

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 年度～2008 年度

課題番号：19760402

研究課題名（和文） 気象効果を考慮した屋外音響伝搬の数値予測に関する研究

研究課題名（英文） Numerical prediction of outdoor sound propagation under meteorological effects

研究代表者

大嶋 拓也 (OSHIMA TAKUYA)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：40332647

研究成果の概要：自然風による影響を考慮した、波動音響ベースの汎用屋外音響伝搬手法開発を行った。線形化オイラー方程式の基礎方程式を、従来航空工学分野で用いられてきた高次精度差分法に替え、より汎用性に優れるコロケートドグリッド非構造格子有限体積法によって離散化する FV-LEE 法、および Unsplit variable PML による屋外開領域問題解析手法を開発した。開発手法を実装したコードによる NASA/LaRC Workshop のベンチマーク問題の解析により、開発手法の妥当性を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	300,000	3,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：音・振動環境、流体音響工学、屋外音響伝搬、線形化オイラー方程式

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の動機

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、商業的街路の音環境デザインなどの屋外の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(図 1)。国内において、このような屋外音場の予測に実務的に最も用いられている手法である ASJ RTN-Model 2003 は理論・実験・実測から総合的に導かれた予測式に基づいた予測手法であるが、近年は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より高精度な離散数値解法の適用も進みつつある。一方で、このような屋外音場においては自然風の風速プロファイル、遮音壁・周辺建物等によって生じる気流の乱れ、温度分布が音響伝搬性状に大きく影響する(気象効果 meteorological effect と呼ばれる)ことが知られている。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

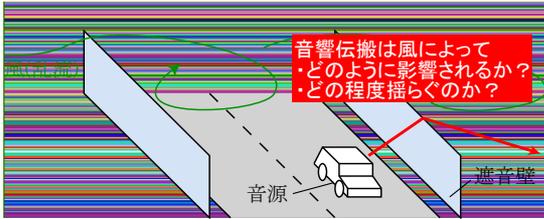


図 1: 本研究で対象とする音場

ている。しかしながら研究開始当初の標準的な道路交通騒音予測モデルである、日本音響学会策定の ASJ RTN-Model 2003 ではこれら気象効果は全く考慮されておらず(本研究期間終了間際に発表された ASJ RTN-Model 2008 においてもなお、今後検討すべき課題とされている)、また線形波動方程式由来の手法においても数値解法の本質的限界から、気象効果を考慮した音響伝搬数値予測 (シミュレーション) 手法は未だ開発されていなかった。

(2) 海外研究動向

気象効果を考慮した屋外音環境の数値予測手法に関しては、海外においては 10 年以上にわたって各種の数値予測手法、理論解析、実験との照合など多数の研究事例が継続的に海外論文誌に掲載されている。それら一連の数値予測手法に関する研究の中で当初提案されたのは、PE 法 (Parabolic Equation method; 放物方程式法) である。本手法はあらかじめ与えられた気流場を地面に対して水平方向の音速に組み込む形で音響伝搬を解く手法であるため、肝心の風速場は対数則プロファイルなどの、現実の屋外乱流と比較して極端に簡略化された風速分布モデルを与えざるを得ない本質的な問題を抱える。

一方で PE 法の弱点を克服する手法として近年、特に先端的な研究者から提案されているのが本研究で使用する LE 法である。本手法は流体の基礎方程式を基にしているゆえ、気象効果の考慮が原理的にはほぼ完全に可能な非常に強力な手法であるが、CFD (Computational Fluid Dynamics) と音場解析の連結手法となるために多様かつ複雑な実装が要求されるチャレンジングな手法である。そのため研究開始当初の段階ではごく初歩的な実装が行われた段階にあり、特に本来 CFD で解くべき部分については、LES (Large Eddy Simulation) 等の本格的な CFD 手法の使用が音響分野の研究者にとっては高難易度であるために、CFD の基礎方程式たる Navier-Stokes 方程式を解かない、物理的妥当性を欠いた人工的乱流生成モデルが使用されているに過ぎなかった。CFD と呼べる手法を使用した研究例は皆無な状況であった。

