

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360255

研究課題名(和文) 数値地形情報を用いた実在地域音響数値解析技術の研究開発

研究課題名(英文) Research and development of numerical acoustical simulation technologies of real-life areas using digital geographic information

研究代表者

大嶋 拓也(Oshima, Takuya)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：40332647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)：地理情報データや航空レーザー地形計測データなどの数値地形情報やリモートセンシング情報を用いた、実在地域における音響伝搬の数値シミュレーション技術の研究開発を行った。解析対象となる地形・建物形状の生成、格子分割、表面音響特性推定の技術を開発した。シミュレーションコードに対して、大規模解析のための分散メモリ並列化を行った。スーパーコンピュータによる解析結果と模型実験との比較により、妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Research and development of numerical acoustical propagation simulation technologies of real-life areas were achieved using digital geographic information such as geographic information system data and airborne laser topographical scanning data, and remote sensing information. Techniques for geometry generation of the subject topography and buildings, grid generation and the estimation of surface acoustic characteristics were developed. The simulation code has been distributed-memory parallelized for large-scale computations. The simulation results have been validated by comparison with scale-model measurements.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、環境・設備

キーワード：建築環境・設備 屋外音響伝搬 大規模音響数値解析 数値地形情報 リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

道路交通騒音、鉄道騒音、航空機騒音などの環境騒音の低減を図り、かつ適切な限度内に抑えることは、音源周辺地域住民が健康で文化的な生活を営む上で最重要な要素の一つである。それゆえ、遮音壁設置、騒音に係る法規制整備、および騒音モニタリングなどの技術的・政策的な対策が継続的に行われてきた。それにもかかわらず、環境騒音をとりまく社会の目は厳しさを増している。

このような情勢にあつて、あらゆる対策手法の礎となる環境騒音伝搬予測技術の向上は音響学の最重要な分野であり、国内では日本音響学会 (ASJ) が継続的に取り組んできた。その主要成果である「ASJ 道路交通騒音予測モデル (ASJ Model)」は、1993 年以來最新の 2008 年版に至る 5 年毎の改訂の結果、我が国における道路交通騒音伝搬予測手法の事実上の標準として確立されている。さらには現行の騒音に係る環境基準で要求される、地域全体の環境基準超過家屋戸数による評価 (面的評価) を主用途とする推計手法として、地図情報システム (GIS) との併用も展開されている。

しかしながら、ASJ Model はその弛まぬ改善の歴史ゆえ、多数の実験式・経験式から構成された巧緻を極めたマクロモデルである。一方で、かかる巧緻なモデルをもってしても、モデルの想定する伝搬類型 (遮音壁越えなど) 以外では精度が確保されない、または予測自体が不可能である。以上から上記の GIS 併用システムも、潜在的有用性にかかわらず広範な利用を得るに至っていない。

そこで考えられるのが、近年の計算機技術および数値シミュレーション技術の飛躍的發展によって適用可能領域を格段に広げつつある音響数値シミュレーションによるマクロモデルの置換えである。音響数値シミュレーションでは確立された計算工学的手法に則つて音場の支配方程式の解を求めるため、無用な複雑さの無い、一貫した問題の取扱いが可能である。それゆえ原理的にマクロモデルより飛躍的に高精度であり、また伝搬類型の制約無く、道路交通騒音のみならず任意の環境騒音に対応可能である。従来最大の弱点とされて来た計算負荷についても、計算機の高速度化およびシミュレーションの高速度化技術の発展により、市街地レベルの大規模問題に対応可能となっている。

ただし現在のところ、解析対象規模は地域レベルと同等であっても、模式的形状にモデル化された掘割道路などへの適用に限られ、実在地域の音響数値シミュレーション例はほぼ皆無である。その理由はひとえに、実在地域地形情報を数値シミュレーション入力条件化する技術の欠如にある。

