当化され難いのが実情である。そこで 3.1 節 で行ったような風環境評価のための CFD 計算の 結果を "再活用" するようなワークフローを確立 できれば、実在市街地を対象とした LEE 法音響伝 搬解析の実現性および実用性が一気に高まる。そ こで、CFD 解析結果が存在していることを前提に、 それを入力とした LEE 法音響伝搬解析手法の開 発を行った。

なお、本プロジェクトメンバーの属する建築環 境分野においては従来、音響解析分野と風環境解 析分野に縦割り意識が強く、両者が共同研究でき るような場はほとんど無かった。そのため、この ような再活用ワークフローの確立は非常に困難で あった。それが可能となったのは、本拠点公募型 共同研究のような分野横断型研究にきわめて寛大 な研究プロジェクトならではと言える。

### 3.2.2 格子生成および気流場のマッピング

音響伝搬解析は、波動伝搬を全解析領域に渡っ て解像するため、CFD 解析のような疎密を設ける 格子分割は非適応であり、全領域に渡って波長に 対して充分な分割数の等間隔格子が必要である。 そのため CFD 解析と比較して大幅に格子数が増 えることとなり、高い解析効率が要求される。し たがって等間隔構造格子の有限差分法にて行うこ ととなり、音響解析用の構造格子が別途必要であ る。ここでは、CFD 解析用の格子が既に作成され ていることを利用し、以下の手順で格子生成を行 った。

- 1. 等間隔直方体格子 (ベース格子) を作成する。
- 2. ベース格子の全セルについて、中心点座標を算出 する。
- オープンソース可視化ライブラリの VTK (http://www.vtk.org/) に含まれる非構造格子対 応のセル・ロケータを使用し、各中心点座標が CFD 解析用格子の内外いずれに存在するかを判 定する。
- 4. 各セルが CFD 解析用格子内であれば 1、格子外で あれば 0 となる全セル数分の配列を作成し、0 と なる要素では伝搬解析における物理量の更新を 行わない。

解析領域寸法は x、y 方向については CFD 領域 の隅を僅かに切り落とした各 1,000 m、z 方向高 さを上空部分の地表面付近の音響伝搬への影響は 僅少と考え 250 m とした。格子幅は全領域内で 1 m とした。解析領域内総格子数は 2 億 4,600 万で ある。以上によって得られた格子を図 5 に示す。 図 3 との比較から、建物形状が良く再現されてい ることがわかる。



図5 音響解析用等間隔構造格子

また、CFD 解析によって得られた気流速度場の



図6 音響伝搬解析結果の可視化

音響解析用格子へのマッピングについては、上記 3. の処理において音響解析格子の各セル中心点 座標に対応する CFD 解析用格子のセル番号が得 られるため、当該セル位置の速度ベクトルを音響 解析用格子セルにおける速度としてマッピングす る。マッピングする対象は、3.1.4 節に示した南南 西を風向とするケースである。ただしその際、音 響伝搬への気流の影響の明確化のため、速度場を 4 倍にスケーリングした。しかしながら、南南西 は主風向ではあるものの最大風速は必ずしも高く なく、当該風速域の出現頻度は 10<sup>-6</sup>以下と非常に 低い。音響伝搬解析を前提とした CFD 解析にお ける適切な風向およびプロファイル設定は、今後 の課題としたい。 3.2.3 解析条件



受音点 RP1、RP2 における音圧時間波形 図 7

境界条件は建物・地面を剛とし、解析領域全側 面および上端に10セル厚のPML吸収境界条件を 課した。音源は、新市役所前の交差点中央である (x, y, z) = (-92.5, 80.5, 1.0) m (図 2 に示す音源点 SP) を中心とし、半値全幅 10 m の単位振幅 Gaussian パルスを設定した。当該パルスには概ね 半値全幅を波長とする周波数成分までが含まれる ため、35 Hz付近の成分までが含まれることにな る.時間刻みは 1.6×10<sup>-3</sup> s とし、3.2 s までの解 析を行った。

また対照のため、気流速度場を一様にゼロとし た、気流場無しのケースについても解析を行った。

## 3.2.4 解析結果

図6に、CFD解析の結果として得られた速度場 を入力として行った音響伝搬解析における瞬時音 圧分布のスナップショットを 0.4 s ごとに示す。可 聴域下限に近い低周波数域の解析ではあるが、建 物間の反射と波面の干渉によって、波頭面の内側 では複雑な干渉模様を描いている。

また,図2に示す受音点 RP1, RP2 における音 圧時間波形を,図7に気流速度場の有無で対照さ せて示す。音源点より上流側の RP1 では気流速度 場有りの方がわずかに音波の到達時刻が遅くなっ ており、また振幅も気流速度場有りの方が時間経 過とともに小さくなっている。一方、下流側の受 音点 RP2 では到達時刻に大きな差は無いものの、 振幅が気流速度場有りの方が大きくなる傾向が RP1より明確に見られる。

3.3 CFD を用いた実市街地における住宅の通 風解析

近年,町屋等の伝統的建築物はその歴史的価値 が認められ、保全・再生される傾向にある。しか し一般にこうした建築物の室内温熱環境水準は低 く,冷暖房に過大なエネルギー消費を必要とする。 そこで、伝統的建築物のもつ歴史的価値を出来る 限り損なわずに,室内温熱環境水準を向上させる ことを目標とし、夏季において通風による自然換 気が利用可能であるか否かについて検証している。

