

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14347

研究課題名（和文）脈動理論を組み込んだ乱れによる複数開口間の換気量算定法の提案

研究課題名（英文）Prediction of Wind-Induced Natural Ventilation Rate caused by Turbulence considering Pulsation Flow

研究代表者

小林 知広（Kobayashi, Tomohiro）

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：90580952

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は建築において風圧係数差が微小な開口間での風力換気量が従来の予測手法では精度が悪化する問題を取り扱い、実用的な精度を有する簡易予測手法の提案を目指したものである。研究対象は2開口を有する単室とし、その開口位置を変化させることで風圧係数に関するパラメトリックスタディを行っている。研究手法としては風洞実験で真値を取得した後に精度検証を行なったLarge Eddy SimulationによるCFDを主に用いてデータ整備を行い、最終的に時間平均の風圧係数差、風圧係数差の標準偏差、開口部近傍風速を変数とする風力換気量の簡易予測式の提案が行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした乱れによる換気量の予測式は従来の予測手法では評価が不可能な微小な風圧係数差条件でも適切に換気量を予測することができる手法である。建物が密集する実際の市街地ではこのように開口間の風圧係数差が小さくなることも多く、適切な換気量予測式が存在しないことで省エネルギーのための自然換気設計自体を断念することにも繋がる可能性があるため、現実によく存在する状況での適切な予測式を提案したことは今後の自然換気設計啓蒙の意味で社会的に意義があると言える。また、本研究は当該分野の欠落箇所を補完する換気学の基礎研究でありこの意味での学術的意義も大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：This research deals with a problem that the conventional prediction method of wind-induced natural ventilation rate cannot work well for a case with small wind pressure coefficient (Cp value) difference. To propose simplified prediction method of the flow rate, the wind tunnel test was first performed to obtain true value which is to be compared with numerical result. The main work was carried out by CFD using Large Eddy Simulation (LES). By changing the location of the openings, i.e., Cp value difference, a parametric study was conducted. A simplified prediction method of the flow rate was finally proposed by evaluating 3 important parameter, 1) mean Cp value difference, 2) standard deviation of Cp value difference, and 3) velocity in the vicinity of the opening.

研究分野：建築環境工学

キーワード：自然換気 風力換気 脈動 風洞実験 CFD LES

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

日本では歴史的に通風を重視した建築設計がなされ、近年省エネや節電等の社会的背景から ZEH・ZEB の達成が求められる中で自然換気・通風設計への期待が高まっている。それに近年の目覚ましいソフトウェア環境の向上も加わり、設計段階で換気回路網計算や数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) の積極的な採用が見られるようになった。日本の自然換気研究は当該分野の研究を世界的に牽引してきたが、換気理論には学術的に依然として欠落した箇所も残されているのが実情である。研究代表者はこれまでに通風量予測手法や複雑な換気抵抗の特性を組み込んだ換気量算定法の提案などの換気理論の学術的基礎研究を実施し、換気回路網計算や CFD 解析も多数実施してきた。その中で市街地内の建物の開口間では風圧係数差が小さい条件も多く、その場合、時間平均の風圧係数差に基づく換気の式や平均流のみを解く Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) による CFD 等の従来の評価方法では乱れの影響を十分考慮できないため換気量の計算結果が極度に過小評価される結果が多く示され、そのために自然換気設計を断念せざるを得ないこともある。実用的かつ簡易的な乱れの換気量予測法は現時点で存在せず、これが建築環境工学の欠落した箇所でもある。そこで風圧係数差が微小な条件でも精度の良い乱れの効果を適切に組み込んだ新たな換気量予測法を提案すべく、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

種々の社会背景により住宅/非住宅建築ともに自然換気・通風を計画的に組み込んだ設計へのニーズが高まっており、計算ソフトウェアの発達もあり設計段階から回路網等を用いた換気量計算が行われることも増えた。密集市街地において風力換気を行う際、対面に自然換気口を設けて経路を確保しても風圧係数差が無く十分な換気量が得られないと計算されるため、自然換気設計を断念せざるを得ない場合がある。しかし、実際にはそのような場合でも風の乱れにより自然換気が行われると考えられるが、現在その影響を考慮した換気量算定法は存在しない。そこで本研究では乱れによる換気のみカニズムとして「混合」と「脈動」現象に着目し、両者をモデル化して実用的な制度を有する物理現象に基づく新たな換気量予測法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では主に 2 開口を有する単純な形状の単室モデルを対象とし、その開口部位置を変化させることで風圧係数差を変化させることで風力換気量の評価を行う方針とした。以下に本研究の方法を順を追って説明する。

