

補助事業番号 2020M-141

補助事業名 2020年度 自然風が空力騒音の主音源である縦渦に及ぼす影響評価の研究  
補助事業

補助事業者名 呉工業高等専門学校 機械工学科 尾川研究室 尾川 茂

## 1 研究の概要

自動車・新幹線・飛行機などの高速の乗り物や回転翼をもつ風車などには、縦渦が共通項として存在する。この縦渦による空力騒音の発生機構を解明し、抜本的な騒音低減策に繋げれば、共通の対策効果が期待できるため波及効果も大きい。前年度の研究では一様な乱れのない流れの中で縦渦から発生する空力騒音の発生機構を先進性の高い理論・実験・解析の3つのツールを統合させて解明した。今年度は、空力騒音の主音源である縦渦が自然風のような大小の乱れを含む流れを受けるシーンを想定した現実的な流れ場において、空力騒音の増幅機構を解明することを狙いとしている。これまで構築した理論・実験・解析を活用して取組んだ。

まず理論面では、音源の理論式であるLighthill-Curleの式の次元解析から、発生する音は圧力変動・周波数・相関面積の3つの物理量の積として記述できる予測式を導出して翼表面の音源分布解明に適用した。次に実験領域では、デルタ翼の上流に円柱を設置し、自然風の持つ乱れを円柱から放出されるカルマン渦列で模擬し、デルタ翼前縁に発生する縦渦と干渉させ、両者の干渉によって発生する空力騒音を遠距離場で計測した。円柱の有無による空力騒音の周波数スペクトルを比較し2つの渦の干渉の影響を評価した。また、音源を捉えるため翼表面に超小型マイクを埋め込み圧力変動を計測し2重極音の点音源分布を調べた。最後に解析領域では本校の学術提携校である兵庫県立大学のスパコンを利用して、流体のNavier-Stokes方程式を非定常・非圧縮で解き、空力騒音の発生機構を定量的に解析した。解析で得られたカルマン渦の放出周波数および遠距離場音は実験値と比較し、その妥当性を検証した。カルマン渦の乱れを含んだ流れが、デルタ翼先端に衝突した際の流場および圧力場の非定常性を詳細に解析した。

以上の理論・実験・解析を総合して、自然風が空力騒音の主音源である縦渦に及ぼす影響を解明評価した。

## 2 研究の目的と背景

### (1) 目的

本研究の目的は、空力騒音の主音源である縦渦が自然風のような大小の乱れを含む流れを受けるシーンを想定したリアルワールドの流れ場において、空力騒音の増幅機構を解明することである。

### (2) 背景

近年、人々の生活水準の向上に伴い、騒音低減が社会的課題となっている。すなわち、自動車・新幹線・飛行機などの高速走行の乗り物や、再生エネルギーの風車などの回転翼を有

する構造物では、空力騒音(風切り音)が風速の6~8乗に比例して増大するため、その低減の社会的ニーズは極めて大きい。騒音の音源は渦、中でも流れ方向に平行な回転軸を有する縦渦が主音源となっている。したがって、縦渦による空力騒音に着目し、その発生機構を解明し低減につなげることは社会的に意義がある。

しかし、風洞と実走の評価を比較すると実走の方が音の変動感を大きく感じるという音質の問題がある。いわゆるバサバサ音と呼ばれる変動感を伴う数Hzの間欠的な騒音が乗員の快適性を損なっているが、従来の風洞実験での「整流された一様な乱れの少ない人工風」ではこの音は再現できず、業界の長年の重要課題となっている。

### 3 研究内容

自然風が空力騒音の主音源である縦渦に及ぼす影響を理論・実験・解析で解明した。

#### (1)理論

音源項を翼表面の圧力変動の時間微分とするLighthill-Curle方程式を用いて遠距離場音を予測する次式の理論式を導出した。すなわち、この式は物体から放射される音の強さは、翼表面の圧力変動 $p_s$ 、周波数 $f$  および相関面積 $S$ の3つの物理量として記述できる。

$$I_D = \left( \int \frac{\partial p_s}{\partial t} dS \right)^2 = \sum (p_s \cdot f \cdot S)^2$$