## 2. 研究の目的

以上から本研究は、以下を目的とする。

(1) GIS データや航空レーザー地形計測デー

タなどの数値地形情報、およびリモートセンシング情報を用いた、実在地域に関する以下の数値シミュレーション入力条件生成手法を研究する: ① 地形、建物などの解析対象形状、② 当該形状の解析格子分割、③ 地面、建物の吸音特性 (境界条件)。

- (2) 数値シミュレーション手法は既存のものを使用するが、大規模な解析を行うための分散メモリ並列化を行う。
- (3) (1)、(2)によって従来、模型実験で行っていた複雑なケースに対応可能であることを実証するため、模型実験による精度確認を行う。

## 3. 研究の方法

前節各項目に対し、それぞれ次の方法でアプローチする。

- (1) 項目①～③のいずれも、スクラッチからの開発でなく、近年急速に発達しているオープンソースのデータセット入出力、計算幾何、メッシュ生成ライブラリを可能な限り使用する。それによって、迅速かつ汎用性の高い実装を目指す。また、③については、具体的なリモートセンシング情報として、可視光から近赤外の波長帯を多バンドに分割して撮像するハイパースペクトル航空写真の適用を図る。
- (2) 研究代表者が過去に開発した既存のシミュレーションコードをベースとし、MPI (Message Passing Interface)による並列化を行う。
- (3) 模型実験に使用する市街地模型の形状を数値地形情報から生成し、形状の精度確保を図る。

## 4. 研究成果

2 節各項目に対し、主に以下の成果を得た。

(1) 入力条件生成手法

① 地形、建物などの解析対象形状

3 次元の数値地形データは市販のものが既に存在しているが、個別の建物形状まで再現したものは高価で整備地域も限定される。また、比較的安価なデータは建物屋根面形状が建物代表高さ面において平坦に表現されるため、形状再現精度が良好ではなかった。そこで、比較的安価に入手可能なデータである、個別の建築物外周線を含む 2 次元数値地図、および航空レーザー測量などによって得られた数値表層モデル (Digital surface model: DSM) を組み合わせ、地形と屋根面形状再現に重点を置いた建物形状を自動生成する形状生成手法を開発した (図 1)。建築物の外周線近傍における建物高さの再現、および建物間路地における標高再現のための標高補外手法を提案した (図 2、3)。結果として、図 4 のように形状が再現された。