(1) 本研究では非定常的な気流の変動を評価するために Large Eddy Simulation (LES) を用いた CFD 解析を主な手法として用いるが、その前段階として測定による傾向の理解と CFD 解析の精度の検証の 2 点を目的として風洞実験を実施した。実験モデルは 1 辺 200mm の矩形模型として開口部 2 箇所の位置を自在に変化可能な使用とした。測定項目は 1) 模型中央高さの風圧係数の水平分布、2) 模型周辺の風速分布、3) 模型内の換気量の 3 項目を主に測定した。風速分布は LES での風速変動と比較可能とするため熱線風速計を用いて高周波で測定を行い、換気量測定は吹出し型の風洞において CO₂ ガスを模型内で定常発生させるとともに吸引チューブから定常的に採取することで室平均の定常濃度を測定することで、実質的な換気量である Purging Flow Rate (PFR) を測定し、CFD 解析結果と比較可能な真値を取得した。

(2) 本研究で対象とする脈動現象の CFD は RANS による定常解析は不可能であるため LES を用いて解析を行う必要があるが、その解析の初期段階で計算格子分割を変更して格子依存性を確認する必要がある。そのため、計算格子を 4 段階に変化させて模型周辺の風速分布に格子の依存性が見られなくなる計算格子を採用し、以降ここで用いた模型周辺の格子分割と計算手法を採用して LES による計算を実施することとした。

(3) CFD 解析精度の検証を行うため、前述の風洞実験を再現した風洞実験を実施し、模型周辺の風速分布と本研究で最も重要である換気量の解析精度が十分確保されていることを確認することとした。実験で測定可能な換気量は室内で発生したトレーサーガスの濃度測定に基づく換気量 (PFR) であったため、CFD 解析においても同等の比較を可能にするために室内に均一配置した 27 点から継続的に粒子を発生させて粒子の個数濃度の上昇過程から換気量 (PFR) を推定する方法とした。

(4) LES を用いた CFD 解析により、まずは単一開口及び複数開口条件における開口サイズが換気量に及ぼす影響の確認を行った。既往の研究では開口サイズに比例して換気量が増加する傾向が報告されていたが、本研究では対称に配置された時間平均の風圧係数差が 0 の状態での 2 開口条件での解析を行い、1) 対面開口で同様の傾向が得られるかどうか、2) 単一開口と複数開口ではその比例定数にどの程度の差が生じるかどうかを確認することとした。

(5) LES を用いた CFD 解析で 2 開口を有する単室モデルの開口位置を変化させ、風圧係数差を

微小な数値から大きな数値まで変化させ、「どの程度の風圧係数差の範囲までで従来式の予測精度が悪化するのか」という従来手法の適用可能範囲を明らかにする研究ステップを踏むこととした。換気量の評価は前述の LES 同様に室内で粒子を発生させた際の PFR を用いて評価を行う。

(6) 本研究の目的である風圧係数差が微小な複数開口条件での換気量の簡易予測手法の提案を行う。方法は精度を確認した LES による CFD 解析とし、開口数は2つで固定した。この2開口の位置を風上側、側面、風下側と変化させ、開口部設置面と風圧係数差をパラメトリックに変化させて換気量評価を行うこととした。換気量の評価は前述の PFR をまずは用いたが、物理現象に基づく換気量予測の提案が目的であるため汚染物濃度に基づく換気量だけではなく、開口部から流入する気流の速度をそれぞれ瞬時に積分して得られる瞬時流入/流出風量を非定常計算中に算出し、その絶対値の時間平均を取ること通気量 (AFR) の評価も行うこととした。これは、従来式 (オリフィス式) が風圧係数差に基づく気流の移動量の予測式であるため、本研究で対象とする流れ場においては実験では測定不可能であるが CFD では算定が可能であり、従来式と比較すべきは AFR であるとの考えに基づく。また、AFR と PFR の差が室の換気口率を表すと理解できるものである。ここで得られた換気量 (AFR) を予測するための基本的な考えとして、1) 従来式と同様に時間平均の風圧係数差 (ΔC_p) は重要なパラメータと位置付けたが、対象とする気流の乱れを特徴付ける指標として、2) 風圧係数差の標準偏差 ($\sigma \Delta C_p$) を加え、これが脈動現象を表す重要なパラメータとなると想定した。また、乱れの換気には脈動に加えて開口部での渦による混合も換気のみカニズムになり得るため、それを表すパラメータとして 3) 開口部近傍風速 (V_2) を想定して、この3変数を用いた簡易予測式を提案することとした。