この式を用いて、実験で計測した圧力変動から各周波数の相関面積を求め、その総和として遠距離場音が予測できる。この予測式から翼表面の音源分布を解明した。

#### (2)実験による縦渦の音源分布解明

実験時の平面レイアウトを図1に示す。デルタ翼先端が吹き出し口中心線上にあり、翼先端と円柱中心が約0.96 mとなり、主流方向に対し迎角 $15^\circ$ の状態となるようデルタ翼モデルを設置した。遠方場音計測はデルタ翼先端から約1.8 m離れた位置で行った。カルマン渦列の発生には $\phi 114$ の円柱を用いた。主流速度 $U=40$  m/sの場合は $f \doteq 70.2$  Hzとなるため、翼へのカルマン渦列による外乱はその逆数の約0.014秒周期で与えられる。

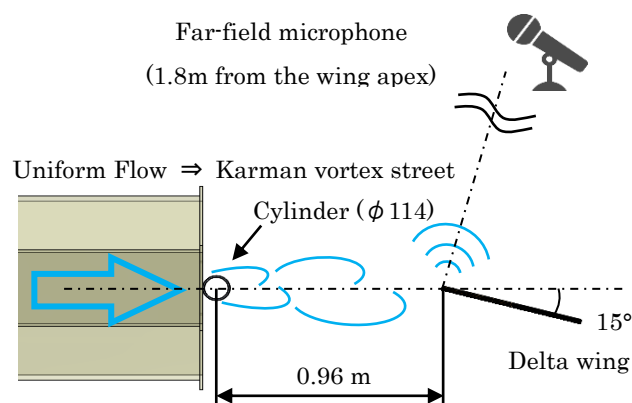


図1 実験レイアウト

主流速度40 m/sでの計測時間全体での遠方場音のスペクトルを図2に示す。遠方場音のうち、100 Hz ~ 300 Hzにおける狭帯域音(図中赤枠)では、デルタ翼+円柱の放射音(図中赤線)がデルタ翼単体の放射音(図中黒線)より大きくなった。これはカルマン渦列が縦渦を加振し、縦渦と共鳴することでデルタ翼+円柱の放射音が増加したと推察される。円柱が放出するカルマン渦列とエオルス音は周期的な現象であるため、デルタ翼+円柱の放射音も周期的に変化すると考えられる。そのため、短時間フーリエ変換を用いたスペクトログラムで収録した遠方場音の時間変動を分析した。短時間フーリエ変換では時間分解能と周波数分解能はトレードオフの関係にあるため、時間分解能は0.002秒とし、周波数分解能は40 Hzとした。

図3に狭帯域音と翼端渦音の0.1秒間の変動を示す。横軸は時間(秒)、縦軸は周波数(Hz)、色範囲が音圧レベル(dB)である。狭帯域音はデルタ翼単体ではほぼ定常的に存在していたが、デルタ翼+円柱では円柱のカルマン渦列の放出周期である約0.014秒と同周期の周期的な変動を示した。これにより、図3の遠方場音のスペクトルにおけるカルマン渦が衝突することで増大する狭帯域音の増加は、カルマン渦の周波数70 Hzを中心として10 dB程度であることが明らかとなった。なお、カルマン渦によって翼端渦音及び広帯域音は減少する傾向を示した。

この円柱から放出されるカルマン渦によって発生する音が、実走状態で自然風がある場合には、縦渦と干渉して間欠音となって聞こえるものと推察される。本実験ではカルマン渦の周波数が70Hz、すなわち1秒間に70個の渦が縦渦に衝突した場合に相当するが、実走時の耳障りなバサバサ音は、数Hzの間欠音であることから自然風のもつ周波数が数Hz、すなわち自然風の中に含まれる渦の塊が1秒間に数個の割合で縦渦と干渉して発生しているものと考えられる。このカルマン渦による音が増大する現象は、次の解析で明らかにした。