② 解析格子分割

差分法の直交格子に対応した階段近似格子分割手法を開発した (図 5)。また、境界要

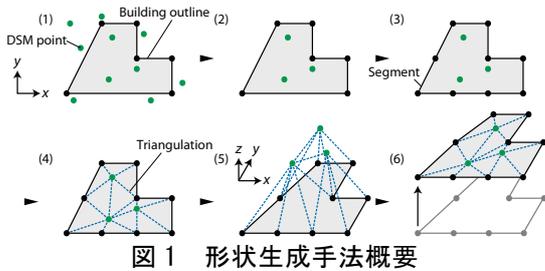


図1 形状生成手法概要

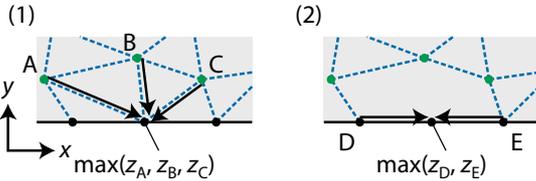


図2 建物高さ補外手法

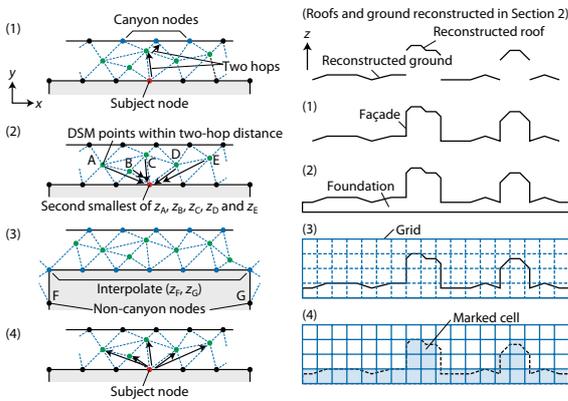


図3 路地標高補外手法 図5 格子分割手法

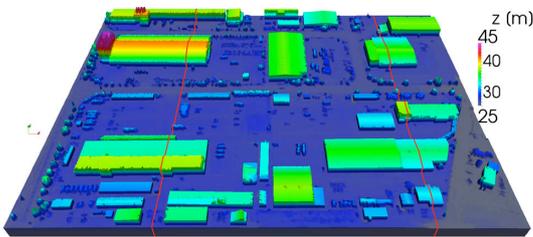


図4 生成された地形および建物形状

素法に用いられる表面メッシュ格子分割手法を開発した。①および②の開発においては、数値地形情報の入出力、計算幾何、格子分割、データ可視化において、いずれもオープンソースのライブラリである GDAL [1]、GEOS [2]、Gmsh [3]、VTK [4] を用いた。

③地面、建物の吸音特性(境界条件)

適切な音響伝搬数値予測のためには、地表面の形状のみならず、音響的特性も入力条件として与える必要がある。しかしながら、実在地域における広域の音響特性を一括して与える手法は存在していなかった。一方で、資源や農業、防災等の分野では、リモートセンシングデータを用いた地表面種別の推定に関する多くの研究が見られる。そこで、高精度なリモートセンシングデータであるハイパースペクトル航空写真を用い、屋外音響シミュレーションに適した地表面種別分類

生成手法について検討した。具体的には、分類すべき地表面種別を ASJ RTN-Model 2008 [5] (以下、ASJ モデル) を参考に、“柔らかい地面”、“田んぼや草地”、“固い地面(グラウンドなど)”、“コンクリートやアスファルト”の4種とし、それぞれについて、ASJ モデルにて定められた実効の流れ抵抗の75、300、1,250、20,000kPa·s/m<sup>2</sup>を与えることとした。

推定手法としては、MED-SD 法[6]を用いることとした。MED-SD 法とは、(1)式に示すように、観測された画像データの画素毎に MED 法[7]と SD 法[8]で算出された距離と角度を0から1の間で線形化して足し合わせる判別関数  $f_{i,x}$  を用いる。 $f_{i,x}$  は地表面種別  $i$  の教師(平均)スペクトルと判別対象画素  $x$  のスペクトルとの類似性を表しており、値は0~2の間となる。 $f_{i,x}$  の値が小さいほど判別対象画素のスペクトルと地表面種別  $i$  の教師スペクトルとの類似性が大きくなる。従って、 $f_{i,x}$  の値が最も小さくなる地表面種別  $i$  が、その画素の地表面種別と判断される。

$$f_{i,x} = \frac{D_{i,x} - D_{\min,i}}{D_{\max,i} - D_{\min,i}} + \frac{\theta_{i,x} - \theta_{\min,i}}{\theta_{\max,i} - \theta_{\min,i}} \quad (1)$$

ここで、 $D$  は MED 法で得られる距離[m]を、 $\theta$  は SD 法で得られる角度[rad]を表している。添字の“max”と“min”はそれぞれ地表面種別  $i$  における全画素の中の最大値と最小値を表している。

MED-SD 法は教師付き判別手法であるため、詳細な航空写真と現地調査に基づき、地表面種別ごとにトレーニングエリアを図6のように設定した。そのトレーニングエリアに含まれる画素のスペクトルを抽出し、各地表面種別の教師(平均)スペクトルを算出するためのデータを得た。次に、得られた教師スペクトルと判別閾値を用いて、図6の黒枠で囲んだテストエリアの地表面種別の判別を行った。図7に判別結果を示す。結果として、全体的に地表面種別の性状を把握できていると言える。