(3) 国内研究動向

翻って国内に目を向けると、国内で主流となっている線形波動方程式を基にした手法が気象効果のモデル化を苦手とすることから、ごく近年まで研究実施例が僅少な状況であった。音響学に関する限り、これほど国内外において研究レベルの差が開いた分野も珍しい。ごく近年になって、国内においてもようやく PE 法による萌芽的研究が見られるようになったが、本手法が本質的な問題を抱えているのは前述のとおりである。まして LE 法に関する研究は皆無であり、国内外の差はむしろ開きつつあった。そのため、一刻の猶予もなく本研究課題の精力的実施が必要と考えられた。

2. 研究の目的

従って本課題では線形波動方程式でなく、時空間変動を含む複雑気流場の影響を織り込むことができる手法である、微小圧縮性流体方程式を基にした高精度数値解法の開発、および本手法を利用した当該音場の音響伝搬特性解明を行う。具体的な数値解法としては、CFD によって算出した流れ場を元に、LEE (Linearized Euler Equation; 線形化オイラー方程式) を基に音響伝搬を解く LE 法 (線形化オイラー法) による音響解析手法を開発する。

なお、LEE 解法は高亜音速～遷音速流を対象として航空分野で発達してきた手法であり、高次精度差分法が一般に適用されてきた。高次精度差分法は一般に高精度である一方、非構造格子の適用、および境界面近傍の差分格子の取扱いに困難を伴う、汎用化の難しい手法である。一方で、本研究が対象とする屋外音響伝搬問題における気流速度は通常、マッハ数 0.1 未満の非常に低いマッハ数であり、当該マッハ数域では低次精度の有限差分法でも妥当な解析結果が得られることが知られている。そこで本報ではさらなる当該マッハ数域の解析に特化し、有限差分法に代えて高次精度の数値微分は不得意ながらも汎用化に優れるコロケート非構造格子有限体積法による LEE 計算部実装を行う。

3. 研究の方法

前節で述べたとおり、LEE は通高次精度差分法によって解かれるため、有限体積法の導入は前例が少ない。したがって本研究はチャレンジングと考えられたため、以下の方針によって研究の進展を図った。

(1) LEE への有限体積法の準備的段階として、まず、非常に簡単な方程式である従来線形波動方程式への有限体積法の導入を行い、精度、計算負荷、適用性などを見極める。つい

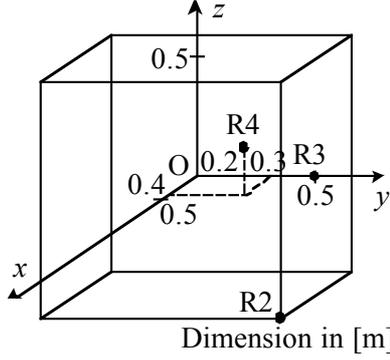


図 3 AIJ-BPCA Case B0-1T 解析対象形状

で、準備的段階で得た知見を基に、LEE への有限体積法の導入を行う。このような二段階からなる研究手法により、確実な研究の進展を図る。

(2) 有限体積法の実装にあたっては、スクラッチからコードを書く手法でなく、汎用のオープンソース有限体積法 CFD ライブラリ上での実装を行う。オープンソースコミュニティによって徹底的にテストされたライブラリの上で実装を行うことにより、実装確実性の向上および開発の迅速化が見込まれる。さらに、計算・メッシュデータ I/O フォーマットの共通化、当該ライブラリの有するプリ・ポストプロセッシングインターフェイスの有効活用など、開発コードの大幅な汎用性向上が見込まれる。

4. 研究成果

(1) 線形波動方程式への有限体積法の導入
線形波動方程式は、以下で表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c_0^2 \nabla^2 \phi, \quad (1)$$

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

ここで ϕ は速度ポテンシャル、 p は音圧、 ρ は媒質密度、 c_0 は音速、 t は時刻である。(1) 式左辺を非構造格子有限体積法によって離散化すると、以下となる。