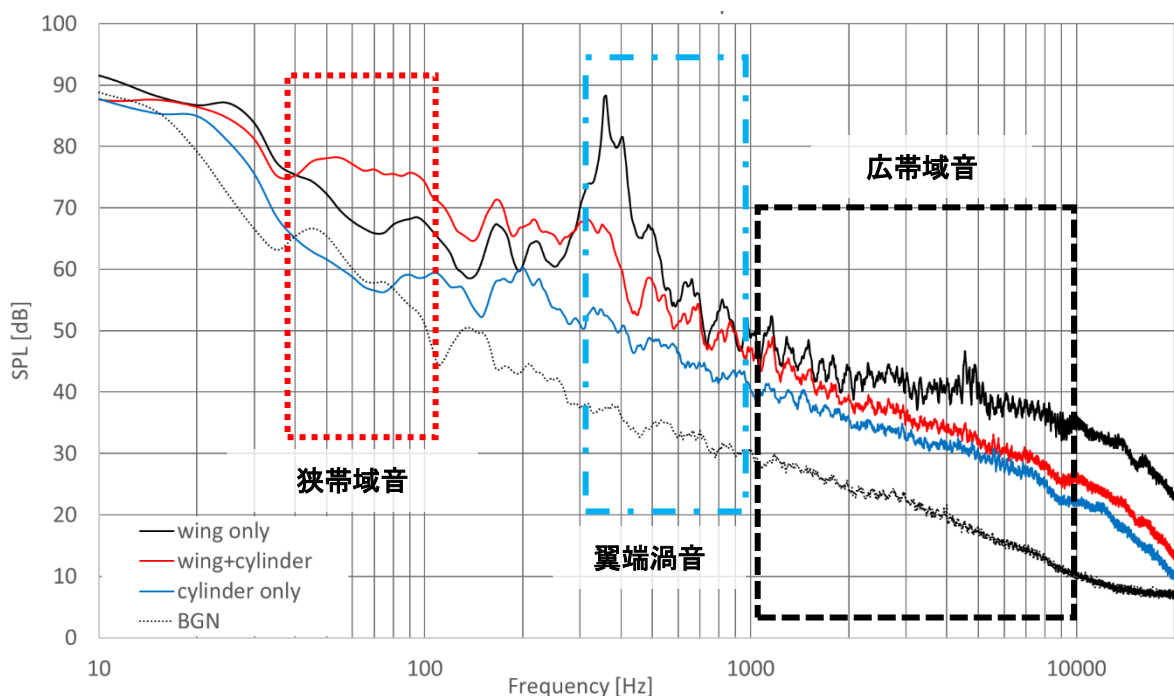


図2 円柱の有無による遠距離場音の比較

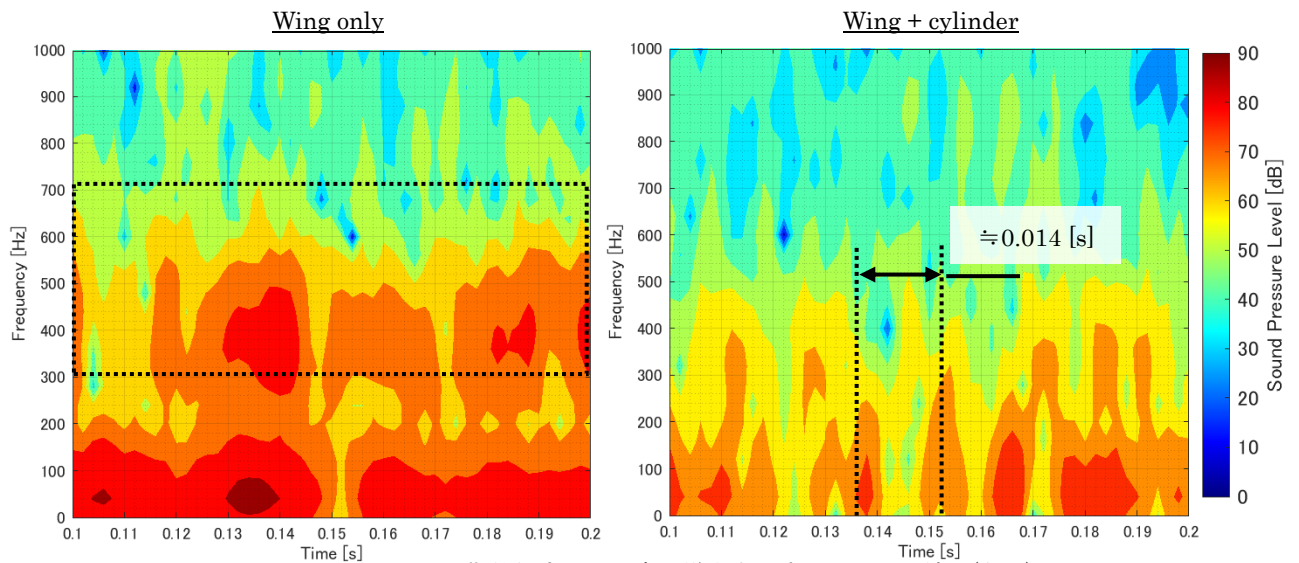


図3 カルマン渦の周期的衝突による音の増大を示すスペクトル線図(右図)

### (3) スパコン解析による自然風を受ける縦渦の空力騒音の発生機構

解析ソフトはSIEMENS社製の汎用流体解析ソフトであるSTAR-CCM+を用いた。本研究では、非定常解析を用いて評価を行うため、Large Eddy Simulationを実施した。Subgrid Scaleモデルは動的Smagorinskyモデルを用いた。解析対象のデルタ翼は長さ $L = 0.8$  m、高さ $0.8$  m、厚さ $0.02$  mである。このデルタ翼の上流側 $1.5$  mに直径 $0.08$  mの円柱を設置し、解析を行った。