4. 研究成果

以下に本研究で得られた研究成果の重要項目を研究ステップごとにまとめて示す。

(1) 風洞実験による換気量等の測定

以下の図1に示す開口の配置において、開口位置 (r) を変化させることで換気量等の測定を行った。実験は表1に示す全21条件で行い、同表にはCO₂濃度に基づく換気量 (PFR) と開口を有しない模型で測定した風圧係数差及びその標準偏差もまとめて示している。本研究ではこれを CFD 解析の真値として後述する解析結果と比較を行うが、ここで得られた傾向の代表的な結果として図2に風圧係数差と PFR の測定結果の関係を示す。この結果から、風圧係数差が微小な条件では従来手法であるオリフィス式の精度が悪いことが実験においても示された。

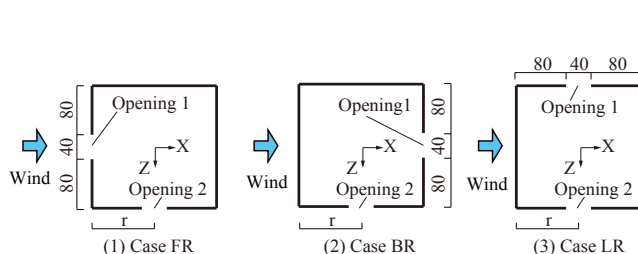


図1 風洞実験の測定条件

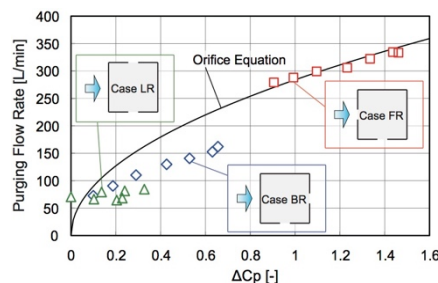


図2 風圧係数差と PFR の測定結果

表1 風洞実験の結果

Description	Case	Central Position of Opening (X, Y, Z) [mm]		ΔC_p [-]	$\sigma_{\Delta C_p}$ [-]	PFR [L/min]	ACR [1/min]
		Opening 1	Opening 2				
	Case FR-1	(-100,100,0)	r = 40 (-60, 100, 100)	1.46	0.226	333	43.8
	Case FR-2	(-100,100,0)	r = 60 (-40, 100, 100)	1.44	0.245	334	44.0
	Case FR-3	(-100,100,0)	r = 80 (-20, 100, 100)	1.33	0.257	322	42.4
	Case FR-4	(-100,100,0)	r = 100 (0, 100, 100)	1.23	0.248	306	40.2
	Case FR-5	(-100,100,0)	r = 120 (-20, 100, 100)	1.10	0.229	299	39.3
	Case FR-6	(-100,100,0)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.99	0.201	288	37.9
	Case FR-7	(-100,100,0)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.91	0.189	279	36.7
	Case BR-1	(100,100,0)	r = 40 (-60, 100, 100)	0.66	0.127	162	21.3
	Case BR-2	(100,100,0)	r = 60 (-40, 100, 100)	0.63	0.136	153	20.1
	Case BR-3	(100,100,0)	r = 80 (-20, 100, 100)	0.53	0.143	141	18.5
	Case BR-4	(100,100,0)	r = 100 (0, 100, 100)	0.43	0.148	130	17.1
	Case BR-5	(100,100,0)	r = 120 (-20, 100, 100)	0.29	0.142	110	14.5
	Case BR-6	(100,100,0)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.19	0.127	90.4	11.9
	Case BR-7	(100,100,0)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.10	0.103	72.5	9.54
	Case LR-1	(0,100,-100)	r = 40 (-60, 100, 100)	0.23	0.178	68.1	8.96
	Case LR-2	(0,100,-100)	r = 60 (-40, 100, 100)	0.20	0.165	64.5	8.48
	Case LR-3	(0,100,-100)	r = 80 (-20, 100, 100)	0.10	0.163	66.4	8.73
	Case LR-4	(0,100,-100)	r = 100 (0, 100, 100)	0.00	0.166	70.5	9.26
	Case LR-5	(0,100,-100)	r = 120 (-20, 100, 100)	0.14	0.164	79.4	10.4
	Case LR-6	(0,100,-100)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.24	0.162	81.4	10.7
	Case LR-7	(0,100,-100)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.33	0.157	84.5	11.1

(2) CFD 解析における計算格子依存性の確認

図 3 に 4 種の計算格子で LES での解析を行う際に重要となる計算格子の検討を行った。

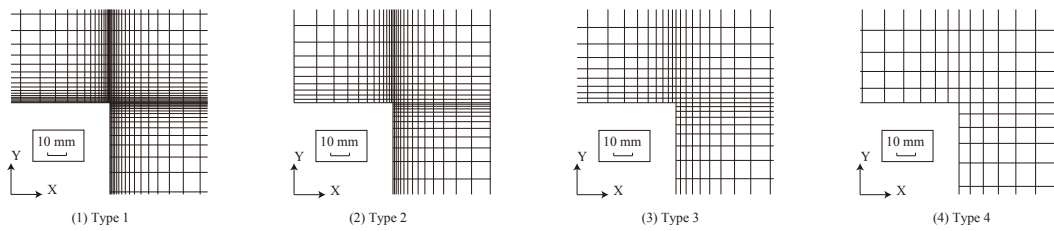


図 3 検討を行った計算格子 (模型周辺)

図 4 に各計算格子条件で得られた模型上部における風速の鉛直分布を示す。比較的粗い計算格子でも定性的な傾向は再現可能と言えるが、Type 4 では明らかに他の 3 条件と異なる分布が得られており、Type 3 は Type 1 及び 2 と概ね変わらないが模型のごく近傍で多少の差異が見られたため、本研究では Type 2 を格子依存性のない適切なメッシュと判断してその後の LES における解析を行って支障がないものと判定した。

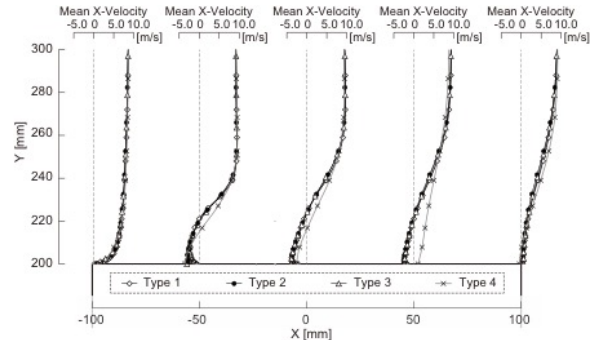


図 4 LES で得られた模型上部の風速の鉛直分布

(3) CFD 解析における解析精度検証

模型周辺風速と換気量 (PFR) を実験と CFD で比較することで CFD 解析精度検証を実施した。本研究では最終的な評価対象が換気量であるため、ここでは PFR の精度検証結果を示す。実験における換気量測定が CO₂ をトレーサガスとした濃度に基づく PFR であったため、CFD では前述の通り模型内部で粒子を発生させることで換気量評価を行った (図 5)。この個数濃度に基づく PFR と実験結果を換気回数として比較した結果が図 6 であり、評価対象である換気量が概ね良好な精度で解析されていることが確認されたと判断した。以降はここで用いた解析手法を採用して LES によるパラメトリックスタディを行う研究ステップへの進むこととした。

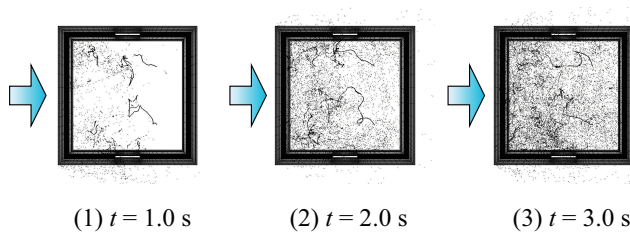


図 5 LES における PFR 算出のための粒子飛散

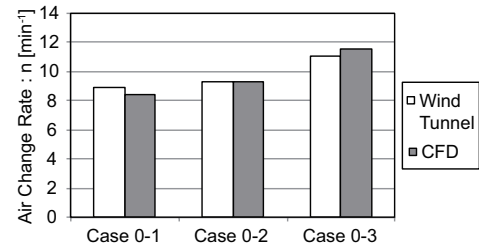


図 6 実験と CFD での PFR の比較

(4) 単一開口と複数開口条件における開口サイズが換気量に及ぼす影響

図 7 に単一開口条件及び複数 (対面) 開口条件における開口面積と換気量 (PFR) との関係を示す。両条件ともに開口面積に比例して換気量が増加する傾向が確認された。単一開口条件と複数開口条件を比較すると、複数開口条件で換気量が大きくなるが、単一開口では混合のメカニズムのみで換気が行われることに対して、複数開口では瞬時の通風としての脈動現象も加わるために増加したものと理解することができる。解析実施前には、この脈動の影響が大きいものと予測されたが、結果的には差はあまり大きなものではないことが示された。

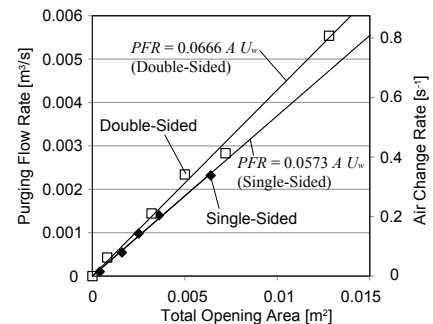


図 7 開口面積と換気量

(5) 風圧係数差と換気量の関係

LES を用いた CFD 解析により、風圧係数差を微小な範囲でパラメトリックに変更して PFR と前述の AFR を算出した。結果を図 8 に示す。このことから、単室条件であっても風圧係数差が 0.1

程度までの条件では従来のオリフィス式が機能せず換気量を過小評価するという適用可能範囲を明確にするとともに、AFRとPFRの違いから室の換気効率が示されたと言える。

(6) 乱れによる換気量の簡易予測式

さらなるパラメトリックスタディを重ね、換気量の真値となるデータを蓄積した上で、本研究で仮説を立てた乱れによる換気量を決定する3種のパラメータ (ΔC_p 、 $\sigma \Delta C_p$ 、 V_2) と与条件である有効開口面積 (αA)・外部風速 (V_2) を用いた簡易予測式として以下の予測式を提案した。

$$Q_{Pre} = \alpha AV_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p} + c \cdot \Sigma AV_2}$$

当該予測式で得られた結果をCFD解析で得られた真値としての換気量 (AFR) と比較した結果を図9に示す。当該解析では完全に風圧係数差 (ΔC_p) が0となる条件も含まれているが、この場合に風圧変動と壁面近傍風速が支配的になることから換気量が0にならず、LESに近い結果が得られた。誤差は真値に対して30%以内に収まっており、脈動と混合という物理現象を考慮した簡易予測手法の提案とその精度の検証が行われたと言える。今後のさらなる発展には、当該理論に基づきより複雑な流路に対する適用の可能性検討が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 16 件)

- ① 堂本浩規, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その11), 空気調和・衛生工学会近畿支部, 2019.3
- ② 堂本浩規, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その10), 空気調和・衛生工学会大会, 2018.9
- ③ 堂本浩規, 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その11), 日本建築学会大会, 2018.9
- ④ 堂本浩規, 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その10), 日本建築学会近畿支部, 2018.6
- ⑤ T. Kobayashi, et al.: Simplified Prediction Method of Wind-Induced Natural Ventilation Rate caused by Turbulence for a Room with Minute Wind Pressure Difference, Roomvent 2018, 2018, 6
- ⑥ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その9), 空気調和・衛生工学会近畿支部, 2018.3
- ⑦ 堂本浩規, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その8), 空気調和・衛生工学会近畿支部, 2018.3
- ⑧ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その7), 空気調和・衛生工学会大会, 2017.9
- ⑨ 小林知広, Lim Eunsuら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その9), 日本建築学会大会, 2017.8
- ⑩ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その8), 日本建築学会大会, 2017.8
- ⑪ 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その7), 日本建築学会近畿支部, 2017.6
- ⑫ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その6), 日本建築学会近畿支部, 2017.6
- ⑬ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その5), 空気調和・衛生工学会近畿支部, 2017.3
- ⑭ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その4), 空気調和・衛生工学会大会, 2016.9
- ⑮ 藤田拓也, 小林知広ら: 複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その5), 日本建築学会大会, 2016.8

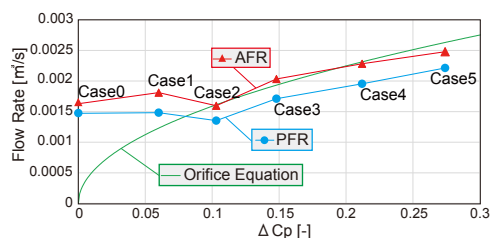


図8 風圧係数差とPFR・AFR

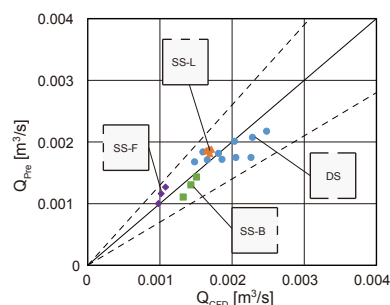


図9 簡易予測式の精度検証

- ⑯ 藤田拓也、小林知広ら：複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究（その4），日本建築学会近畿支部，2016.6

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：イム ウンス

ローマ字氏名： LIM Eunsu

所属研究機関名：東洋大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：50614624

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：サンドバーグ マッツ、藤田 拓也、堂本 浩規

ローマ字氏名： Sandberg Mats, Fujita Takuya, Domoto Hiroki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。