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_V \phi dV \approx \frac{\phi^{n+1} - 2\phi^n + \phi^{n-1}}{\Delta t^2} V \quad (3)$$

ここで右肩の添字は時刻ステップ、 V は格子中の各セルの体積である。右辺は

$$\int_V c_0^2 \nabla^2 \phi dV = c_0^2 \int_S d\mathbf{S} \cdot \nabla \phi$$

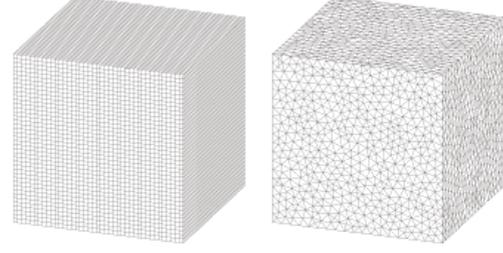


図 2 (左)直交格子、(右)四面体格子

$$\approx c_0^2 \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\nabla \phi)_f \quad (4)$$

となる。ここで \mathbf{S} はセル界面の面積ベクトルである。本式を実装し、AIJ-BPCA ベンチマーク問題 B0-1T (図 3) によって検証した。検証ケースは従来手法として差分法の一つである FDTD 法 (Case 1)、提案手法によって直交格子によって解析した場合 (Case 2)、四面体非構造格子による場合 (Case 3) の 3 ケースとした (図 2)。

図 3 における受音点 R2 の音圧時間波形の解析結果は図 7 のとおりである。Cases 1、2 の比較では、提案手法による解析結果が従来手法と完全に一致していることが見て取れる。このことから、本手法の妥当性が示される。また Cases 2、3 の比較では、四面体非構造格子における解析において直交格子より若干の精度低下が見られる物の、初期の時間応答算出には使用可能であることが見て取れる。

(2) LEE 解法の導入

前節において実装した線形波動方程式解法による解析結果が良好であったことから、有限体積法による LEE 方程式の実装を行った。LEE では、媒質の移流速度および圧力 \mathbf{U}, p を流れ成分 $\bar{\mathbf{U}}, \bar{p}$ 及び音響成分 (音響粒子速度および音圧) \mathbf{U}', p' に分解して、以下のよう

$$\frac{\partial \mathbf{U}'}{\partial t} = -(\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla) \mathbf{U}' - (\mathbf{U}' \cdot \nabla) \bar{\mathbf{U}} - \frac{1}{\bar{\rho}} \nabla p' \quad (5)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\bar{\rho} c^2 \nabla \cdot \mathbf{U}' - \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla p' \quad (6)$$

上式を空間方向にコロケートドグリッドの非構造格子有限体積法、時間方向に 4 次精度の Runge-Kutta 法で離散化した。その際、式 (5) の圧力勾配項における傾ケーテッドグリッド特有の数値振動を抑制するため、式 (5) 右辺の圧力勾配項以外のセル界面補間値、および界面隣接セル間の圧力勾配からセル界面におけるフラックスを求め、式 (6) にお