流速は $20$  m/sで、流速及び代表長さで定義されるレイノルズ数は、デルタ翼長を代表長さとして用いると $Re = 1.0 \times 10^6$ である。従って本解析では低マッハ数、高レイノルズ数の流れ場を対象としている。図4に円柱とデルタ翼周りの流速分布を示す。円柱から放出されたカルマン渦は翼先端に当たるように配置されている。

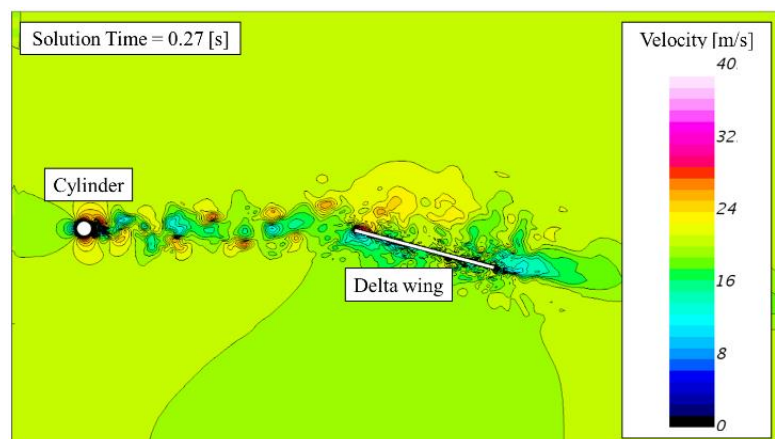


図4 円柱とデルタ翼のレイアウト流速分布

図5はカルマン渦が縦渦先端に衝突して、縦渦が激しく揺動している様子が捉えられている。特に、縦渦先端近傍の流速が高く、音の発生も大きいと考えられる。また、図6は円柱の有無による遠距離場音の比較を示している。周波数58 Hzのカルマン渦が衝突することによって、カルマン渦の衝突周波数帯で音が最大20 dBも増大していることがわかる。これは実験と同様の傾向である。