実在地域の地表面種別が得られたので、それに対応する吸音特性を考慮した3次元の音響伝搬解析を試みた。解析手法は、Salomons

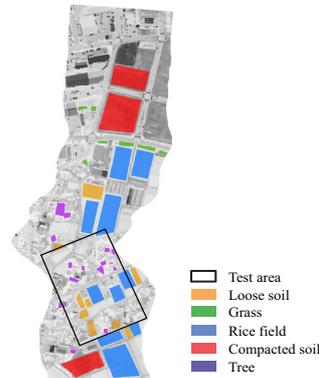


図6 対象地。色分けはトレーニングエリア、枠線はテストエリア。



図7 テストエリアの地表面種別判別結果

らによる多孔媒質における音響伝搬の時間領域有限差分法[9]を踏襲した。本手法では、吸音特性は流れ抵抗 $\sigma$ 、ポロシティ $\Omega$ 、構造係数 $c_s$ の3パラメータで表される。一方で、前節にて推定された地表面種別に対し、ASJ RTN-Model 2008では $\sigma$ のみが与えられている。そのため、 $\Omega$ および $c_s$ は、文献[10]における各類型に最も $\sigma$ の近いケースのものを用い、表1のとおり設定した (case A)。

表1 地表面種別に対応するパラメータ

Type	$\sigma$ [kPa·s/m <sup>2</sup> ]	$\Omega$	$C_s$
Loose soil	75	0.4	2.25
Grass	300	0.5	1.69
Compacted soil	1,250	0.3	1.96
Others	20,000	0.1	3.24

解析領域高さは50 m (うち地表厚約8 m)、空間離散化幅は0.125 mとし、解析領域四周および上端に20格子厚のPMLを課した。音源は、図8に示す音源道路上に、半値全幅1.25 m、振幅1 PaのGaussianパルスを、ランダムな時間遅れを持たせて1 m間隔で配置し、無相関音源を模擬した。受信点は、同図中R1-R6の6点(地上高さ1.5 m)とした。時間離散化幅は $2 \times 10^{-4}$  sとし、2 sまでの解析を行った。また比較のため、地面及び建物を全て剛としたケース (case R)、および地面および建物を空気で置換し、解析領域下端にも20格子厚のPMLを課した自由音場のケース (case F) も解析した。解析には、富士通製FX10スーパーコンピュータを用いた。

図9に、各受信点における音圧時間波形のオクターブバンド分析によって得られた、case R対F、case A対F、case A対Rの相対音圧レベル $\Delta L_{RF}$ 、 $\Delta L_{AF}$ 、 $\Delta L_{AR}$ を示す。音源から建物による遮蔽が無く田んぼを伝搬する受信点R1では、地表面および背後建物による反射のため全周波数域で $\Delta L_{RF}$ が正であるが、吸音を考慮した $\Delta L_{AF}$ では、250 Hz帯域における約7 dBの減衰が見られる。建物群背後となるR2では、 $\Delta L_{RF}$ 、 $\Delta L_{AF}$ ともに高周

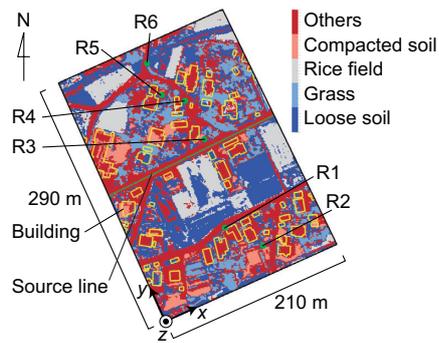


図8 音源・受信点位置

波ほど建物の遮蔽による減衰が、さらに $\Delta L_{AF}$ では地表面吸音の影響が顕著に見られる。R3-R5では、 $\Delta L_{RF}$ 、 $\Delta L_{AF}$ ともに、音源からの距離に応じて建物および地表面による減衰が見られる。ただし建物群背後の開けた点であるR6では、R5に対する大きな差は見られない。以上から、地表面音響特性を与えた場合に、全面剛を仮定した場合と比較して最大7 dB程度の差となっており、地表面音響特性考慮の有効性が伺える。