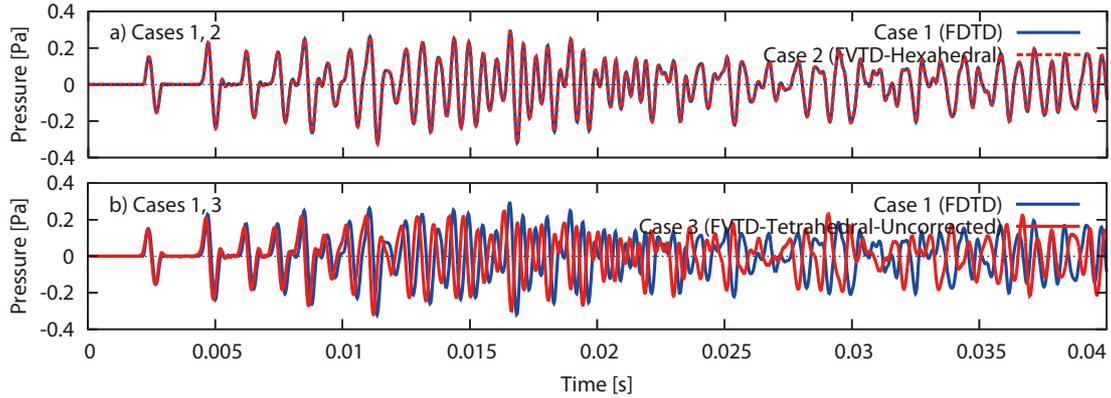


図 7 a) Cases 1(FDTD 法)、2(提案手法、直交格子)の比較、b) Cases 1、3(提案手法、四面体格子)の比較

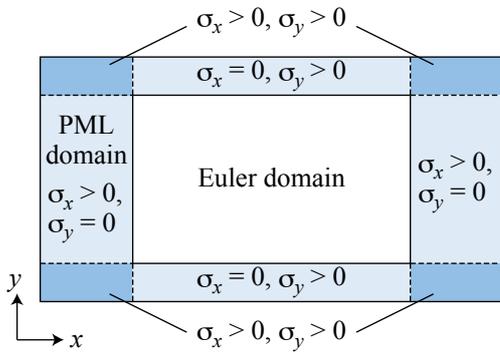


図 6 PML 領域

けるダイバージェンスの算出に用いた。

また本研究では屋外開領域問題を扱うため、解析領域端に到達した音波の反射を抑制する吸収境界条件の導入が不可欠である。本研究では、吸収境界条件として多用される Berenger (1994) の原 PML に替え、方程式を各座標軸方向に分解する必要がなく、非構造格子有限体積法への導入により適切と考えられた Hu (2001) による unsplit variable PML を適用した。また PML 領域(図 6)における長時間計算の安定化のために、Runge-Kutta 法によって求められた次時刻ステップの音響粒子速度と、次時刻ステップのセル界面フラックスから再構成されたセル中心における次時刻ステップの音響粒子速度をブレンドさせるフィルタリングを行った。

以上の提案手法を実装し、妥当性検証のために ICASE/LaRC CAA ワークショップ・ベンチマーク問題を基に、一様流速度のマッハ数を 0.1 としたケースの解析を行った。格子は直交格子とし、PML 無、有の 2 ケースをそれぞれ理論解と比較する。PML 有りの場合の解析領域は図 4 のとおりとした。

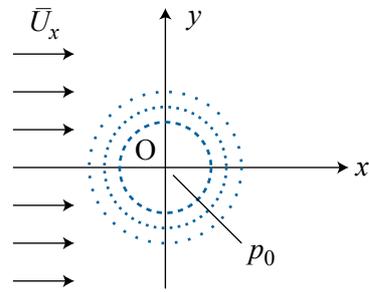


図 5 ICASE/LaRC Workshop ベンチマーク問題

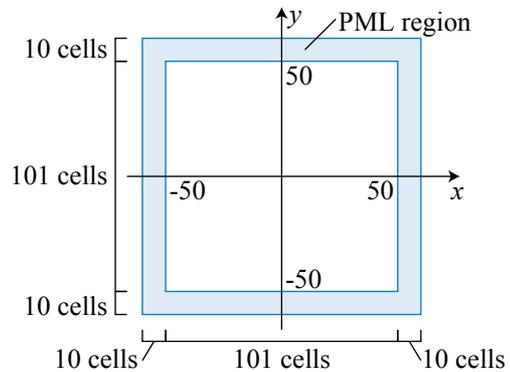


図 4 解析領域

解析結果を図 9 に示す。なお PML 有りの場合については、PML 領域を除いた Euler 伝搬領域のみを示す。マッハ数 0.1 の一様流によって、x 軸正方向に僅かに流されながら伝搬していることが判る。PML 領域を設定しない場合は、境界各面からの反射により時間進行とともに複雑な干渉模様を描いている。それに対し PML 領域有りの場合は、解析解とほぼ同様の音圧分布となっていることから、提案手法の妥当性、および PML 領域における良好な