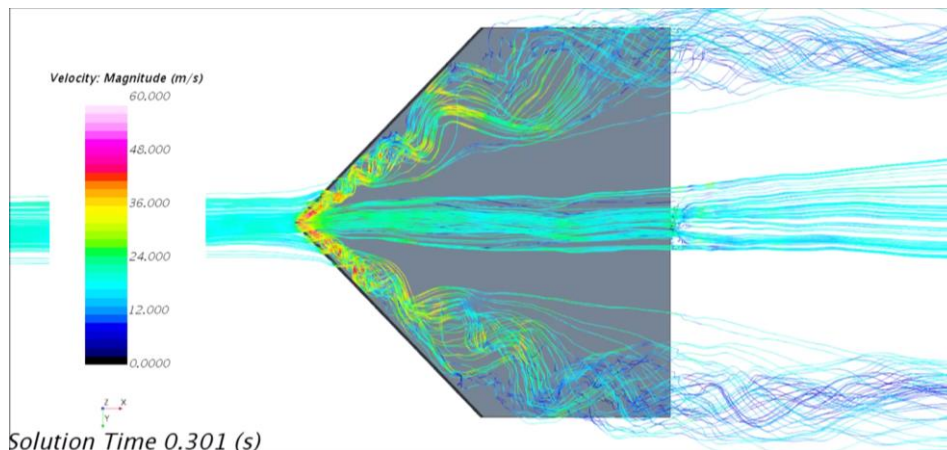


図5 カルマン渦の衝突によって揺動する縦渦

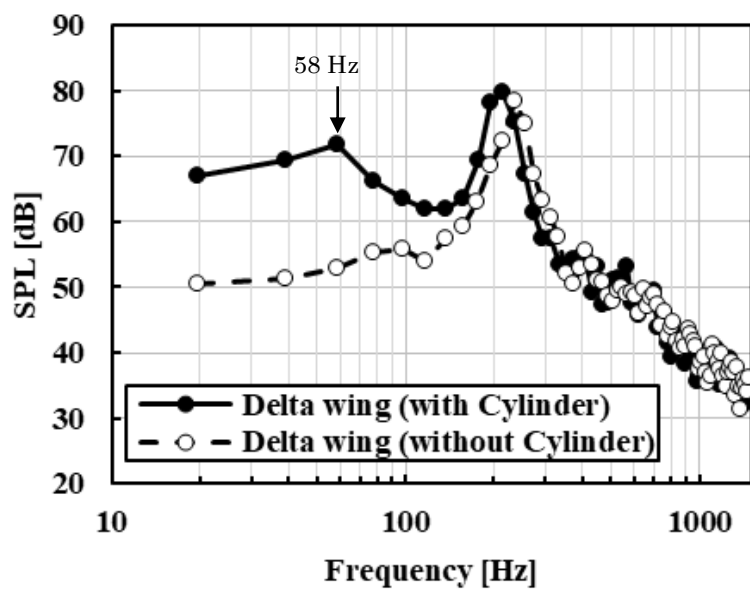


図6 カルマン渦の衝突周波数 58 Hz を中心とする周波数帯で増加する縦渦からの空力騒音

図7は渦A、B、Cが翼先端に衝突した時のデルタ翼周りの速度分布と翼表面近傍の渦度分布を示す。特に黄色で示された流速の速いカルマン渦Bが衝突すると、翼先端の流速と翼表面の渦度が増加し、音の増大しているものと考えられる。

以上の理論・実験・解析から、カルマン渦の乱れを含む自然風が縦渦と干渉することで、音が増大する現象が実験および解析で捉えられた。カルマン渦の衝突で騒音が顕著に増大するメカニズムは、縦渦先端部は流速最大かつ渦度が最大である。この先端部にカルマン渦のような強い乱れを有する自然風が衝突すると、流速及び渦度が更に顕著に増大し、翼表面に時間的に大きな変化を伴う強い圧力変動を励起するためであると考えられる。