対象は、山に囲まれた低層市街地(図 7)内に位 置する町屋であり、CFD を用いて通風量、通風経 路等を評価する。はじめに,幅 1km×奥行き 2km の領域を計算し、次にその計算結果を用いて対象 建物周辺の風環境を評価, さらにその計算結果か ら室内における通風計算を行う。なお現在は幅1km ×奥行き 2km の大領域計算に向けて中規模計算 (0.5km×0.5km 程度)を試行している段階である (図 8)。なお、地形や建物形状の再現には DSM デ ータを用いた。また CFD 解析コードには OpenFOAM を使用している。中規模計算は PC クラスタを用い て行なったが、大規模計算では T2K オープンスー パーコンピューターシステムを利用する予定であ る。



図 8 対象市街地(黒枠:計算領域)



図 9 中規模計算結果(壁面風圧力分布:0.5km× 0.5km)

### 参考文献

Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H. and Fureby, C., A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in Physics, Vol. 12, No. 6, 620p-631p, 1998

M. Imano et. al, VALIDATION OF CFD ANALYSIS OF CROSS-VENTILATION IN DETACHED HOUSE, Proceedings of ROOMVENT '99, 11th International Conference on Air Distribution in Rooms, 5 2009

大橋、単独樹木周辺の気流解析に関する研究、日本 建築学会環境系論文集、NO.578、pp.91-96、2004 西村、今野、坂本、CFD解析による実在集合住宅の 通風性状の検討、日本流体力学会年会梗概集、92009 野津、田村、奥田、建物形状を詳細に再現した都市 域流れのLES -観測データとの比較-、日本建築学 会学術講演梗概集、Vol. B-1、pp. 173-174、2007 藤本一寿、穴井謙、道路に面する地域における「騒 音に係る環境基準」の面的評価に関する考察、日本 音響学会騒音・振動研究会資料 N-2006-18, 2006 平栗靖浩、川井敬二、矢野隆、商業空間の音環境の 現状把握: 熊本、ストックホルム、イェーテボリで の実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集(環 境工学 I)、89p-90p、2001

Forssen, J., Guest editorial: Sound shielding in the presence of turbulence, Applied Acoustics, Vol. 65, 559p, 2004

Salomons, E., Diffraction by a screen in downwind sound propagation: A parabolic-equation approach, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 95, No. 6, 3109p-3117p, 1994

Blumrich, R. and Heimann, D., A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects, J. of Acoustical Society of America, Vol. 112, No. 2, 446p-455p, 2002

### 4. これまでの進捗状況と今後の展望

進捗状況は3章に述べたとおりである。この現 状を受けて、今後の展望は以下のようになろう。 4.1 CFD を用いた実市街地における風環境評 価および実低層市街地における住宅の通風解 析

3.1 節では実市街地における広範囲の建物形状 を詳細に再現した風環境解析が実現可能であるこ とを示した。また、3.3 節では地形を再現した低 層市街地の中規模風環境解析を行ったが、今後は より広範囲の大規模風環境解析を行った上で、住 宅での通風解析を行う予定である。このような実 市街地での風環境解析では適切な流入・流出面の 境界条件の設定が非常に重要である。しかしなが ら、従来では地域によって定まる粗度区分に応じ たべキ指数を用いべキ乗則によって流入面での風 速の鉛直プロファイルを定めることが多い。3.1 節では計算の簡便のため、周期境界条件を用いて 解析することにより、周辺領域にも計算領域内の 建物形状が周期的に広がると仮定したが、今後は 計算領域周辺の地形や建物を考慮した流入・流出 面の境界条件の設定を行う必要がある。また、3.3 節の解析では、低層建物の通風性状を解析するこ とから、周辺建物の屋根を階段状に近似するのみ ならず、斜めの屋根面を再現する等より精密な形 状再現が必要になる。

# 4.2 風環境評価のための CFD 結果を活用した 実市街地の音環境解析

3.2 節では実街区において気流を考慮した音環 境解析が可能となったことを示した。当該コード は単純な問題における理論解との照合で良好な対 応を得ることは確認済であるものの、実街区問題 のような複雑な問題における解析結果の妥当性に ついては未検証である。解析対象が気流と音響の 複合現象であるため実証には困難が伴うが、実市 街地における風・音響同時のフィールド計測結果 との照合を目指す。

また、今回の解析事例は人間の可聴域下限に近 い低周波数における解析にとどまったため、解析 周波数の向上が今後の課題である。解析周波数は 格子幅と連動する(解析周波数と逆比例の関係に ある解析波長の下限は、格子幅に比例する)ため、 必然的に解析規模の大規模化を意味する。本共同 研究によって利用可能な豊富な演算リソースのさ らなる活用が必要である。

## 5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

T. Oshima, Comparative study on finite-difference and finite -volume implementations of the Linearized Euler model for outdoor sound propagation simulations, Proc. The 20th International Congress on Acoustics (Sydney), No. 943, 2010

## (2) 国内会議発表

今野雅他、大規模低層建物と大型屋根に囲まれた 屋外広場内の風環境評価、第23回数値流体力学シ ンポジウム講演要旨集、pp.147、2009 坂本雄三、今野雅、大嶋拓也、市街地における風・ 温熱・光・音環境総合数値予測データベースの開 発、東京大学情報基盤センター平成21年度公募型 プロジェクト報告会「ペタ/エクサスケールコンピ ューティングへの道2010」、2010.5

大嶋拓也、今野雅、LE 法による屋外音響伝搬解析 における市街地モデル解析格子自動生成に関する 研究、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論 文集、pp. 55-58、2010

大嶋拓也、屋外音響伝搬解析のためのLE法におけ る有限差分および有限体積解法の比較、日本音響 学会騒音・振動研究会資料 N-2010-05、2010 大嶋拓也、郊外地域における道路交通騒音伝搬へ の風の影響に関する基礎的実測調査、日本音響学 会騒音・振動研究会資料 N-2011-04、2011(投稿 中)