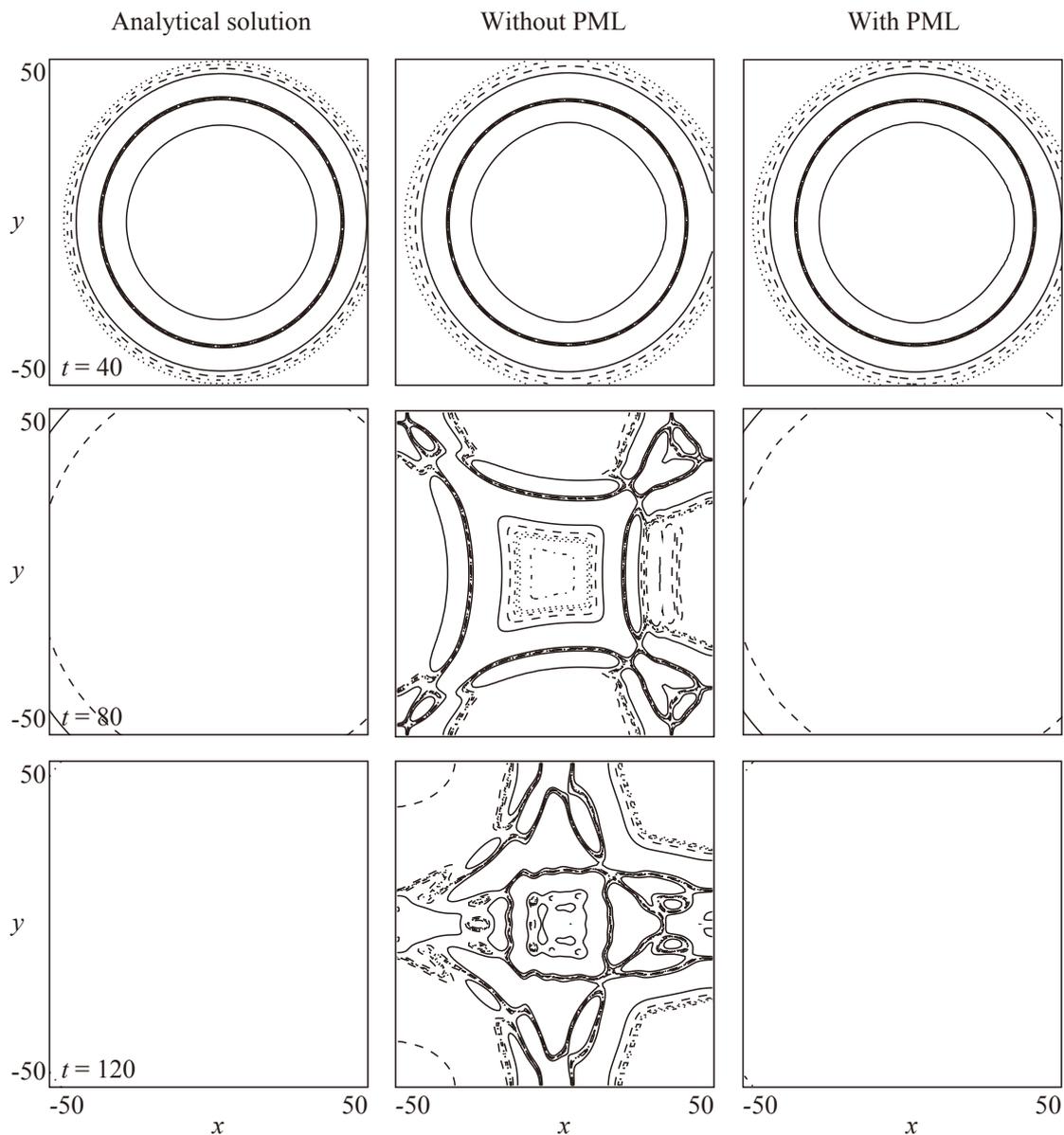


図 9 理論解、PML 無、PML 有の解析結果の比較

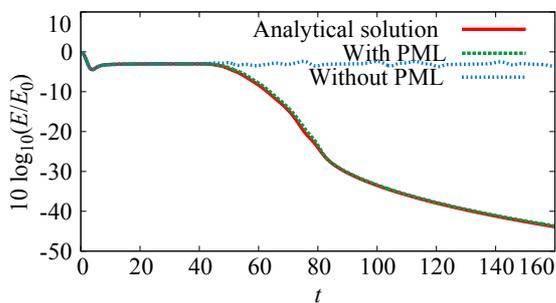


図 8 音場全体の音響エネルギー

音波の吸収が示される。

また図 8 には、音場全体の音響エネルギーの時間変化を示す。PML 無しケースではエネルギー

が一定に保たれていることから、提案手法全体にわたってエネルギーが散逸無く保存されていることが示される。また PML 有では理論解と良好に一致しており、提案手法の妥当性が示される。

(3) 総括

本研究では、高次精度差分法による従来の線形化オイラー方程式解法の課題であった汎用化の困難さを、低マッハ数下の解析を前提とすることで、精度には劣るが汎用性には大幅にすぐれ、多くの汎用 CFD コードの基礎となっている非構造格子有限体積法を導入することで解決を図った。さらに、提案手法をオープンソース汎用有限体積法ライブラ

りの OpenFOAM 上で実装することで、本手法の入力条件として必要となる屋外気流場解析のための汎用 CFD コードとの親和性を実質的にも大幅に向上を図った点が特徴である。

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 5 件)

- ① 大嶋拓也、LE 法による気流効果を考慮した汎用屋外音響伝搬解析手法の構築、日本音響学会建築音響研究会資料、AA2009-5、pp. 1-8、2009、査読無
- ② Takuya Oshima、Masashi Imano、A full finite-volume time-domain approach towards general-purpose code development for sound propagation prediction with unstructured mesh、Proceedings of Inter-Noise 2008 (Shanghai)、No. 287、2008、概要査読有