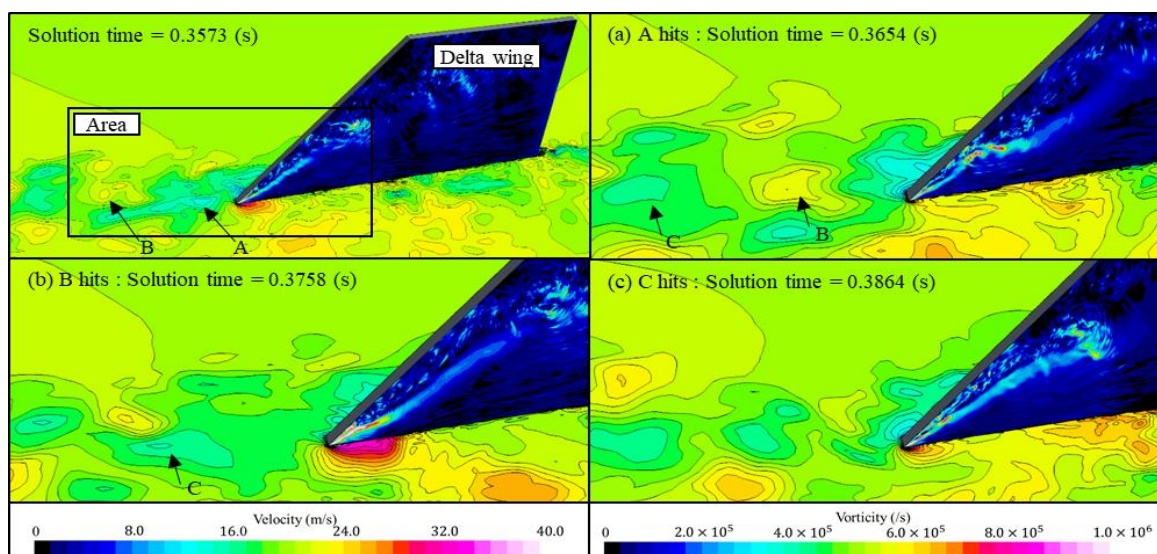


図7 渦A、B、Cが翼先端に衝突した時のデルタ翼周りの速度分布と翼表面近傍の渦度分布 (図(b)：カルマン渦Bの衝突で翼先端の流速と翼表面の渦度が増加し、音が増大)

【学会での発表の様子】 <https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2020/03/04.html>  
[https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2020/03/05\\_1.html](https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2020/03/05_1.html)

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

前年度の研究では、風洞試験で整流された乱れの小さい一様な流れの中に置かれた物体周りに形成される縦渦の空力騒音の発生機構が明らかにできたが、今年度の研究で得られた自然風の影響の解明評価ではリアルワールドを考慮した自動車の空力騒音評価に関する風洞実験並びに実走評価を新しく見直す契機になるものと考えられる。すなわち、風洞実験と実走評価では車内で聞こえる空力騒音の音質が異なり、実走評価の方が耳障りな変動感を伴う音が大きくなるという問題がある。いわゆるバサバサ音と呼ばれる、変動感を伴う数Hzの間欠的な空力騒音が乗員の快適性を損なっている。乱れの小さい一様流による風洞試験ではこの音は評価できず、バサバサ音の発生要因は未解明の状況であった。

しかし、今回の研究で得られた知見から、強い渦を含んだ自然風が空力騒音の主音源であ

る縦渦と干渉することで、間欠的な変動音を励起し耳障りなバサバサ音として聞こえると考えられる。本研究は、自動車分野に関わらず、風車・ファンなどのターボ機械、また航空機・ドローンのなどの航空分野においても、大小の渦を乱れとして含んだ自然風を考慮した流体騒音の騒音レベル低減および音質改善において新たな研究の方向性とその発展に寄与するものである。研究の最終的なゴールとして、乗り物の乗員の静粛な室内快適空間の創造および飛行物体の近隣住民の騒音環境改善に貢献できるものと期待できる。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

自動車業界で10年間の空力騒音研究の実務経験を積み、そこで得られた知見をまとめ「縦渦による剥離・再付着を伴う物体の空力騒音に関する研究」で東京大学から博士号を取得した経緯がある。一方、呉高専での8年間の教歴の中で本科生・専攻科生の卒業研究題目としても空力騒音研究に取り組み、学生にとっては「流れによる音の発生」について、風洞実験・スパコンによる解析を通じて、現象を深く考える鍛錬の一助になったものとする。

これまでは、一様な乱れのない流れの中で縦渦から発生する空力騒音を研究してきたが、今回の研究では、リアルワールドにおいて空力騒音の主音源である縦渦が自然風のような大小の乱れを含む流れを受けるシーンを想定した現実的な流れ場において、空力騒音の増幅機構が実験・解析・理論から総合的に解明でき、今後の応用研究の礎とすることができた。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等【研究業績ポータルresearchmap】<https://researchmap.jp/ogawa-sh>

### (1) 査読論文

Harutaka Honda, Shigeru Ogawa, and Kohei Suzuki, Experimental Study on Aerodynamic Noise from Delta Wing, *Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA)*, Vol. 10, No. 6, pp161-169, 2021.

### (2) 国際会議発表

① Harutaka Honda, Shigeru Ogawa, and Kohei Suzuki, Experimental Research on Aerodynamic Noise from Delta Wing, *The 31st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP31)*, 2020.

② Kohei Suzuki, Shigeru Ogawa, and Harutaka Honda, Study on Relationship between Aerodynamic Sound Sources by Longitudinal Vortex System and Flow Field, *The 31st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP31)*, 2020.

### (3) 国内学会発表

① 尾川 茂, 鈴木 康平, 本多 陽敬, 岡澤 将輝; カルマン渦と縦渦の干渉によって発生する空力騒音の研究, 第34回数値流体力学シンポジウム, Paper No. 0 D01-4, 2020.

② 尾川 茂, 鈴木 康平, 本多 陽敬; カルマン渦による外乱を受けた, 縦渦から放射される空力騒音の研究, 第40回流力騒音シンポジウム, 2020.

③ 鈴木 康平, 尾川 茂, 本多 陽敬; 乱れを含む流れが縦渦の空力騒音に及ぼす影響

に関する数値解析, 日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会, Paper No. 06d1, 2021.

④本多 陽敬, 尾川 茂, 鈴木 康平; カルマン渦列干渉時のデルタ翼放射音分析, 日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会, Paper No. 07c1, 2021.

⑤宇野 綾二, 本多 陽敬, 尾川 茂; ドア内部流れの数値解析の研究, 日本機械学会 中国四国学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会, Paper No. 07a2, 2021.

⑥永田 海晴, 尾川 茂, 鈴木 康平, 高速噴流の解析精度の向上に関する研究, 日本機械学会 中国四国学生会, 第51回学生員卒業研究発表講演会, Paper No. 07a4, 2021.

⑦岡澤 将輝, 本多 陽敬, 尾川 茂, カルマン渦と縦渦の干渉が三角翼の圧力変動に及ぼす影響, 第51回学生員卒業研究発表講演会, Paper No. 07a3, 2021.

(4) 研究報告書(呉工業高等専門学校) 2021年3月出版

【機械工学科卒業研究論文集】

①宇野 綾二: 自動車のドア内部流れの数値解析の研究

②永田 海晴: 高速噴流の解析精度の向上に関する研究

③岡澤 将輝: カルマン渦と縦渦の干渉が三角翼表面の圧力変動に及ぼす影響

【専攻科特別研究論文集】

④本多 陽敬: カルマン渦列によるデルタ翼放射音への影響分析

⑤鈴木 康平: 乱れを有する流れが縦渦の空力騒音に及ぼす影響に関する数値解析

7 補助事業に係る成果物

該当はありません。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 呉工業高等専門学校(クレコウギョウセンモンガッコウ)

住 所: 〒737-8506

広島県呉市阿賀南2-2-11

担 当 者: 嘱託教授 尾川 茂(オガワ シゲル)

担 当 部 署: 機械工学分野(キカイコウガクブンヤ)

E - m a i l: ogawa@kure-nct.ac.jp

U R L: <https://www.kure-nct.ac.jp/>

《成果発表確認順序》

トップページ → 呉高専日誌 過去の記事【2020年4月～】 → 2021年3月



- ・専攻科生2名が「日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会」で発表
- ・機械工学科5年生3名が「日本機械学会中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会」で発表