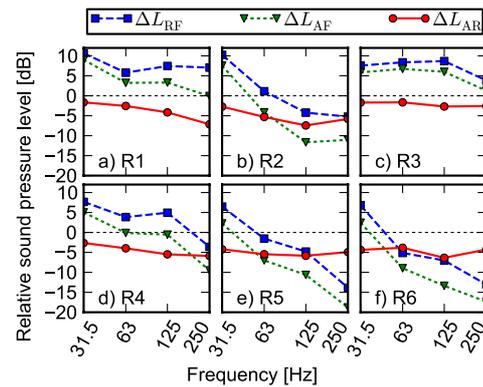


図9 受信点における相対音圧レベル

## (2) シミュレーションコードの並列化

研究代表者が過去に開発した時間領域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD) 法コードに対し、(1)に述べた解析格子分割、地表面音響特性の取扱い、後述の気流効果の取扱いを含めた諸機能を追加し、MPIによる分散メモリ並列化を実装した。

MPI並列化機能の確立は、自然風によって屋外における音響伝搬が変化する現象である気流効果を考慮したケースで行った。当該効果の解析を行うため、FDTD法に対して移流現象の取扱いを拡張した線形化 Euler 法 [11] を3次元で実装した。当該手法では、数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD) により市街地の気流場を解き、当該気流場を入力として線形化 Euler 法による音響伝搬解析を行う。

対象地は、新潟県長岡市内とした。図10は、オープンソースのCFDソフトウェアであるOpenFOAM [12]によって求めた市街地の気流場である。図11は、図10の北端部分

の領域を、富士通製 FX10 スーパーコンピュータの 24 ノード (384 並列) により線形化 Euler 法で解析した結果であり、無風時との差を示す。特に西風時において、無風時と比較して音源(左右方向中央部の道路)より風上側の音圧レベルが低下し、風下側が増加しており、定性的に妥当な解が得られている。

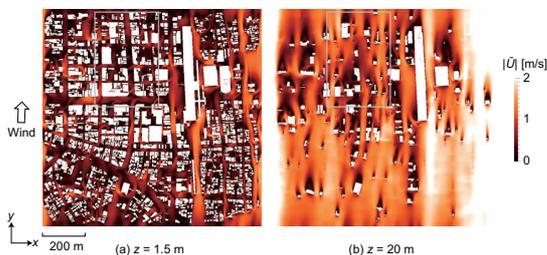


図 10 CFD によって求めた気流場

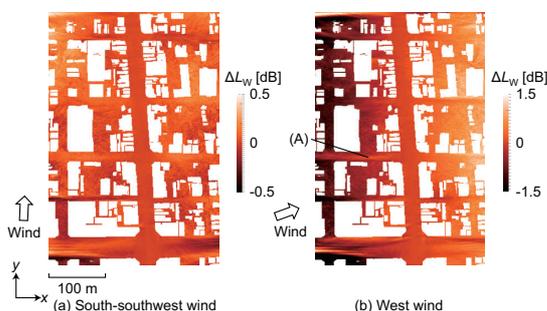


図 11 線形化 Euler 法による解析結果

### (3) 模型実験による精度確認

図 12(a)に示す神奈川県横浜市内の 380 m 四方の市街地について、同一数値地形情報から(b)の 1/100 縮尺模型および(c)の数値解析用形状データを作成した。図 13 に実験結果および解析結果を示す。500 Hz 帯域の建物陰に置いてやや相違が見られるものの、それ以外は良く一致している。

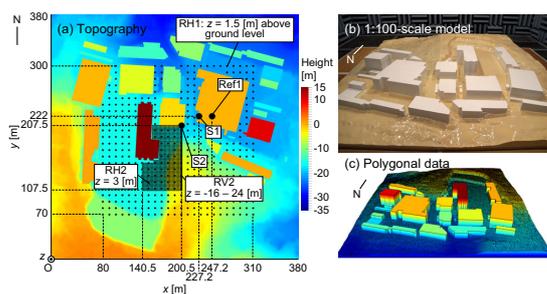


図 12 模型実験・数値解析対象

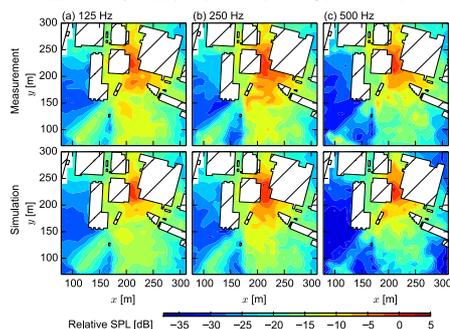


図 13 実験および解析結果

### 参考文献

- [1] GDAL Development Team, <http://www.gdal.org/> (Retrieved 2014)  
 [2] GEOS - Geometry Engine, Open Source, <http://trac.osgeo.org/geos/> (Retrieved 2014)  
 [3] C. Geuzaine *et al.*, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 79(11), 1309-1331 (2009)  
 [4] W. Schroeder *et al.*, *Visualization Toolkit: An object-oriented approach to 3D graphics*, 4th ed. (Kitware, 2006)  
 [5] K. Yamamoto *et al.*, *Acoust. Sci. & Technol.*, 31(1), 2-55 (2010)  
 [6] K. Oki *et al.*, *Int. J. of Remote Sensing*, 27(10) 1993-2002 (2006)  
 [7] N. Keshava, *Geosci. Remote Sens.*, 42, 1552-1565 (2004)  
 [8] M. A. Cochrane, *Int. J. Remote Sens.*, 21(10), 2075-2087 (2000)  
 [9] E. M. Salomons *et al.*, *Acta Acust. United Acust.*, 88, 483-492 (2002)  
 [10] Wilson *et al.*, *Appl. Acoust.*, 68, 173-200 (2007)  
 [11] T. V. Renterghem *et al.*, *Appl. Acoust.*, 68(2), 201-216 (2007)  
 [12] H. Weller *et al.*, *Comput. Phys.*, 12(6), 620-631 (1998)

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Takuya Oshima, Takashi Ishizuka, Takahide Kamiyo, 3D urban acoustic simulations and scale-model measurements over real-life topography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 査読有, 2014 (採録決定)
- ② Takuya Oshima, Yasuhiro Hiraguri and Masashi Imano, Geometry reconstruction and mesh generation techniques for acoustic simulations over real-life urban areas using digital geographic information, *Acoust. Sci. Technol.*, 査読有, 35, 2014, 108-118
- ③ Takuya Oshima, Masashi Imano, Yasuhiro Hiraguri and Yoshikazu Kamoshida, Linearized Euler simulations of sound propagation with wind effects over a reconstructed urban terrain using digital geographic information, *Appl. Acoust.*, 査読有, 74, 2013, 1354-1366
- ④ Yasuhiro Hiraguri, Takuya Oshima and Kazuma Hoshi, Basic investigation on estimation of land cover classification conforming to the ASJ RTN-Model using hyperspectral imaging data, *Acoust. Sci. Technol.*, 査読有, 34, 2013, 367-370
- ⑤ Takuya Oshima, Yasuhiro Hiraguri and Kazuma Hoshi, Time-domain outdoor acoustic simulation of a real-life area using land cover classification identified by airborne hyperspectral

imagery, Acoust. Sci. Technol., 査読有, 34, 2013, 364-366

- ⑥ 廣井昂也、大嶋拓也、騒音・風速 2 点同時実測による盛土道路周辺の風況及びその音響伝搬への影響調査、日本建築学会環境系論文集、査読有、78、2013、317-324
- ⑦ Takuya Oshima, Masaki Ii, Field measurements on wind effects to propagation of road traffic noise over open and flat ground, Appl. Acoust., 査読有, 74, 2013, 141-149

[学会発表] (計 26 件)

- ① 大久保寛、川島健、大嶋拓也、竹内伸直、地形効果を考慮した津波発生時における極超低周波音波伝搬の数値解析に関する基礎検討、日本地球惑星科学連合大会、横浜、2014/4/28-5/2
- ② Yasuhiro Hiraguri, Takuya Oshima and Kazuma Hoshi, Improvement of estimation method of land cover acoustic characteristics using hyperspectral imaging data, Inter-Noise 2013, Innsbruck, 2013/9/15-18
- ③ Takuya Oshima, Takashi Ishizuka and Takahide Kamijo, Scale-model validation study of finite-difference time-domain simulations over a real-life area reconstructed with digital geographic information, Inter-Noise 2013, Innsbruck, 2013/9/15-18
- ④ Takuya Oshima, Yasuhiro Hiraguri and Kazuma Hoshi, Finite-difference time-domain outdoor acoustic simulation of a real-life area using land cover acoustic characteristics identified by airborne hyperspectral imagery, Inter-Noise 2013, Innsbruck, 2013/9/15-18
- ⑤ 大嶋拓也、平栗靖浩、星和磨、今野雅、数値地形データおよびリモートセンシングデータを用いた実在地域の波動音響数値解析、日本騒音制御工学会研究発表会、熊本、2013/9/5-6
- ⑥ 安田洋介、関根秀久、樋口和孝、大嶋拓也、FMBEM による屋外広域音響伝搬解析の現状と課題、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、熊本、2013/9/5-6
- ⑦ Ken Kawashima, Kan Okubo, Takuya Oshima and Nobunao Takeuchi, A fundamental study on numerical analysis of extremely low frequency sound waves induced by tsunami, 32nd International Acoustical Imaging Symposium, Singapore, 2013/4/29-5/1
- ⑧ Yosuke Yasuda, Kazutaka Higuchi, Hidehisa Sekine and Takuya Oshima, A basic investigation for prediction of outdoor sound propagation in large area

using low-frequency FMBEM: effect of shapes and distribution of objects on computational accuracy and efficiency, InterNoise 2012, New York, 2012/8/19-22

- ⑨ Yasuhiro Hiraguri, Takuya Oshima, Kazuma Hoshi and Masashi Imano, Case study of land cover classification estimation using hyperspectral imaging data for outdoor acoustic simulations, InterNoise 2012, New York, 2012/8/19-22
- ⑩ Takuya Oshima, Masaki Ii, Measurements on effects of winds to road traffic noise propagations over a flat and open field, Inter-Noise 2011, Osaka, 2011/9/4-7
- ⑪ Takuya Oshima, Masashi Imano, Unified automatic mesh generation of urban terrain for linearized Euler simulations using digital geographic information, Inter-Noise 2011, Osaka, 2011/9/4-7

[図書] (計 1 件)

- ① 日本建築学会(大嶋拓也、石塚崇、大久保寛、鈴木久晴、星和磨)、コロナ社、はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド、2012、218 ページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大嶋 拓也 (OSHIMA, Takuya)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号：40332647

### (2) 研究分担者

星 和磨 (HOSHI, Kazuma)  
日本大学短期大学部・建築・生活デザイン  
学科・助手  
研究者番号：50373171

大久保 寛 (OKUBO, Kan)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・  
准教授  
研究者番号：90336446

安田 洋介 (YASUDA, Yosuke)  
神奈川大学・工学部・准教授  
研究者番号：90456187

平栗 靖浩 (HIRAGURI, Yasuhiro)  
徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・  
助教  
研究者番号：90457416

今野 雅 (IMANO, Masashi)  
東京大学・工学系研究科・助教  
研究者番号：10312977