- ③ Takayuki Masumoto、Arief Gunawan、Takuya Oshima、Yosuke Yasuda、Tetsuya Sakuma、Coupling analysis between FMBEM-based acoustic and modal-based structural models - Convergence behavior of iterative solutions -, Proceedings of Inter-Noise 2008 (Shanghai)、No. 308、2008、概要査読有
- ④ 大嶋拓也、時間領域有限体積法による非構造格子汎用音場数値解析コードの開発 (2) 非直交格子補正および実数音響インピーダンス境界条件に関する検討、日本音響学会建築音響研究会資料、AA2007-27、pp. 1-8、2007、査読無
- ⑤ 大嶋拓也、時間領域有限体積法による非構造格子汎用音場数値解析コードの開発 (1) 定式化およびオープンソース数値計算ツールキット援用による核コードの実装、日本音響学会建築音響研究会資料、AA2007-17、pp. 1-8、2007、査読無

[学会発表] (計 4 件)

- ⑥ 大嶋拓也、LEE 解法による気流効果を考慮した音響伝搬解析手法の構築、日本音響学会 2009 年春季研究発表会、2009 年 3 月 18 日、東京工業大学
- ⑦ 大嶋拓也、オープンソース可視化ソフトウェアのための高速並列リーダコードの開発、第一回オープンソース CAE ワークショップ、2008 年 11 月 13 日、東京大学
- ⑧ 大嶋拓也、公共空間におけるサウンド・アートに関する基礎的調査研究、日本建築学会大会、2008 年 9 月 20 日、広島大学

- ⑨ 大嶋拓也、時間領域有限体積法による非構造格子波動音場解析 - オープンソース数値計算ツールキット援用による核コードの実装 -、日本建築学会大会、2007 年 8 月 30 日、福岡大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://oshima.eng.niigata-u.ac.jp/>

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・助教

研究者番号：40332647

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし