

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560475
 研究課題名（和文） 自動車—道路面間のベンチュリ効果を活用した高速道路トンネルの換気と電力負荷軽減
 研究課題名（英文） Energy load reduction of expressway tunnel ventilation system using air suction induced by low pressure under running vehicle
 研究代表者
 北川 徹哉（KITAGAWA TETSUYA）
 法政大学・人間環境学部・准教授
 研究者番号：10287584

研究成果の概要（和文）：高速道路トンネルの換気設備の省電力化のために、高速で走行する自動車と路面との間の空間に生じる負圧により、ダクトを経由して外気を吸入する手法を提案した。自動車通過時の路面上の圧力変動を屋外実験により求め、これを境界条件とする数値流体解析により外気吸入ダクト内の流れの挙動を調べた。また、外気吸入ダクトの形状および通気条件を変えて解析を行い、吸入効果の高い条件を探った。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a method for the ventilation in expressway tunnels using negative wind-pressures generated underneath running vehicles, and aims to reduce the electric power consumption of the tunnel ventilation facility. Estimation of the air volume ventilated with this method is needed to predict the reduction of the electric power. In this study, numerical analyses for the ventilation method are performed using the vehicle-induced-pressure time history obtained from field experiments. The ventilation-duct shape is varied and a few ventilation-control methods are applied; the optimal strategy is discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：風工学，維持管理工学，エネルギー施設

1. 研究開始当初の背景

とぎれることなく流れることを要求される高速道路交通は社会と経済を支える基幹システムであるが、通行する自動車と道路施設とは燃料・電力エネルギーを常時消費し、これを低減するための具体的な取り組みが

必要とされている。低燃費化やハイブリッド化、および燃料電池技術の開発により、自動車の低エネルギー性能や環境負荷軽減性はめざましく向上しつつある。しかしながら、たとえ車体そのものの低エネルギー性能が向上しても、高速道路を通行する自動車があ

る限り、管制情報施設、トンネル換気、照明や電光表示盤、ロードヒーティング、サービスエリアなどの多数の各施設・設備は数百キロ～数メガ W 規模の受電力を必要とすることに変わりはない。これらの設備は事故防止やドライバーの安全のため、ひいては人や物、社会の円滑な動きのために必要不可欠であるが、“ランニングエネルギー”として昼夜を問わず電力を使用する。したがって、高速道路の施設の電力負荷軽減をも精力的に進める必要がある、このための技術ニーズがある。たとえば、あるトンネルは年間およそ 1.5 ギガ Wh もの電力量を使用しており、これは火力発電換算で約 1 千トン/年の CO₂ 排出量に相当する。様々な規模のトンネルが全国に多数存在し、トンネルだけでも膨大なエネルギー負荷、環境負荷を強いているのである。特に、高速道路のトンネル内に設置されている換気ファンはトンネルが長いほど大規模なものとなっており、かつ高い電力負荷の下での稼働を強いられるため、その省電力化が重要な課題となっている（例えば、【亀井・中安：近畿地方整備局管内技術研究発表会（2004）】）。

2. 研究の目的

本研究においては、高速道路トンネルの換気ファンの電力消費を軽減するための新しい手法を開発する。一般に、トンネルの換気ファンは大型モーターにより駆動され、トンネル外の新鮮な空気をトンネル内に吸入し、自動車の排気ガスを含むトンネル内の空気をトンネル外に流出させる[例えば、日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説]。これに対して本研究においては、モーターのような電力駆動装置に頼らず、トンネル内を走行している自動車の運動エネルギーを外気吸入のための駆動源とする。これには高速で走行する自動車と路面との間のベンチュリ効果（強制的な空気の縮流）により生じる強い負の圧力をエネルギー源として利用し、トンネル外から空気を準・自然吸入することを考える（図-1）。この代替効果として、換気ファンの稼働率や回転数を低く抑え、電力消費量を低減させることが狙いである。本手法は国内外において検討された例はなく、研究代表者がこれまでに行ってきた自動車周囲の乱気流を利用した発電体の研究（科学研究費補助金・若手研究（B）、およびその研究成果：[北川・嶋澤（2007）]）の経験から生まれたアイデアである。本手法を通じて、高速道路の自動車交通流が持つエネルギーを高速道路の施設電力にフィードバックするという、高速道路交通におけるエネルギー負荷軽減へむけた一つのシステムの形成が目標であり、研究としての新しさである。

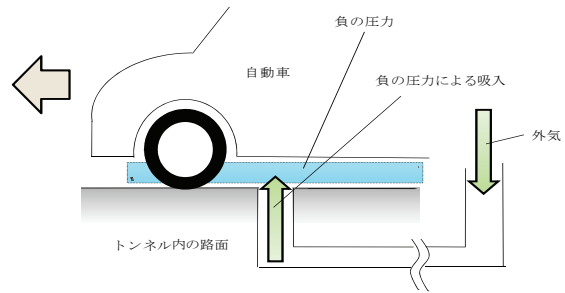


図-1 外気吸入方法の概念

3. 研究の方法

まず、自動車通過による道路面上の圧力変動を調べるために屋外実験を行った。図-2に示すように、圧力センサー(ICP Dynamic Pressure Sensor, Model M103B03)を路面上に設置し、その真上を自動車の中央が通るように通過させた。車速 U_v を 60~120km/h でランダムに変えつつ繰り返し自動車を通過させて、路面上に発生する圧力の時刻歴を計測した。ここで、サンプリング周波数は 1000Hz、データ数は 10000 である。また、 U_v については、ドライバーが自動車の速度メーターの値を読み取り、これを記録した。得られた圧力の時刻歴には風やノイズなどの影響が含まれるため、これらをバンドパスフィルタにより除去した。なお、実験に用いた自動車はトヨタ・プロボックスバン、トヨタ・bB、トヨタ・ハイエースである。以上の実験データを用いて、道路面上の圧力変動モデルを作成した。

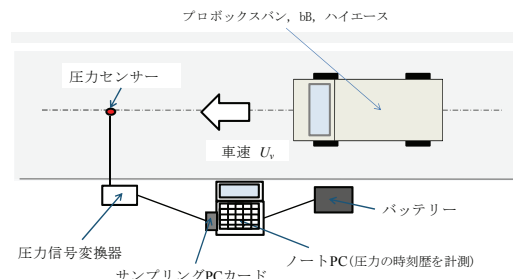


図-2 屋外実験のセットアップ

次に、屋外実験により得られた圧力変動モデルを境界条件に与えた 3 次元数値流体シミュレーションを行い、外気吸入効果を検討した。用いた方程式は、非圧縮性流体の連続の式とナビア・ストークス式であり、これらをコロケート格子において差分法で離散化し、LES (Large Eddy Simulation) を導入した。ナビア・ストークス式の対流項には 3 次精度上流差分を用いた。さらにナビア・ストークス式の対流項は 2 次精度アダムス・バッシュフォース法を、粘性項に 2 次精度クラック・ニコルソン法を用いる半陰解法について SMAC 法により解いた。

解析空間である外気吸入ダクトは二つの

タイプを想定した。その概要を図-3に示す。その一つは直筒タイプであり、もう一つはトンネル側の開口部付近が円弧状に湾曲している曲筒タイプのものである。これらのトンネル側開口部に屋外実験で得られた道路面上の圧力変動モデルを境界条件として与え、外気吸入側開口部では圧力を基準圧力（大気圧）で一定とした。また、外気吸入ダクト内の壁面上では流速はスリップ条件、圧力は法線方向勾配ゼロの条件を課している。図-4はトンネル側開口部付近の計算格子の立面図である。ダクトの壁面付近および開口面付近の格子配置を細かくしている。

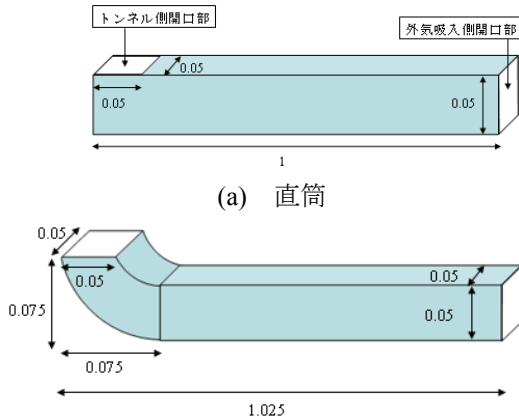


図-3 外気吸入ダクトの概要

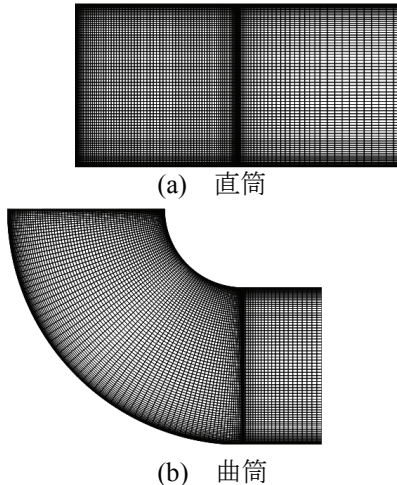


図-4 トンネル側開口部付近の格子配置

4. 研究成果

プロボックスパンを用いた屋外実験により得られた圧力係数の時刻歴波形 $C_p^s(t)$ のアンサンブル平均をとったものが図-5である。ここで横軸の t は無次元時間 $t_s U_v / L_v$ であり、 U_v は車速 (m/s)、 t_s は時間 (s)、 L_v は車長 (m) である。図-5の波形をフーリエ変換により周波数領域の関数 $C_p^s(f)$ へ変換し、次式の複素関数でフィッティングすることでモデル化を行った。なお、 f は無次元周波数 $f_h L_v / U_v$

(f_h : 周波数(Hz)) である。

$$|C_p^s(f)| = \begin{cases} a_1 \exp(a_2 |\log f + a_3|^{a_4}) & (f \neq 0) \\ 0 & (f = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$C_p^s(f) = |C_p^s(f)| \times \exp\{-i\{2\pi b_1(\exp(b_2(f-b_3))+1)(f-b_4)\}\} \quad (2)$$

式(1)、(2)における各パラメータは $a_1=0.011$, $a_2=-3.1$, $a_3=0.51$, $a_4=1.2$, $b_1=1.6$, $b_2=-5.8$, $b_3=0.065$, $b_4=0.72$ である。図-6ならびに図-7は、それぞれ式(1)と式(2)によるフィッティングの様子を表し、いずれも実測と高い整合性を示している。式(2)をフーリエ逆変換すれば、圧力変動の時刻歴 $C_p^s(t)$ が得られる。

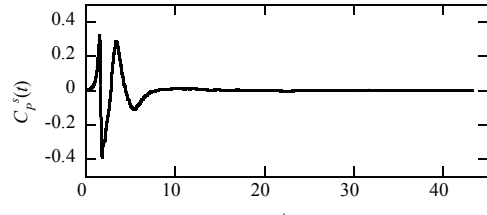


図-5 プロボックスパンの場合の圧力係数時刻歴のアンサンブル平均

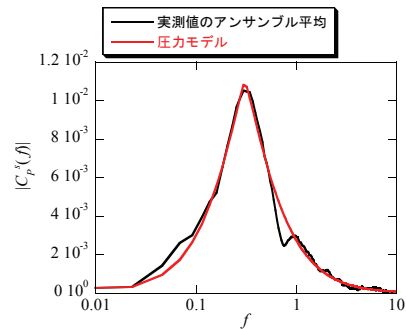


図-6 式(1)による圧力係数(絶対値)のフィッティング

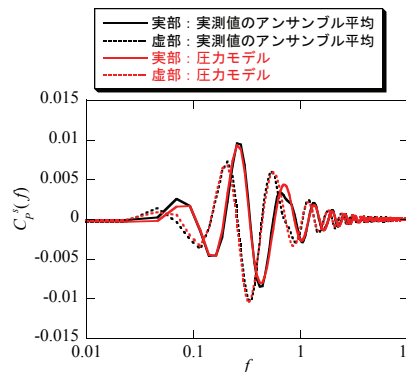


図-7 式(2)による圧力係数(実部、虚部)のフィッティング

さらに、このモデルをプロボックスパン以外の車種へ適用できるように拡張した。各車両による屋外実験データを詳細に検討したところ、圧力変動 $C_p^s(t)$ の強さは車体の地上

高（道路面と車体下面との間の長さ）と相関があることがわかった．そこで次式のように、式(2)のフーリエ逆変換で得られる $C_p^s(t)$ に係数を乗じることで対応した．

$$C_p(t) = \begin{cases} A^p C_p^s(t) & (C_p^s(t) \geq 0) \\ A^n C_p^s(t) & (C_p^s(t) < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$A^p = \left(\frac{h_v^s}{h_v} \right)^{ap} \quad (4)$$

$$A^n = \left(\frac{h_v^s}{h_v} \right)^{an} \quad (5)$$

式(3)の $C_p(t)$ が圧力変動モデルである．ここで h_v^s はプロボックスパンの地上高（=0.2m）， h_v は各車両の地上高である．また、式(4)、(5)におけるべき指数 ap および an はそれぞれ0.3、0.6とした．本モデルによって得られる $C_p(t)$ の波形を屋外実験によって得られた波形と比較したものが図-8～10である．それぞれ、bBの場合、プロボックスパンの場合、ハイエースの場合である．いずれのケースも本モデルは実測波形をほぼ近似できていると思われる．

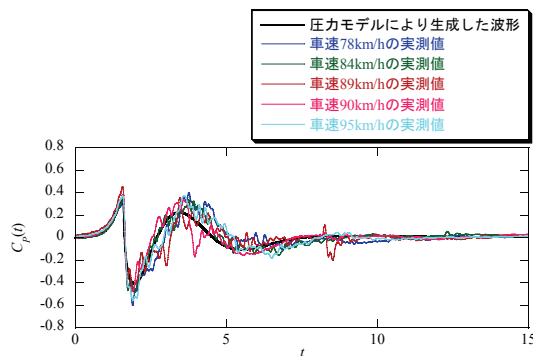


図-8 bB ($h_v=0.17$ m) における圧力変動モデルと実測波形との比較

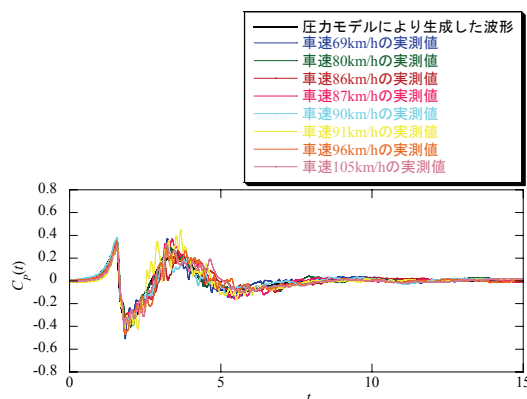


図-9 プロボックスパン ($h_v=0.2$ m) における圧力変動モデルと実測波形との比較

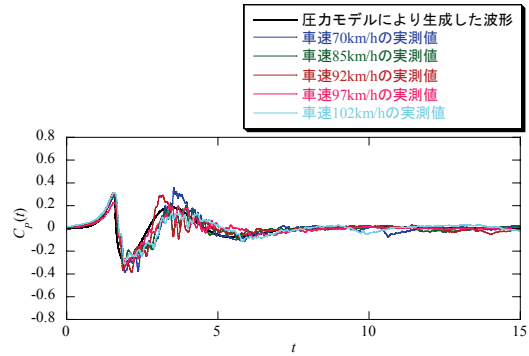
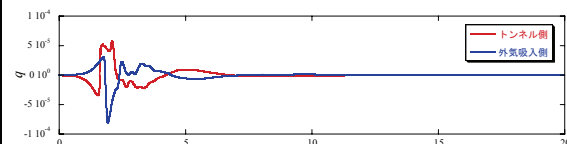


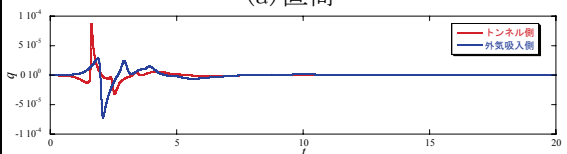
図-10 ハイエース ($h_v=0.3$ m) における圧力変動モデルと実測波形との比較

以上のように作られた圧力変動モデルを図-3に示した外気吸入ダクトのトンネル側開口部の面に境界条件として与え、数値流体解析により外気吸入効果を調べた．

図-3(a)の直筒の場合と図-3(b)の曲筒の場合のトンネル側開口部と外気吸入側開口部での無次元流量 q の時刻歴を、それぞれ図-11(a)、(b)に示す．流量はダクトへ空気が流入するときに負でダクトから流出するときに正と定義している．本研究は、外気吸入側開口部から外気を吸入し、トンネル側開口部からトンネル内へ外気を放出することが目的であるので、外気吸入側開口部では流量の値が負でトンネル側開口部では流量の値が正であることが望ましい．図-11(a)、(b)を見ると、各ダクト形状で q の波形は異なるものの、トンネル側開口部でも外気吸入側開口部でも空気の出入りが激しく、外気吸入効果を分析するのは難しい．



(a) 直筒



(b) 曲筒

図-11 流量の比較

そこで、外気吸入の程度をわかりやすくするために、次式により無次元流量収支 Q を求めた．

$$Q(t) = \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (6)$$

得られた Q の時刻歴を図-12(a)、(b)に示す．

直筒であっても曲筒であっても、 $t=10$ 付近で Q はほぼゼロとなり、それ以降も増加しない。これは空気の流れ方向が反転することに原因があり、外気吸入効果がほとんど無いことを意味する。

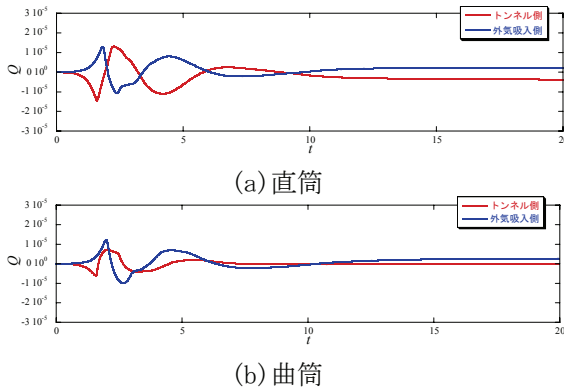


図-12 流量収支の比較

そこでトンネル側開口部付近において、例えば図-13 に示す軽量な弁のような構造による通気制御を考えた。制御方法としては、トンネル側開口部での圧力が負となる場合、および圧力の垂直方向勾配が負となる場合に通気するものとした。これら二つの通気制御を行った場合について、直筒ダクトでの Q を図-14 (a), (b) に示す。通気制御を行っていない図-12 と比較して Q が大きく、外気吸入効果がある。

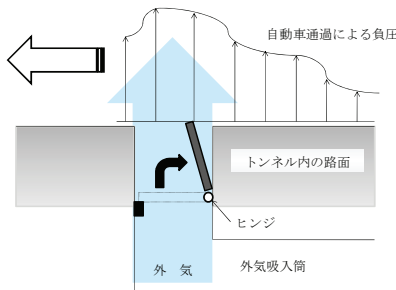


図-13 トンネル側開口部での流れの制御

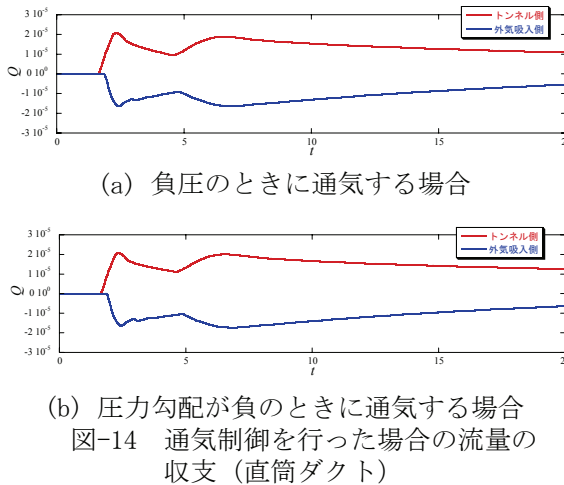


図-14 通気制御を行った場合の流量の収支 (直筒ダクト)

外気吸入効果を、 $t=20$ におけるダクトからトンネル内への流量の収支 Q_1 と外気吸入側開口部からダクト内への流量の収支 Q_2 との和

$$Q_s = Q_1 + (-1)Q_2 \quad (7)$$

で評価する。式(7)により得られた Q_s をまとめたものが図-15 である。 Q_s が大きいほど外気吸入量が多いので、圧力勾配が負のときに通気する制御方法のときに最も効果が高い。また、曲筒よりも直筒のダクトの方が外気吸入性能が良い。以上は無次元量での評価であるが、具体的には外気吸入ダクト開口部の一辺が 20cm で、1 台の普通自動車 が 100km/s 程度で通過した場合、およそペットボトル 1 本分の外気吸入が得られる計算になる。また、これに外気吸入ダクトの設置本数と自動車の交通量を乗ずれば、単位時間あたりの総外気吸入量を得られる。

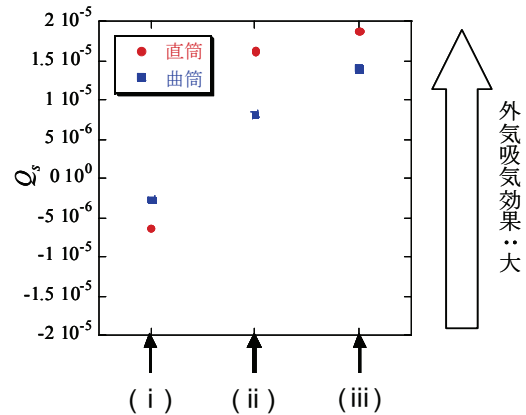


図-15 外気吸入効果の比較

- (i) 通気制御なし
- (ii) 負圧のときに通気する場合
- (iii) 圧力勾配が負のときに通気する場合

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 4 件)

- ① H. Kim, W. Liu, T. Kitagawa and E. Dragomirescu, Flow-force relationship for two staggered circular cylinders with low angle of incidence, Journal of Structural Engineering, JSCE, reviewed paper, Vol.54A, 2008, pp. 411-419
- ② T. Kitagawa and H. Ohta, Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number, Journal of Fluids and Structures, reviewed paper, Vol.24, 2008, pp.

680-699

- ③北川徹哉, 金 惠英, 溝口卓弥, ドラゴミレスク エレナ, ウェイクギャロッピングにおける流れ場の数値流体解析による検討, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2008, pp. 373-378
- ④北川徹哉, 嶋澤善大, 自動車励起ガストエネルギーを利用した発電の試み, 日本風工学会論文集, 査読有, 32 巻, 2007, pp. 87-92

研究者番号 :

[学会発表] (計 7 件)

- ①吉田守孝, 北川徹哉, 風速急増時における正方形断面角柱周りの流れ場及び空気力特性, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2 日, 福岡大学
- ②北川徹哉, 溝口卓弥, ドラゴミレスク エレナ, ウェイクギャロッピングにおける流れ場と空気力に関する数値解析的検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 11 日, 東北大学
- ③高柳雅史, 北川徹哉, 自動車通過による路面上の圧力変動, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 10 日, 東北大学
- ④北川徹哉, 高柳雅史, 自動車通過による路面上の圧力変動, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 11 日, 日本学術会議
- ⑤劉文, 北川徹哉, Dragomirescu Elena, 主流に対して迎角を有する 2 円柱の揚力に関する数値流体解析, 平成 19 年度土木学会中部支部研究発表会, 2008 年 3 月 7 日, 金沢大学
- ⑥溝口卓弥, 北川徹哉, Dragomirescu Elena, ウェイクギャロッピングの ALE シミュレーション, 平成 19 年度土木学会中部支部研究発表会, 2008 年 3 月 7 日, 金沢大学
- ⑦北川徹哉, 劉文, Dragomirescu Elena, 迎角を有する 2 円柱における後流側円柱の平均揚力のスイッチングに関する CFD, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007 年 9 月 13 日, 広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 徹哉 (KITAGAWA TETSUYA)
法政大学・人間環境学部・准教授
研究者番号 : 10287584

(2) 研究分担者

ドラゴミレスク エレナ (DRAGOMIRESCU ELENA)
名古屋大学・エトピア科学研究所・研究員
研究者番号 : 80377093

(3) 連携研究者

()